



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

SCUOLA DI SCIENZE
Dipartimento di Geoscienze
Direttore Prof. Nicola Surian

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN GEOLOGIA
AMBIENTALE E DINAMICA DELLA TERRA

**MODELLAZIONE NUMERICA
DELL'ACQUIFERO FREATICO DELLA
VAL LAPISINA**

Relatore: Prof. Leonardo Piccinini
Correlatore: Prof.ssa Christine Meyzen

Laureando: Daniele Rizzo
Matricola: 2089406

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

*Ai nonni Franco, Toni e Bianca,
so che siete sempre con me*

Indice

1	Introduzione	1
2	Inquadramento	2
2.1	Inquadramento geografico	2
2.2	Inquadramento geologico.....	4
2.2.1	Principali strutture tettoniche	8
2.2.2	Cartografia geologica, indagini geofisiche e sezioni geologiche	10
2.2.3	Successioni stratigrafiche.....	14
2.3	Inquadramento geomorfologico.....	17
2.4	Inquadramento idrogeologico	21
3	Monitoraggio idrogeologico.....	23
3.1	Livello idrometrico dei laghi	23
3.2	Carico idraulico nei piezometri.....	24
3.2.1	Vasca Forcal	27
3.2.2	Negrisiola.....	30
3.2.3	Lagusel	32
3.2.4	Pian dei Nove.....	34
3.2.5	Borgo Piccin.....	37
3.3	Portate dai pozzi e dalle opere drenanti	39
3.3.1	Campo pozzi di Borgo Piccin.....	39
3.3.2	Galleria drenante Belvedere e sorgente San Floriano	40
4	Bilancio idrico del suolo e stima dell'infiltrazione	45
4.1	Dati di precipitazione e temperatura orari	46
4.2	Evapotraspirazione reale e surplus.....	52

4.3	Infiltrazione	60
5	Modello idrogeologico concettuale.....	61
6	Implementazione delle simulazioni numeriche	63
6.1	Approccio metodologico e obiettivi delle simulazioni	63
6.2	Dominio di modellazione e discretizzazione geometrica.....	67
6.3	Parametrizzazione delle unità idrogeologiche.....	71
6.4	Condizioni al contorno e distribuzione iniziale di carico idraulico 73	
6.5	Discretizzazione temporale e metodi risolutivi	77
6.6	Strategia di calibrazione, punti di controllo ed indicatori statistici della calibrazione 79	
6.7	Simulazione della componente advettiva del trasporto e normativa di riferimento	86
7	Risultati delle simulazioni numeriche	90
7.1	Risultati delle simulazioni di calibrazione.....	90
7.1.1	Simulazione di calibrazione allo stato stazionario	90
7.1.2	Simulazione di calibrazione allo stato transitorio	93
7.2	Risultati della simulazione di trasporto advettivo	98
7.3	Risultati della simulazione predittiva allo stato transitorio	103
8	Conclusioni	109
9	Allegati: sezioni geologiche	111
10	Bibliografia.....	137
11	Ringraziamenti.....	140

1 Introduzione

La Val Lapisina ha svolto, sin dall'epoca romana, un ruolo cruciale come via di comunicazione fra la pianura veneta e la montagna bellunese, rappresentando un valico che interrompe la continuità della catena prealpina. La presenza di fondamentali direttrici quali la Strada Statale 51 “di Alemagna”, la ferrovia Conegliano-Ponte nelle Alpi e l'autostrada A27 Venezia-Belluno, che dagli anni novanta del secolo scorso attraversa la valle con i suoi viadotti, testimoniano questo ruolo connettivo di importanza commerciale e turistica.

La valle è caratterizzata da un'abbondante presenza di acqua, sia superficiale che sotterranea. La risorsa idrica è stata sfruttata, sin dagli inizi del novecento, per la produzione di energia, con la costruzione di centrali idroelettriche attive ancora oggi. Le sorgenti e i pozzi presenti nella valle sono utilizzati come fonti di approvvigionamento idropotabile, andando a soddisfare il fabbisogno idrico del Comune di Vittorio Veneto e dei comuni limitrofi e rappresentando un punto di captazione nevralgico per il sistema di adduzione a servizio dei comuni della sinistra Piave. La consapevolezza di questa importanza strategica della risorsa idrica della Val Lapisina ha portato la società che gestisce gli impianti acquedottistici, Piave Servizi S.p.A., a sviluppare e ad attuare, nel corso del tempo, strategie di intervento volte a preservare la risorsa sia in termini quantitativi che qualitativi. Quest'ultima, infatti, è minacciata dall'elevato traffico veicolare che ogni giorno percorre la valle, il quale può rappresentare la causa di sversamento di sostanze inquinanti all'interno dell'acquifero di fondovalle.

Il lavoro di questa tesi si è collocato all'interno di quest'ambito, affiancandosi a uno studio generale per la protezione delle risorse idriche della Val Lapisina, commissionato da Piave Servizi e redatto da un gruppo di Lavoro composto dal Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova e Nuova Agepi S.r.l., società di servizi operante, tra gli altri, nei campi della geologia, idrogeologia e idraulica. Lo studio in questione, a partire dalla primavera del 2023, ha previsto un'importante fase preliminare di raccolta dati e monitoraggio delle fonti di approvvigionamento.

Gli obiettivi di questa tesi sono quelli di migliorare la conoscenza del comportamento delle acque sotterranee della valle attraverso la definizione di un modello idrogeologico concettuale che riassume ed elaborasse i dati geologici ed idrogeologici ottenuti nella fase di raccolta dati e di monitoraggio; successivamente, dal modello concettuale è stato implementato un modello numerico che rappresentasse quantitativamente e nel modo più significativo possibile la circolazione idrica sotterranea entro l'acquifero di fondovalle in

termini di distribuzione del carico idraulico e dei flussi captati attraverso alcune opere di derivazione, sia allo stato stazionario che transitorio. La rappresentatività delle simulazioni numeriche è stata verificata nella fase di calibrazione e in seguito è stato possibile effettuare alcune simulazioni di tipo predittivo, volte a prevedere le conseguenze di scenari potenzialmente dannosi per l'approvvigionamento idropotabile. Inoltre, a seguito di una simulazione della componente advettiva del trasporto di eventuali sostanze inquinanti, sono state individuate le aree di cattura dei pozzi e delle opere di captazione ubicate nel fondovalle, nelle modalità conformi alla normativa di riferimento vigente.

2 Inquadramento

2.1 Inquadramento geografico

La maggior parte dell'area di studio ricade, dal punto di vista amministrativo, nel Comune di Vittorio Veneto, e in parte nei Comuni di Revine Lago, Fregona e Alpago, fra le province di Treviso e Belluno in Veneto. Essa è costituita quasi interamente dalla Val Lapisina (Figura 2-1), la quale si incunea per circa dieci chilometri all'interno delle Prealpi Bellunesi in direzione SSO-NNE ed è delimitata ad ovest dalla dorsale del Col Visentin (1763 m s.l.m.) e ad est dal massiccio del Cansiglio, in particolare dai rilievi del Monte Millifret (1581 m s.l.m.) e del Monte Pizzoc (1655 m s.l.m.). A nord la valle è chiusa dal valico della Sella di Fadalto (489 m s.l.m.) che la separa dalla zona dell'Alpago e che funge da confine fra le province di Treviso e Belluno, mentre a sud è messa in comunicazione con la pianura veneta attraverso la stretta di Serravalle, in cui sorge l'omonimo centro storico della città di Vittorio Veneto. Nell'area studio è compresa anche la porzione più orientale della Vallata Trevigiana, da Serravalle fino allo spartiacque topografico collocato circa 800 metri ad est del Lago di Santa Maria.

Dal punto di vista cartografico, l'area studio è compresa:

- Nel foglio 23 “Belluno” della Carta Topografica d'Italia alla scala 1:100,000 dell'Istituto Geografico Militare (I.G.M.);
- Nei fogli 63 “Belluno” e 64 “Aviano” della Carta Topografica d'Italia alla scala 1:50,000 dell'I.G.M.;
- Nei fogli 23 II SO “Col Visentin” e 23 II SE “Bosco del Cansiglio” della Carta Topografica d'Italia alla scala 1:25,000 dell'I.G.M.;
- Nelle sezioni 063120 “Nevegal”, 063160 “San Floriano”, 064090 “Fadalto” della Carta Tecnica Regionale alla scala 1:10,000 della Regione Veneto;

- Nelle sezioni 063121 “Santa Croce del Lago”, 064094 “Fadalto”, 063122 “Lago Morto”, 064093 “Monte Millifret”, 063164 “Menegon”, 063161 “San Floriano di Vittorio Veneto”, 063163 “Trementina” e 063162 “Ciser” della Carta Tecnica Regionale alla scala 1:5,000 della Regione Veneto.

La Val Lapisina è caratterizzata dalla presenza di tre laghi, disposti lungo l’asse della valle. Essi sono, da nord a sud, il Lago Morto, il Lago del Restello e il Lago di Negrisola. Il primo e l’ultimo sono di origine naturale mentre il Lago del Restello è un lago di sbarramento artificiale. Tutti e tre i laghi sono sfruttati per la produzione di energia idroelettrica tramite centrali gestite da ENEL S.p.A. Il corso d’acqua principale, che ha origine dal versante del Col Visentin, è il Fiume Meschio. La quota altimetrica del fondovalle varia fra circa 160 e 300 m s.l.m.



Figura 2-1: Immagine satellitare dell’area di studio.

2.2 Inquadramento geologico

L'area in esame si colloca nelle Alpi Meridionali, all'interno del settore delle Prealpi Bellunesi che comprende i gruppi montuosi del Col Visentin e del Cansiglio, separati fra loro dalla Val Lapisina e dalla Sella di Fadalto. Le formazioni rocciose che affiorano nell'area appartengono a successioni mesozoiche e cenozoiche che in generale vanno dal Giurassico Medio (ca. 170 milioni di anni fa) al Miocene (ca. 11 milioni di anni fa). I fianchi e il substrato del fondovalle della Val Lapisina sono costituiti principalmente da rocce calcaree giurassiche e cretache, mentre sul versante del Cansiglio, a sud del sistema di faglie della linea Bassano-Valdobbiadene-Vittorio Veneto, sono presenti rocce calcareo-marnose e arenacee cenozoiche riconducibili alla successione stratigrafica della "Molassa Veneta" (Busoni & Bondesan, 2019). La stratigrafia viene descritta nel dettaglio nel Paragrafo 2.2.2.

L'origine geologica dell'area è strettamente legata all'orogenesi alpina, in particolare all'ultima fase di essa, quella che ha formato le cosiddette Alpi Meridionali. L'apertura dell'Oceano Atlantico, avvenuta circa 100 milioni di anni fa durante il Cretacico, causò il movimento della placca africana verso nord, in direzione della placca europea. Durante questo processo, i sedimenti marini presenti sui fondali cominciarono a deformarsi e ad accumularsi lungo il margine settentrionale della placca africana, su cui era presente una sorta di grande promontorio costituito dalla microplacca Adria. Questi eventi diedero inizio alla prima fase dell'orogenesi alpina, nota come fase eoalpina, che si protrasse fino all'Eocene (circa 50 milioni di anni fa). L'evento collisionale si verificò quando la microplacca Adria si scontrò con la placca europea, inaugurando la fase mesoalpina, che durò fino all'Oligocene inferiore, circa 30 milioni di anni fa. Durante questo periodo, la crosta africana si sovrappose a quella europea, dando luogo alla fase principale dell'orogenesi alpina. Successivamente, durante la fase neoalpina, a partire dal Miocene (circa 23 milioni di anni fa), la placca africana continuò ad avvicinarsi, frammentandosi in una serie di falde che si inserirono nel blocco delle Alpi già formato. Questo processo ha prodotto una struttura a falde di ricoprimento, impilate le une sulle altre attraverso faglie inverse a basso angolo (sovrascorrimenti) con vergenza verso sud, dando origine alle Alpi Meridionali o Sudalpino. Una caratteristica importante di questa regione alpina è la presenza esclusiva di rocce sedimentarie, situate sopra il basamento metamorfico paleozoico, che affiora solo nella parte più antica e interna della catena (Busoni & Bondesan, 2019).

Nel Giurassico, l'area delle Prealpi Bellunesi era dominata da un ambiente prettamente marino. In base ai diversi tipi di roccia che affiorano lungo tutto l'arco delle Prealpi, si possono distinguere tre differenti ambienti paleogeografici in cui esse si sono formate, che si

differenziavano per la profondità dei bacini di sedimentazione, caratterizzando l'ambiente dell'epoca con una successione di alti e bassi strutturali. Ad ovest, nella regione corrispondente all'attuale massiccio del Monte Grappa, prevaleva un mare poco profondo, tipico delle piattaforme carbonatiche, individuato nella cosiddetta Piattaforma di Trento (Busoni & Bondesan, 2019). Condizioni simili si trovavano anche nella parte orientale della provincia, nell'area del massiccio del Cansiglio, dove si estendeva la Piattaforma Friulana, sul cui margine occidentale sorgeva una scogliera corallina, corrispondente agli attuali rilievi dei monti Millifret e Pizzoc (Lucchetta, 2023). Tra queste due aree più elevate si estendeva un bacino marino più profondo, noto come Bacino di Belluno. L'area della Val Lapisina si trovava proprio al margine tra il Bacino di Belluno e la Piattaforma Friulana.

Queste due tipologie di ambiente sedimentario (pelagico e di piattaforma) hanno influenzato la formazione delle rocce in modo diverso. Nell'ambiente di piattaforma si sono depositati strati spessi di rocce calcaree e dolomitiche, mentre nel bacino profondo la sedimentazione ha dato origine a rocce carbonatiche fittamente stratificate, con intercalazioni marnose e argillose. Ai margini del bacino veniva rimaneggiato e risedimentato materiale grossolano proveniente dalle scarpate delle piattaforme vicine attraverso le correnti torbiditiche (simili a grandi frane sottomarine). È questa l'origine del Calcarea del Vajont, una formazione calcarea oolitica massiccia che costituisce il nucleo dell'anticlinale del Col Visentin (Par. 0) e che rappresenta la roccia più antica affiorante in Val Lapisina (Busoni & Bondesan, 2019). Il Giurassico in Val Lapisina si chiude con la deposizione della Formazione di Fonzaso e del Rosso Ammonitico Veronese. La prima rappresenta una diminuzione degli apporti torbiditici e una sostituzione dei granuli oolitici con sedimenti bioclastici, segnalando una progressiva evoluzione della Piattaforma Friulana (Costa et al., 1992). Il Rosso Ammonitico affiora lungo tutte le Prealpi, dalla Piattaforma di Trento fino alla base della Piattaforma Friulana, anche se nel Bacino di Belluno non presenta una grande continuità. Se ad ovest esso testimonia lo sprofondamento della piattaforma trentina, connesso alla fase tettonica distensiva occorsa nel Giurassico superiore (Busoni & Bondesan, 2019), ad est è caratterizzato da una considerevole riduzione dei depositi risedimentati, segnalando una temporanea crisi di produttività della Piattaforma Friulana alimentatrice (Costa et al., 1992). Con l'inizio del Cretacico si ha una fase in cui si depositavano sul fondale marino fanghi calcarei che daranno origine a calcari ben stratificati di colore grigio-bianco con intercalazioni selcifere, tipiche della formazione della Maiolica (Busoni & Bondesan, 2019; Figura 2-2). Quest'ultima si è formata in un ambiente deposizionale pelagico alla base della scarpata della Piattaforma Friulana, che riprende la sua produttività, come testimonia la presenza di torbiditi (Costa et

al., 1992). L'inizio dello smantellamento della scogliera è rappresentato dal Calcere del Fadalto, costituito da potenti banchi calcarenitici di natura prevalentemente torbidity, interpretati come detriti provenienti dalla piattaforma che si accumulavano ai piedi di essa nella zona di fore-reef (Costa et al., 1992; Figura 2-3). Nel Cretacico superiore si verifica il progressivo annegamento, da ovest verso est, della Piattaforma Friulana, con la deposizione di sedimenti calcareo-marnosi di mare aperto, i quali costituiscono la Formazione della Scaglia Rossa (Busoni & Bondesan, 2019).

Durante la fase orogenetica neoalpina, uno dei lineamenti tettonici più importanti che viene attivato è la linea Bassano-Valdobbiadene-Vittorio Veneto (Par. 0). Questa faglia delimita due ambiti geologici ben distinti. A nord di essa, infatti, si trova la successione stratigrafica composta dalle unità illustrate poco sopra, mentre a sud, fino alla Linea del Montello, affiora una serie di sedimenti derivati dal graduale riempimento del bacino di avampaese delle Alpi Meridionali. Il materiale accumulato, prodotto dall'erosione nelle aree emerse a nord, e successivamente trasportato e risedimentato nel bacino ha dato origine a rocce prevalentemente marnoso-argillose, alternate a litologie arenacee, conosciute come Molassa Veneta (Busoni & Bondesan, 2019). La successione stratigrafica della Molassa Veneta, affiorante nell'area studio, ha inizio con l'Arenaria Glauconitica di Belluno dell'Oligocene superiore, seguita, nel Miocene, da una fitta alternanza di rocce a grana fina (siltiti e argilliti), arenarie e marne. Tra queste unità troviamo la Siltite di Bastia, la Calcarenite di Castelcucco, la Siltite dei Casoni, l'Arenaria di Libano, la Marna di Bolago, l'Arenaria di San Gregorio e la Marna di Monfumo. Successivamente, si ha la deposizione delle arenarie litiche della Formazione di Monte Baldo, seguite dalla Marna di Tarzo, ultima formazione della Molassa affiorante nella nostra area (Par. 2.2.2; Busoni & Bondesan, 2019).



Figura 2-2: Affioramento di Maiolica nei pressi della Torre di San Floriano (foto Nuova AGEPI).

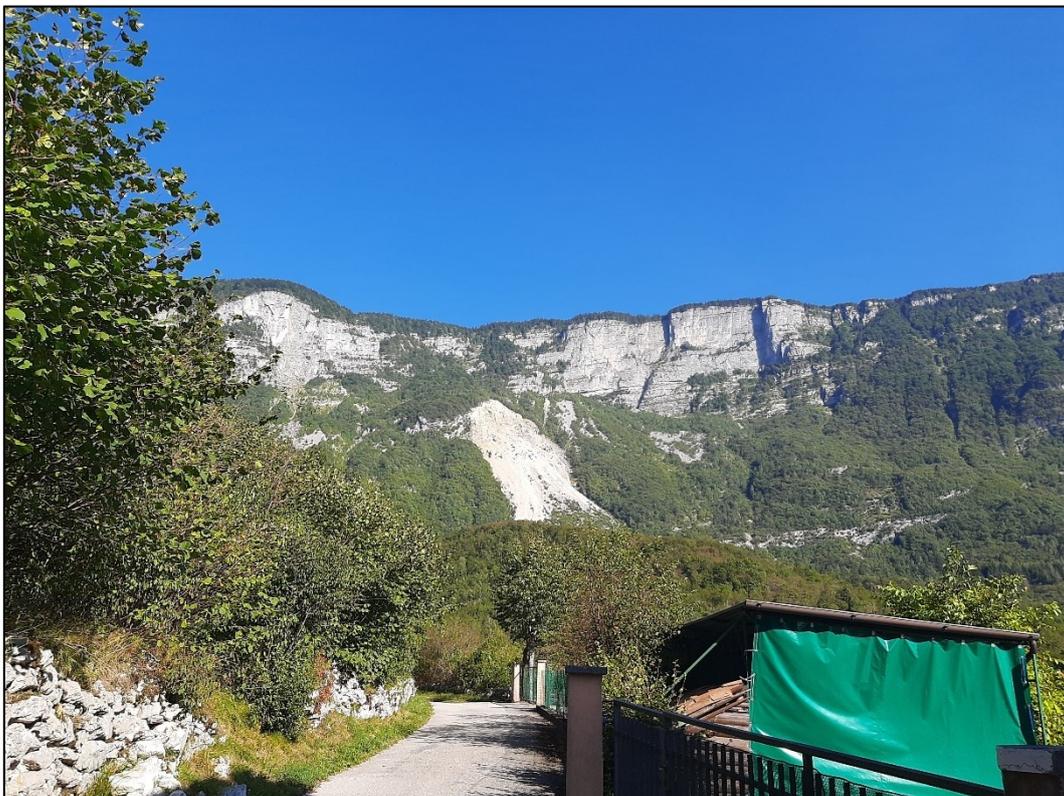


Figura 2-3: Pareti del massiccio del Consiglio costituite da Calcere del Fadalto fotografate dalla Sella di Fadalto. Si può notare una porzione della grande frana post-glaciale.

2.2.1 Principali strutture tettoniche

L'evoluzione tettonica dell'area della Val Lapisina e la sua attuale geometria sono strettamente correlate all'interazione intercorsa tra l'architettura mesozoica, rappresentata da faglie distensive disposte circa N-S nella zona del Fadalto, e l'ultima fase dell'orogenesi alpina, tra Miocene e Pliocene, quando lo stress compressivo ha generato sovrascorrimenti con direzione prevalente NE-SO. L'area in esame è strutturalmente complessa, in quanto posta esattamente al margine tra il Bacino di Belluno (Col Visentin-Nevegal) e la Piattaforma Friulana (Cansiglio; Costa et al., 1992).

Fra le più importanti strutture presenti nell'area, ve ne sono sia di tipo plicativo che disgiuntivo, di seguito brevemente descritte e illustrate in Figura 2-4:

- *Anticlinale del Col Visentin*, si tratta di una piega fortemente asimmetrica, quasi a ginocchio, che costituisce il ripido versante occidentale della Val Lapisina. Il fianco settentrionale è generalmente più blando mentre il fianco meridionale è molto inclinato o addirittura rovesciato (Costa et al., 1992). La piega è ben visibile nella scarpata soprastante la piana di Nove-Lago Morto dove emerge al nucleo il Calcare del Vajont. Essa è una porzione di una più ampia anticlinale che proviene dal Passo di San Boldo con asse orientato ENE-OSO fino al Monte Cor, per poi cambiare gradualmente direzione con un'ampia curvatura ed infine puntare verso nord in direzione Cugnan parallelamente alla Linea Longhere-Fadalto-Cadola. La parte più inferiore della piega appare fortemente dislocata dal sistema di faglie afferente a questo lineamento (Bozzolan, 1992).
- *Linea Longhere-Fadalto-Cadola*, essa è una faglia transpressiva sinistra che costituisce la rampa laterale del sovrascorrimento della Linea Bassano-Valdobbiadene-Vittorio Veneto, da cui si dirama. Questo lineamento si è impostato su una zona di debolezza strutturale, in corrispondenza del margine fra il Bacino Bellunese e la Piattaforma Friulana, in cui probabilmente erano presenti faglie attive dal Giurassico inferiore fino al Cretacico superiore (Costa et al., 1992). Esso si mantiene sempre circa parallelo all'anticlinale del Col Visentin con direzione dapprima NE-SO e poi N-S passata la zona della Sella di Fadalto. Dalla faglia principale se ne distacca una secondaria a partire dalla zona di Forcal, la quale taglia la porzione superiore del versante per poi formare una struttura a fiore positivo a nord-ovest del Lago Morto.
- *Sinclinale di fondovalle*, questa piega, posta in continuità con l'anticlinale del Col Visentin, rappresenta un basso strutturale su cui si è impostata la valle stessa. Si tratta

di una struttura particolarmente complessa in quanto compresa fra il sistema transpressivo Longhere-Fadalto-Cadola a ovest e il sovrascorrimento Bassano-Vittorio Veneto a est. Anch'essa mantiene una direzione pressoché costante NE-SO (Costa et al., 1992).

- *Linea della Valcalda*, è il nome che prende la Linea Bassano-Valdobbiadene-Vittorio Veneto da Revine fino alla Valcalda. Si tratta di un sovrascorrimento che mette a contatto la successione stratigrafica mesozoica a tetto con quella cenozoica della Molassa Veneta a letto. In questo tratto il piano di sovrascorrimento ha un'inclinazione di circa 70° (Costa et al., 1992). La faglia è orientata NE-SO fino a Valscura da dove punta verso est.
- *Faglie di Costiera o di Colesei*, si tratta di un sistema di faglie inverse antitetiche che costituiscono una struttura a fiore positivo, collegate alla Linea Bassano-Vittorio Veneto (Costa et al., 1992).
- *Faglia di Fais e faglie del Nevegal-Col Visentin*, si tratta di faglie trascorrenti sinistre di direzione circa NO-SE che tagliano la dorsale del Col Visentin (Costa et al., 1992).

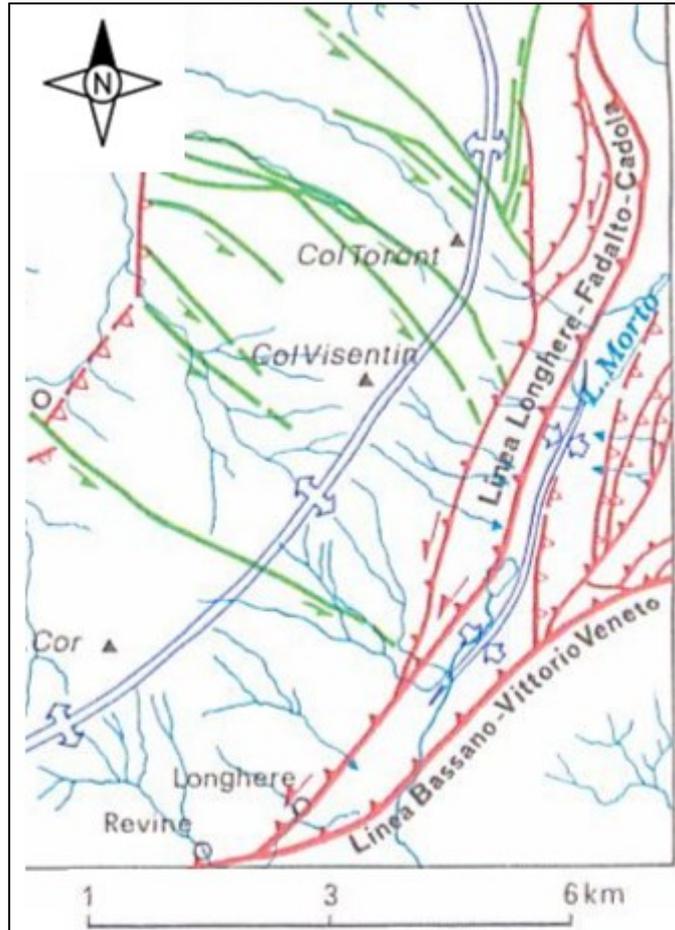


Figura 2-4: Dettaglio delle principali strutture tettoniche della Val Lapisina (da ISPRA, foglio CARG 63-Belluno).

2.2.2 Cartografia geologica, indagini geofisiche e sezioni geologiche

Per quanto riguarda la cartografia geologica di riferimento per la Val Lapisina, sono state utilizzate tre fonti principali, a diversa scala di rappresentazione, per ricostruire l'assetto litostratigrafico dell'area di studio. Esse sono le seguenti:

- Carta Geologica d'Italia – Progetto CARG, scala 1:50,000, foglio 63 “Belluno”;
- Carta Geologica della Provincia di Treviso, scala 1:10,000, sezioni n. 063120 “Nevegal”, n. 064090 “Fadalto”, n. 063160 “San Floriano” e n. 084040 “Vittorio Veneto”;
- Carta Geolitologica del PAT (Piano di Assetto del Territorio) del Comune di Vittorio Veneto, scala 1:10,000.

Il contributo maggiore è stato fornito dal foglio “Belluno” della Carta del progetto CARG (Costa et al., 1992), il quale riporta, nella sua estrema porzione sudorientale, l'area della Val Lapisina, indicando le formazioni litologiche ivi affioranti, nonché le principali strutture

tettoniche. La porzione più settentrionale della valle (l'area della Sella di Fadalto) non rientra però nei limiti di tale carta; perciò, è stata analizzata anche la Carta Geologica della Provincia di Treviso (Bondesan et al., 2009), che comprende l'intera valle nelle sezioni sopra citate. Questo ha permesso di ricavare informazioni geologiche a una scala di maggior dettaglio e di confrontare i dati nelle aree di sovrapposizione delle due cartografie.

Infine, è stata presa in considerazione la carta geolitologica del PAT comunale di Vittorio Veneto, di recente adozione (luglio 2023). Questa carta, che ha come finalità di utilizzo principale quella della progettazione urbanistica ed edilizia, è stata utilizzata principalmente per la definizione della composizione dei terreni di fondovalle (Nuova AGEPI, 2024).

Nelle fasi preliminari del progetto, lo studio tecnico Nuova AGEPI S.r.l. ha realizzato una carta geologica della Val Lapisina, confrontando e interpretando dati e informazioni ricavate dalle tre fonti cartografiche. Il risultato di questo lavoro è stato quello di ottenere una carta univoca, in grado di fornire una fotografia quanto più fedele circa l'assetto geologico del territorio. Inoltre, successivamente, è stato svolto un esame critico dei dati cartografici acquisiti attraverso l'esecuzione di rilevamenti di campagna mirati alle aree dove erano emerse situazioni di incertezza o dati disomogenei e di indagini geofisiche sito-specifiche al fine di rifinire e correggere la cartografia generale. Nonostante ciò, alcune porzioni di dominio di studio rimangono tuttavia scoperte di informazioni stratigrafiche e la continuità litologica, in questi casi, è stata ricostruita su base interpretativa.

Le indagini geofisiche condotte da Nuova AGEPI erano mirate in particolare a ricostruire l'andamento del contatto litologico fra substrato roccioso e copertura detritica, in quanto la profondità di tale contatto è nota direttamente solo nel punto in cui il piezometro del campo pozzi di Lagusel (Par. 3.2.3), terebrato nel febbraio 2023, incontra il bedrock a 65 m dal piano campagna. Si tratta di indagini sismiche passive con tecnica HVSr (Horizontal to Vertical Spectral Ratio; Nakamura, 1989) che utilizzano un tromografo digitale, uno strumento che fornisce l'andamento delle componenti del segnale sismico E-O, N-S e U-D (Up-Down), da cui vengono effettuate alcune elaborazioni finalizzate al riconoscimento degli orizzonti sismici significativi. Il tromografo digitale consente di misurare le frequenze di risonanza dei terreni (f di picco) che possono essere legate allo spessore dello strato (H) mediante le velocità delle onde di taglio del mezzo attraversato (V_s), secondo la seguente formula:

$$f = V_s / 4H$$

In un sistema monostrato+bedrock, che, semplificando, corrisponde verosimilmente alla situazione presente nel fondovalle della Val Lapisina, conoscendo la profondità di interfaccia tra i due litotipi è possibile calcolare le Vs rappresentative dei depositi.

La conoscenza di questo parametro, che si ritiene grossomodo costante, consente di stimare la profondità del substrato in assenza di indagini dirette. Si precisa che, considerata l'anisotropia che può caratterizzare i depositi in talune condizioni, il valore ottenuto può essere trattato come puramente indicativo e adatto a ottenere una discriminazione tra un substrato superficiale (picco ad alte frequenze) o profondo (picco a basse frequenze).

Sono stati effettuati in totale 17 rilievi con tomografo, le cui ubicazioni e risultati vengono riportati in Tabella 2-1.

ID	Ubicazione	Coordinate GB fuso Ovest		f di picco (Hz)	H substrato (m)
		Est	Nord		
1	Via Trementina	1754125.22	5100323.93	3	46
2	Casello V.V. Nord	1754875.50	5101767.36	2	68
3	Via delle Sorgenti	1755289.08	5102550.60	17	8
4	Via Lapisina (Scuole)	1756084.63	5104270.66	2	68
5	Via Divisione Julia	1756268.55	5104627.38	2,3	57
6	Lagusel	1755879.72	5103802.44	2,38	55
7	Cimitero Alpago	1758107.79	5109023.46	8,5	16
8	Lagusel (in prossimità del sondaggio)	1755927.17	5103845.57	2	65
9	San Floriano – Fronte Cimitero	1755604.86	5102779.45	18	7
10	San Floriano – Retro cimitero	1755677.57	5102819.70	7,7	17
11	San Floriano – Prato retro-cimitero	1755675.34	5102861.25	6,6	19
12	San Floriano – Conoide	1755764.13	5102784.51	2,3	56
13	Pian della Torre – Ciglio Sud	1755450.74	5102677.58	1	130
14	Pian della Torre – Ciglio SudOvest	1755378.17	5102736.66	N.D.	N.D.
15	Pian della Torre – Centro	1755334.02	5102807.15	2,3	56
16	Pian della Torre – Ciglio NordEst	1755475.14	5102914.07	35	3,7
17	San Floriano – Retro centrale	1755447.37	5102600.68	16	8

Tabella 2-1: Ubicazione e risultati delle indagini HVSR (Nuova AGEPI S.r.l.). In giallo è indicata la prova effettuata nei pressi del sondaggio di Lagusel in cui la profondità del substrato è nota con certezza.

In seguito, Nuova AGEPI ha ricostruito, con il contributo dello scrivente, 23 profili geologici individuati trasversalmente alla valle ogni 500 m e una sezione longitudinale che corre lungo il fondovalle (Figura 2-5), ricostruendo e affinando i limiti geologici ed eliminando le

eventuali discrepanze presenti. Nei punti più carenti di informazioni, la continuità litologica è stata ricostruita utilizzando i dati dalle sezioni più vicine. Queste sezioni sono servite come base per definire lo spessore dell'acquifero di fondovalle oggetto di modellazione numerica. (Par. 0 e 6.2). In Figura 2-6 sono riportate come esempio la sezione longitudinale, in cui si nota la grande differenza di spessore dei depositi fra parte alta e parte bassa della valle, e la sezione trasversale n. 10, tracciata nei pressi del sondaggio di Lagusel. Le sezioni complete sono riportate negli allegati.

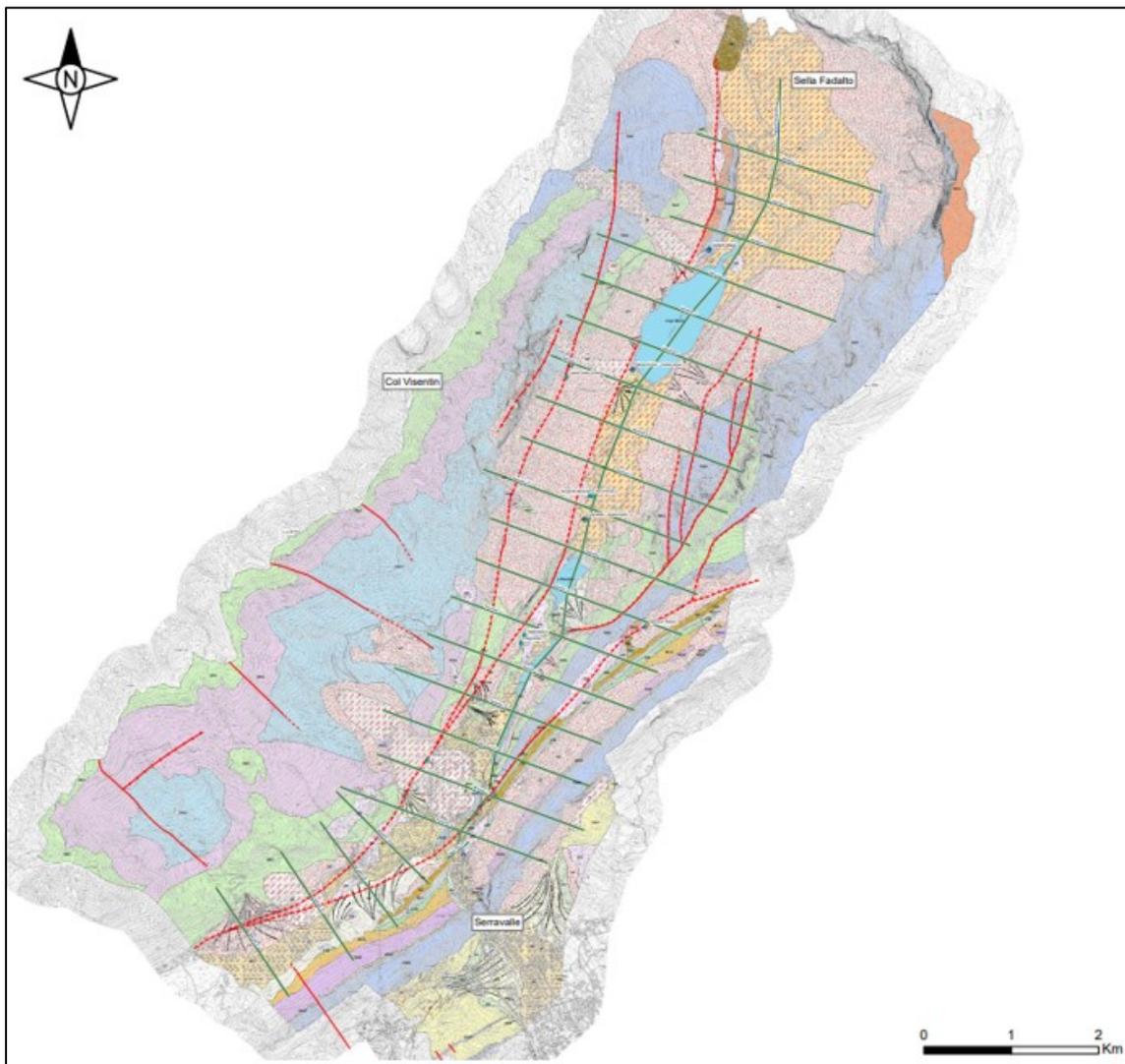


Figura 2-5: Tracce delle sezioni sulla carta geologica realizzata da Nuova AGEPI.

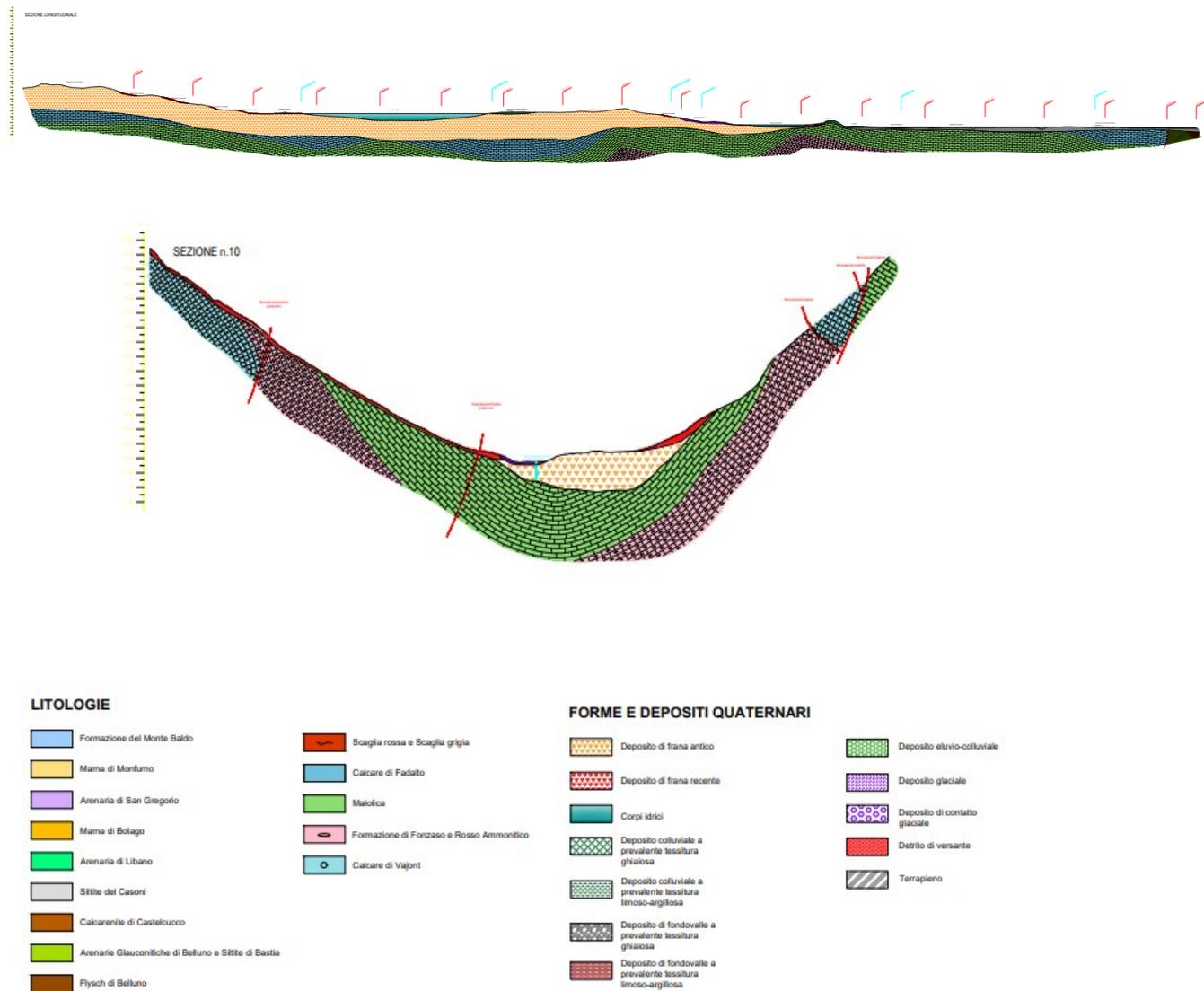


Figura 2-6: Sezione longitudinale e sezione trasversale n.10 con legenda (Nuova AGEPI).

2.2.3 Successioni stratigrafiche

Per quanto riguarda la stratigrafia dell'area, si è fatto riferimento alle note illustrative del foglio CARG n. 63 "Belluno" (Costa et al., 1992) e della Carta Geologica della Provincia di Treviso (Bondesan et al., 2009).

Le formazioni geologiche affioranti in Val Lapisina sono di seguito riportate in ordine cronologico crescente, distinguendo le successioni mesozoica e terziaria, e brevemente descritte.

SUCCESSIONE MESOZOICA

- Calcarea del Vajont (Calloviano - Bajociano): calcareniti oolitiche color grigio o nocciola, massicce o stratificate in banchi metrici, con intercalazioni decimetriche di micriti bacinali scure. Localmente sono riconoscibili laminazioni parallele e incrociate. Sono frequenti livelli di breccie intraformazionali alla base dei banchi (Costa et al., 1992). Nell'area di studio affiora in destra idrografica sul massiccio del Col Visentin e rappresenta il termine più antico affiorante dell'omonima piega anticlinale.
- Formazione di Fonzaso e Rosso Ammonitico Veronese (Titoniano p.p. - Oxfordiano): la Formazione di Fonzaso è costituita da calcari fini selciferi varicolori (rossi, bruni, verdastri), con stratificazione decimetrica piano-parallela e interstrati argillosi verdastri. Sono presenti intercalazioni calcarenitiche e calciruditiche a bioclasti e intraclasti, talora silicizzate, con spessore da centimetrico a metrico (Bondesan et al., 2009). Il Rosso Ammonitico Veronese è costituito da calcari micritici nodulari di colore grigiastro; corrisponde al membro superiore dell'omonima formazione della Piattaforma di Trento (Bondesan et al., 2009). Queste due formazioni si riscontrano anch'esse sul versante del Col Visentin, sia a monte che a valle del Calcarea del Vajont, e inoltre anche in sinistra orografica, nei pressi di San Floriano.
- Maiolica (Cretacico inf. p.p. – Titoniano): calcari micritici di colore biancastro o grigio, in strati decimetrici e con presenza di noduli di selce. Sono comuni intercalazioni di ordine decimetrico, talvolta metrico, di calcareniti bioclastiche con gradazione diretta e laminazione trattiva (torbiditi; Bondesan et al., 2009). Nell'area di studio affiora in adiacenza alle precedenti litologie descritte e nel fondovalle, dove può risultare celato dal più o meno potente materasso detritico.
- Calcarea del Fadalto (Cretacico sup. p.p. – Albiano): calcareniti grossolane e calciruditi (rudstone e grainstone) prevalentemente a frammenti di rudiste di colore biancastro. La stratificazione risulta metrica o decimetrica, con laminazione piano parallela o incrociata raramente visibile. Presenti, ma subordinate, intercalazioni di calcari micritici in strati decimetrici (Bondesan et al., 2009). Nell'area di studio affiora in destra idrografica solo nella parte più settentrionale della valle, mentre si ritrova spesso lungo la sinistra idrografica, costituendo la litologia predominante della dorsale del Monte Pizzoc e del Monte Millifret (massiccio del Cansiglio).
- Scaglia Rossa e Scaglia Grigia (Maastrichtiano p.p. – Campaniano sup.): calcari micritici marnosi e marne grigie, giallastre per alterazione o di colore rosa, con presenza mai abbondante di selce grigio-rossastra, in strati da centimetrici a decimetrici. Presenta intercalazioni centimetriche-decimetriche di calcareniti fini bioclastiche laminate

(torbiditi; Bondesan et al., 2009). Nell'area di studio risulta affiorante in sinistra idrografica nei pressi della sorgente di Valscura-Maren e sul versante poco a valle del Lago di Negrisiola, mentre in destra idrografica si riscontra a monte del Lago Morto.

SUCCESSIONE TERZIARIA

- *Flysch di Belluno* (Eocene p.p.): brecce ad elementi carbonatici con spessori di ordine metrico, dati da calcareniti bioclastiche (grainstone) con abbondante presenza di nummuliti, di colore biancastro-nocciola in banchi decametrici a gradazione diretta. La tipica facies di flysch di quest'unità (alternanza ritmica di livelli terrigeni e marnosi) è assente in quest'area (Bondesan et al., 2009). L'unico affioramento nell'area studio si trova presso la sorgente Valscura-Maren, in quanto questa formazione risulta quasi del tutto cancellata dal sistema di faglie della Linea Bassano-Vittorio Veneto (Lucchetta, 2023).
- *Arenaria Glauconitica di Belluno e Siltite di Bastia* (Aquitaniense p.p. – Cattiano p.p.): unità basali della successione molassica terziaria (Costa et al., 1992), costituite da arenarie da medie a grossolane, brune o verdastre per presenza di abbondante glauconite, spesso con fossili, prevalentemente molluschi, e molto bioturbate, massive. Seguono siltiti e marne glauconitiche bruno-verdastre, massive per bioturbazione diffusa (Bondesan et al., 2009). Nell'area studio affiorano in sinistra idrografica, nei pressi della sorgente di Valscura-Maren e sul versante a valle del Lago di Negrisiola.
- *Calcarenite di Castelcuoco* (Aquitaniense p.p.): calcareniti bioclastiche arenacee grigio-giallastre ed areniti ibride brune con presenza di glauconite, con abbondanti bivalvi, echinodermi, macroforaminiferi, in strati da decimetrici a metrici, e banchi metrici biancastri a rodoliti centimetriche nella parte alta, intercalati a siltiti ed areniti mal cementate scure (Bondesan et al., 2009). Affiora quasi ininterrottamente in sinistra idrografica, da Valscura a Serravalle, adiacente alle altre unità della successione terziaria.
- *Siltite dei Casoni* (Aquitaniense p.p.): siltiti grigio-bluastre massive, bioturbate, con intercalazioni di areniti fini, marnose verso l'alto (Bondesan et al., 2009). Affiora in adiacenza all'unità precedente.
- *Arenaria di Libano* (Burdigaliano p.p. – Aquitaniense p.p.): areniti glauconitiche, a prevalente grana media, verdastre, con sparsi fossili, prevalentemente bivalvi, massive e con stratificazione metrica indistinta (Bondesan et al., 2009). Affiorano anch'esse

in adiacenza alle unità precedenti, anche se in maniera più discontinua (Costa et al., 1992).

- Marna di Bolago (Burdigaliano p.p.): marne e marne siltose scure, grigie, massive per bioturbazione, con rare intercalazioni siltose o arenacee fini (Bondesan et al., 2009). Affiorano ad est di Valscura alla testata della valle del Rio Pradal (Costa et al., 1992) e ad ovest di Serravalle.
- Arenaria di San Gregorio (Burdigaliano sup.): arenarie fini e medie, con grado di cementazione variabile, grigie o brunastre, bioturbate, con scarsi fossili e scarsa glauconite (Bondesan et al., 2009). Affiorano con buona continuità sul versante settentrionale della Costa di Serravalle e sul Monte Baldo ad ovest di Serravalle.
- Marna di Monfumo (Langhiano p.p.): corpo sottile ma continuo di marne scure, bluastre, massive, con alla base un banco di areniti glauconitiche. Si trovano adiacenti all'unità precedente, con contatto netto per superficie erosiva (Bondesan et al., 2009).
- Formazione del Monte Baldo (Serravalliano p.p. – Langhiano p.p.): costituita alla base da arenarie fini bioturbate con glauconite, a cui seguono areniti ibride e calcareniti fini grigio chiare in banchi plurimetri, di aspetto massiccio, con intercalazioni marnose (Costa et al., 1992). Questa formazione costituisce l'ossatura della Costa di Serravalle e del Monte Baldo.
- Marna di Tarzo (Tortoniano p.p. – Serravalliano p.p.): Marne e marne argillose bluastre, giallastre per alterazione, con intercalazioni di areniti litiche nella parte alta (Bondesan et al., 2009). Quest'unità costituisce la fascia collinare compresa fra la Costa di Serravalle e la Costa di Fregona (Costa et al., 1992).

2.3 Inquadramento geomorfologico

La genesi della Val Lapisina è fortemente legata alle strutture tettoniche mesozoiche e cenozoiche connesse con l'orogenesi alpina. In particolare, la valle si è impostata sul solco strutturale della Linea Longhere-Fadalto-Cadola che ha rappresentato una via preferenziale per il flusso glaciale durante le fasi di glaciazione (Busoni & Bondesan, 2019). La Val Lapisina presenta una classica sezione ad U, testimonianza del fondamentale contributo dell'azione glaciale nella sua modellazione. Essa è stata infatti scavata e modellata da un braccio del ghiacciaio del Fiume Piave che durante l'ultimo massimo glaciale (Last Glacial Maximum o LGM, circa 20,000 anni fa) la percorreva interamente prima del suo sbocco in pianura attraverso la stretta di Serravalle (Pellegrini, 2018). I tre laghi della valle occupano altrettante

depressioni, poste a quote differenti, che sono state interpretate come possibili conche di sovraescavazione glaciale. Gli altri principali agenti morfologici della valle sono stati i fenomeni fluviali e gravitativi che hanno agito nel Pleistocene superiore e nell'Olocene (Busoni & Bondesan, 2019). La modellazione glaciale, gravitativa e fluviale ha determinato nel fondovalle un caratteristico andamento a gradoni, con una serie di successive conche, oggi riempite dai laghi, pianori e soglie rocciose, come è ben evidenziato nella sezione longitudinale della valle (Par. 2.2.2). Per la particolare situazione strutturale e per la prolungata erosione glaciale, i fianchi della valle si presentano molto ripidi, spesso subverticali, con dislivelli tra fondovalle e creste superiori a mille metri. A seguito del ritiro del ghiacciaio, non più presente in Val Lapisina già prima di 16,000 anni fa (Pellegrini, 2018), si verificò nella valle un alto numero di fenomeni franosi di grandi dimensioni, dovuti allo scarico delle pressioni del ghiaccio sui versanti. Le pareti rocciose, infatti, non più sorrette dalla contropinta della massa di ghiaccio, risentirono fortemente di tale rilascio tensionale, dando origine a numerosi crolli di rocce e detriti (Busoni & Bondesan, 2019). Le frane più importanti che dal periodo post-glaciale fino ad oggi hanno contribuito a modellare il profilo della Val Lapisina sono tre, note in letteratura con i nomi di Frana del Fadalto, Frana di Nove e Frana di Forcal (Figura 2-7). Procedendo da nord verso sud, la prima di queste è la più grande per dimensioni e quella che ha portato le maggiori conseguenze dal punto di vista geomorfologico. Il deposito che costituisce la Frana del Fadalto è il risultato di più eventi franosi che hanno interessato il versante orientale della valle dopo l'arretramento del ghiacciaio. I ripetuti crolli dalla scarpata, costituita da rocce appartenenti al Calcere del Fadalto, formarono nel periodo post-glaciale un imponente accumulo nel fondovalle che sbarrò il corso del Piave dando origine al Lago di Santa Croce e deviando il fiume verso il Vallone Bellunese dove tutt'oggi scorre (Pellegrini, 2018). Quello che è oggi il valico della Sella di Fadalto, è stato formato dal grande deposito della Frana del Fadalto. Il corpo di frana presenta una forma complessa, in parte modificata dalle attività estrattive presenti nell'area, caratterizzata da dossi e depressioni che risalgono in parte anche il versante opposto al distacco. Secondo gli studi di Pellegrini (2018), la frana occupa un'area di circa 3.5 km² per un volume di materiale di circa 120-135 milioni di metri cubi. Il coronamento si snoda per quasi 5 km lungo il versante del Monte Millifret, seguendo un andamento semilunato.

La seconda importante frana della Val Lapisina è la Frana di Nove, che si posiziona al centro della valle, fra il Lago Morto e il Lago del Restello, e che ha interessato il versante occidentale, quello del Col Visentin. Questo versante è impostato sull'omonima anticlinale, con strati a franapoggio molto ripidi, sub-verticali nella parte centrale del versante. Anche la Frana di

Nove è costituita da una serie di eventi successivi verificatisi a seguito dell'arretramento del ghiacciaio del Piave. In particolare, si tratta di crolli avvenuti dalla parete rocciosa calcarea, molto fratturata, che hanno determinato la formazione di un corpo di frana allungato lungo la direzione della valle per circa 1.7 km, risalendo in parte anche il versante opposto. Questo deposito ha creato lo sbarramento naturale che ha originato il Lago Morto, e costituisce oggi il Pian dei Nove.

La terza frana di grandi dimensioni in Val Lapisina è la Frana di Forcal, posta quasi all'imboccatura della valle. Anch'essa ha interessato il versante occidentale, lungo la dorsale del Monte Cor. Si tratta di una frana ormai relitta, avvenuta in episodi distinti. Il primo movimento è databile al periodo post-glaciale, coevo agli altri fenomeni franosi dovuti al ritiro del ghiacciaio del Piave, mentre in epoca storica si hanno notizie di una riattivazione nel 1521, evento riportato dalle cronache dell'epoca. Il coronamento è rintracciabile a una quota compresa fra 850 e 900 m s.l.m. Il fronte della frana, in località Savassa, si allunga per circa 900 m nella direzione della valle (Della Libera, 2004).

Successivamente alla fusione delle masse glaciali si è instaurata un'intensa attività di sedimentazione nella porzione terminale della valle, in particolare a sud della località di San Floriano, con deposizione di sedimenti grossolani da parte delle acque fluvioglaciali dotate di elevata energia. All'esaurirsi delle ingenti portate legate alla fusione delle masse glaciali, è subentrata l'attività fluviale da parte del Fiume Meschio e di altri corsi d'acqua minori, che ha ricoperto i potenti depositi fluvioglaciali con spessori modesti a granulometria più fine, spesso derivati dall'erosione dei rilievi posti nelle immediate vicinanze. In alcune porzioni della valle si può riscontrare la presenza di depositi morenici, spesso però ricoperti o poco distinguibili dai depositi di frana, di versante o di origine fluvioglaciale e alluvionale (Busoni & Bondesan, 2019).

I depositi quaternari che interessano la valle possono essere schematizzati nel modo seguente (Nuova AGEPI, 2023):

- *Conglomerati interglaciali (Riss-Würm)*, rappresentano i sedimenti pleistocenici più antichi ed affioranti nella porzione di territorio tra Santa Giustina e San Floriano, in modesti lembi localizzati al piede del versante orientale e nei pressi del viadotto ferroviario. Si tratta di conglomerati fluvioglaciali grossolani, costituiti da ghiaie e ciottoli fortemente eterometrici cementati e con frequenti piccoli vuoti. La matrice è sabbiosa ed in genere scarsamente presente.
- *Falde detritiche stratificate e cementate (breccie periglaciali; Würm)*, situate esclusivamente sul versante meridionale del Col Visentin, nella zona di Fais. Consistono in strati di 30-

70 cm di ghiaie e ciottoli calcarei, spigolosi, variamente cementati e con matrice sabbiosa di colore giallastro, intercalati a livelli meno cementati e con abbondante matrice sabbioso-limosa giallo-rossastra.

- *Depositi lacustri o palustri argilloso-torbosi (Tardo Würm)*, occupano il fondovalle pianeggiante che va dalla soglia calcarenitica di Serravalle sino alla bassa conoide ghiaiosa del Fiume Meschio in località Savassa Bassa. I sedimenti presenti sono caratterizzati da granulometria che varia dal limo all'argilla in proporzioni variabili, con sabbia fine limosa e con punti maggiormente torbosi. Localmente nei termini argillosi si possono rinvenire livelli ghiaiosi.
- *Coperture detritiche ghiaioso-sabbiose di fondovalle, a materiale calcareo e loro conoidi (Olocene attuale)*, si tratta di alluvioni ghiaioso-sabbiose recenti, rinvenibili nel fondovalle tra le località di Savassa Alta e San Floriano. Le ghiaie sono generalmente costituite da elementi prismatici a spigoli poco arrotondati. Nelle porzioni superficiali sono immerse in un'abbondante matrice terrosa e lateralmente sono mescolate al detrito di versante.
- *Accumuli di frana (Tardo Würm - attuale)*, sono rappresentati dai depositi delle grandi frante tardo würmiane di Fadalto, Nove e Forcal e di alcune più recenti e minori quali Scarpedal, Valscura e Costa. Consistono in accumuli caotici ed eterogenei a granulometria variabile dalla sabbia alla ghiaia, ai ciottoli ed ai massi di notevoli dimensioni.
- *Coperture detritiche e conoidi a materiale calcareo (Olocene recente – attuale)*, ampiamente estese sui versanti della Val Lapisina e in Valscura in forma di falde e conoidi di detrito. Si presentano come caratteristici ghiaioni ricoperti e consolidati da una vegetazione arborea ed arbustiva. Litologicamente sono costituiti da detriti calcarei grossolani e spigolosi (ghiaie e ciottoli con sabbia e qualche grosso blocco) provenienti dalle prossime pareti rocciose degradate ad opera di processi di crioclastismo ed erosione.
- *Riparti e riempimenti antropici*, sono rappresentati dalle terre e rocce da scavo provenienti ad esempio dalla realizzazione delle gallerie o dei cantieri entro la centrale ENEL ed i riempimenti anche parziali di cave abbandonate (Nove, Forcal-Longhere).

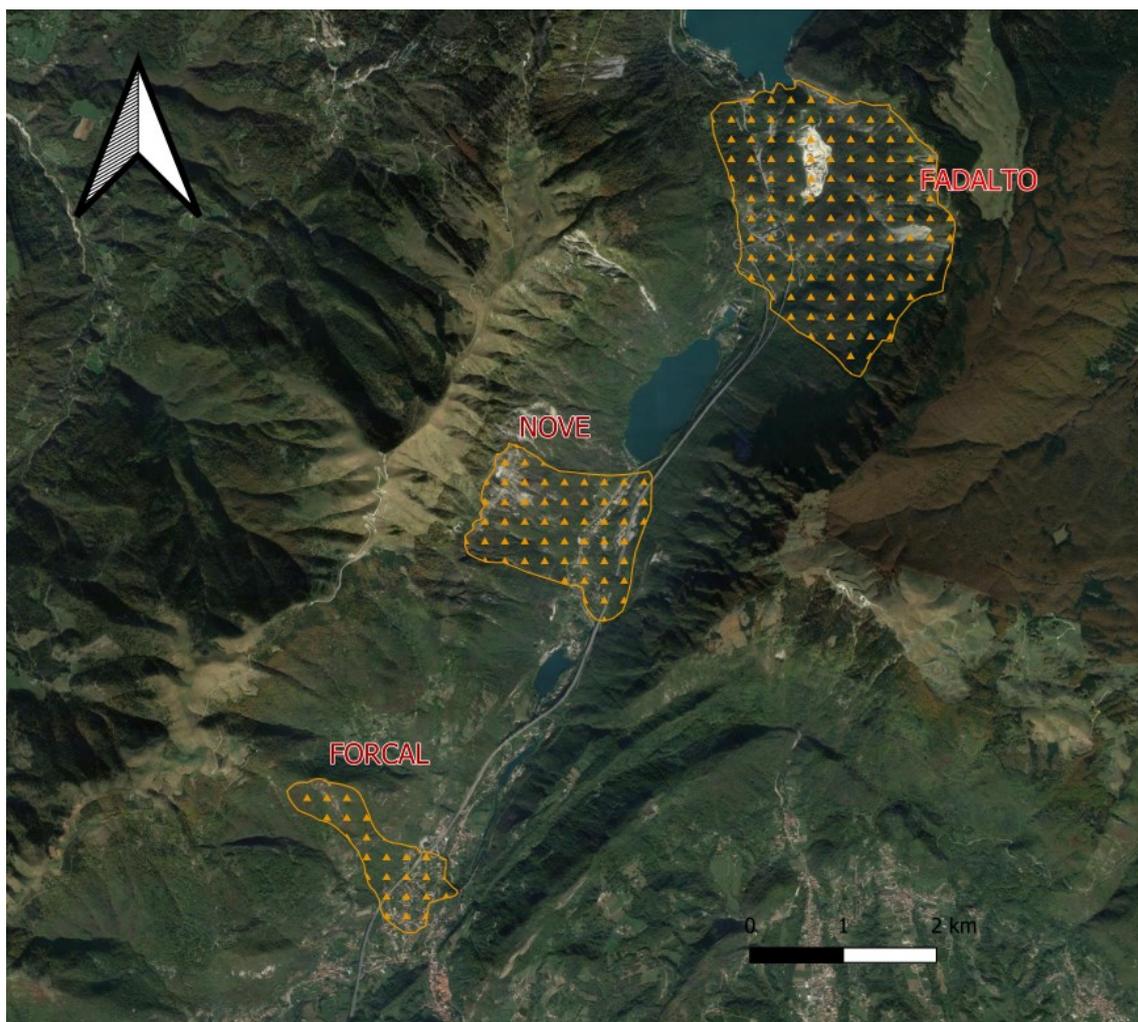


Figura 2-7: Rappresentazione e ubicazione delle tre principali frane post-glaciali in Val Lapisina.

2.4 Inquadramento idrogeologico

La Val Lapisina, dal punto di vista idrogeologico, presenta due domini distinti: il primo è costituito dalle formazioni rocciose affioranti lungo i fianchi della valle, che si estendono oltre gli spartiacque idrografici; il secondo è formato dai depositi inconsolidati di origine alluvionale, fluvio-glaciale, glaciale e gravitativa che costituiscono il fondovalle. Le formazioni rocciose consistono in ammassi rocciosi fratturati, dove le acque sotterranee scorrono entro la rete di fratture o in alcuni casi cavità carsiche, che conferiscono loro una porosità secondaria. La complessità delle strutture tettoniche della valle ha generato un sistema di faglie, fratture e pieghe locali che probabilmente controlla e orienta i flussi idrici sotterranei, mentre la natura calcarea delle formazioni rocciose ha dato luogo a fenomeni di dissoluzione carsica.

I depositi inconsolidati di fondovalle, a porosità primaria, ospitano un acquifero freatico, alimentato dalle precipitazioni e dalle acque superficiali dei laghi che caratterizzano il fondovalle. Lungo l'asse vallivo si trovano infatti tre specchi d'acqua, tutti sfruttati per la produzione di energia elettrica per mezzo degli impianti di proprietà di ENEL S.p.A., con oscillazioni del livello idrometrico legate al loro utilizzo. Da nord a sud, essi sono: il Lago Morto (274 m s.l.m.), il Lago del Restello (177 m s.l.m.) e il Lago di Negrisiola (160 m s.l.m.). Il primo e l'ultimo sono di origine naturale, mentre il secondo è un invaso artificiale. Il Lago Morto è alimentato dagli afflussi idroelettrici e da infiltrazioni provenienti dal Lago di Santa Croce (posto più in alto di 160 m), dalle sorgenti carsiche situate in destra idrografica, sul versante del Col Visentin, e probabilmente anche dal versante del Cansiglio, in sinistra idrografica. Il deflusso del lago avviene per filtrazione attraverso lo sbarramento naturale formato da depositi di frana, morenici e alluvionali. Il Lago Morto ha una capacità di circa 20 milioni di m³, una superficie di 0.75 km², lunghezza di 1,700 m, larghezza massima di 650 m e profondità di 55 m. Il Lago del Restello è un bacino artificiale creato dallo sbarramento della stretta rocciosa di San Floriano, sfruttando la depressione di un antico lago bonificato. Esso è alimentato dagli scarichi della Centrale di Nove e dall'emergenza delle acque sotterranee nelle zone di Botteon e Lagusel. Queste acque vengono successivamente convogliate alla Centrale di San Floriano e poi nel Lago di Negrisiola, che riceve anche le acque provenienti dalla sorgente del Meschio. Da quest'ultimo, parte una derivazione che alimenta le centrali idroelettriche di Caneva e Castelletto, mentre solo pochi m³/s defluiscono nel Fiume Meschio, che attraversa Serravalle e arriva alla pianura alluvionale di Vittorio Veneto.

Sul versante in destra idrografica, ad eccezione del Meschio, non vi sono affluenti perenni; le vallecole laterali sono molto ripide e portano acqua solo durante forti piogge. Il versante sinistro ospita invece i corsi perenni del Rio Valscura e del Rio Pradal, che presentano portate ridotte. L'assenza o esiguità dei deflussi superficiali nella valle è legata alla litologia grossolana del fondovalle e ai fenomeni carsici che caratterizzano le dorali montuose circostanti, benché il versante orientale non mostri evidenti segni di carsismo epigeo.

Il potente accumulo di materiali detritici grossolani nel fondovalle, sommato alla presenza di laghi che si susseguono lungo l'asse vallivo a quote differenti, favorisce l'esistenza di un acquifero freatico entro i depositi inconsolidati al tetto del bedrock (Dal Prà & Della Libera, 1993). Questo sistema idrico è alimentato dall'infiltrazione delle acque di precipitazione e dalle dispersioni dei laghi, a partire dal Lago di Santa Croce fino alla stretta di Serravalle. Le

sorgenti sul fianco occidentale del Col Visentin si infiltrano nei ghiaioni ai piedi del versante e alimentano l'acquifero. Anche il versante orientale sembra contribuire attraverso sorgenti carsiche coperte da detriti e quindi non facilmente visibili (Dal Prà & Della Libera, 1993). La soggiacenza delle acque sotterranee varia a seconda delle condizioni topografiche, caratterizzate da una morfologia a gradoni impostati sugli accumuli detritici delle antiche frane post-glaciali. Nei punti maggiormente depressi e nelle aree di rottura del pendio le acque sotterranee emergono spontaneamente dal sottosuolo dando origine a zone di risorgiva (Lagusel e Belvedere).

La circolazione idrica sotterranea entro gli ammassi rocciosi fratturati che costituiscono i fianchi della valle alimenta una serie di sorgenti che emergono lungo i fianchi della valle in corrispondenza del contatto tra le formazioni rocciose ed i depositi inconsolidati. Le principali sorgenti sono quelle di Negrisiola, Forcal e Meschio, che si trovano ai piedi del Col Visentin, con le zone di alimentazione da individuare probabilmente lungo lo stesso gruppo montuoso, anche da aree appartenenti al versante settentrionale e veicolate molto rapidamente verso i recapiti di valle dalle strutture tettoniche. Sebbene manchino evidenze di carsismo epigeo sul versante orientale, il sistema carsico sotterraneo sembra essere molto attivo, permettendo una rapida circolazione delle acque verso valle.

3 Monitoraggio idrogeologico

Il monitoraggio idrogeologico della Val Lapisina ha previsto l'acquisizione di dati forniti da enti esterni come ENEL S.p.A. per quanto riguarda il livello idrometrico dei laghi e Piave Servizi S.p.A. per la misura in continuo delle portate sulla sua rete di distribuzione a scopo idropotabile. In aggiunta a ciò, è stato allestito un sistema di monitoraggio che ha riguardato l'acquifero freatico di fondovalle, con l'installazione di sonde di livello (L) e temperatura delle acque sotterranee (T).

Di seguito verranno illustrati singolarmente tutti i dati reperiti o desunti dalla rete di monitoraggio installata, per il periodo compreso tra il 12 aprile 2023 e il 4 luglio 2024, utili alla implementazione di un modello numerico dell'acquifero freatico di fondovalle.

3.1 Livello idrometrico dei laghi

Su specifica richiesta di Piave Servizi, Enel Produzione S.p.A. (nel seguito ENEL), ha fornito i dati orari relativi al livello idrometrico, espresso in m s.l.m., dei bacini di Negrisiola, Restello e Lago Morto per il periodo compreso dal 01/04/2023 al 30/06/2024. Questi dati sono

risultati fondamentali per comprendere le variazioni di carico idraulico registrate dalla rete di monitoraggio in continuo nei piezometri di fondovalle, in quanto strettamente legate alle variazioni del livello dei laghi.

I dati sono di seguito presentati in forma grafica (Figura 3-1). Come si può vedere, il Lago Morto è quello che presenta le variazioni di livello idrometrico più significative, con oscillazioni a periodicità variabile nell'arco di una giornata che possono raggiungere 1 o 2 m e che sono legate all'attività idroelettrica. Vanno segnalati i periodi 18-21/04/2023 e 07-16/02/2024 in cui il lago è stato mantenuto costantemente ad un livello di circa 271.5 m s.l.m., inferiore al livello medio. Anche il Lago del Restello durante il periodo di monitoraggio presenta una variabilità non trascurabile, con oscillazioni che però avvengono nell'arco di diversi giorni. Viceversa, il Lago di Negrisiola è mantenuto quasi sempre ad un livello idrometrico di poco superiore a 161 m s.l.m. Il livello idrometrico medio nel periodo compreso tra il 01/05/2023 ed il 31/05/2024, utilizzato come riferimento per le simulazioni numeriche, risulta pari a 274.33 m s.l.m. per il Lago Morto, 178.15 m s.l.m. per il Lago del Restello e 161.12 m s.l.m. per quello di Negrisiola.

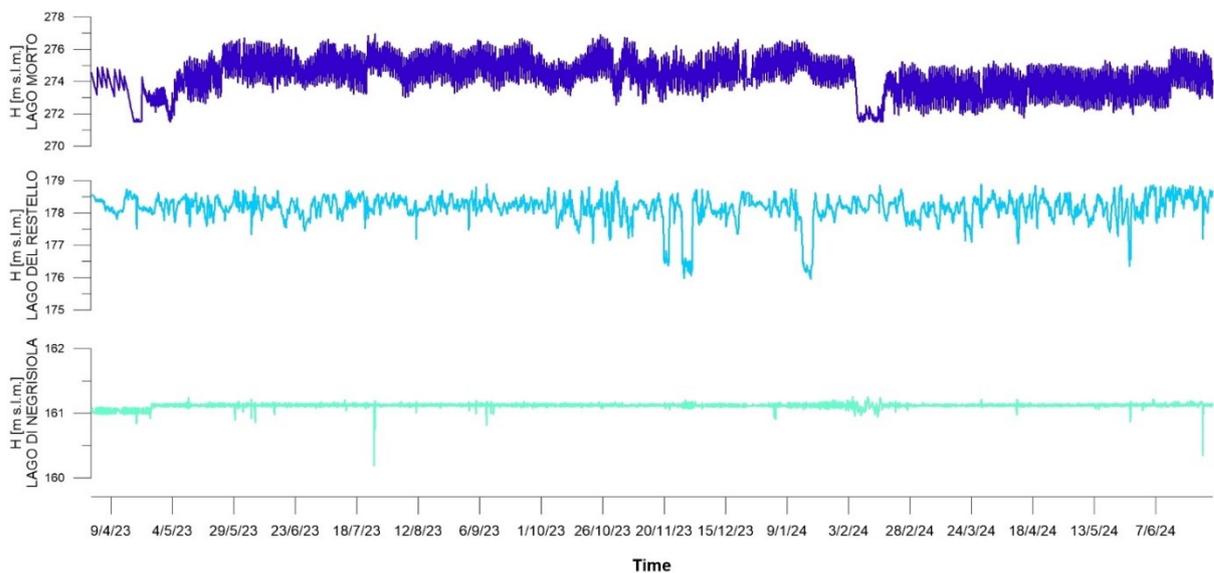


Figura 3-1: Andamento del livello idrometrico dei laghi Morto (linea blu), Restello (linea azzurra) e Negrisiola (linea turchese) per il periodo dal 01/04/2023 al 30/06/2024.

3.2 Carico idraulico nei piezometri

Per la ricostruzione del regime idrogeologico dell'acquifero freatico di fondovalle è stata realizzata una rete per il monitoraggio in continuo del carico idraulico su tutti i piezometri disponibili sul fondovalle della Val Lapisina. Nel dettaglio i punti di monitoraggio sono

costituiti da: una vasca di raccolta delle acque sotterranee ubicata in prossimità della captazione della sorgente Forcal (VsF), un piezometro alla base del versante che sovrasta le captazioni delle sorgenti di Negrisiola (PzN), un piezometro realizzato nel campo pozzi di Lagusel (PzL), due piezometri (Pz1 e Pz2) ubicati in località Pian dei Nove ed un piezometro ubicato in corrispondenza del campo pozzi di Borgo Piccin (PzBP). L'ubicazione dei punti di monitoraggio è visualizzabile in Figura 3-2, mentre in Tabella 3-1 sono riassunte le caratteristiche dei punti di monitoraggio.

L'acquisizione dei dati è avvenuta con cadenza oraria nel periodo compreso tra il 12 aprile 2023 ed il 6 giugno 2024 per un totale di 422 giorni. Il monitoraggio presso la vasca Forcal è stato interrotto il 29/02/2024 a seguito dello spostamento del sensore nel piezometro Negrisiola. In realtà presso la vasca Forcal il monitoraggio sarebbe dovuto proseguire, ma il nuovo sensore è caduto sul fondo della vasca e non è stato possibile recuperarlo. Il monitoraggio presso il piezometro Negrisiola è tutt'ora in corso, anche se il 06/06/2024 è avvenuta una ulteriore sostituzione di strumentazione.

I sensori installati nei piezometri sono dei datalogger modello TD-DIVER della Van Essen Instruments (Tabella 3-2). Questi strumenti registrano la pressione totale (P_{tot} in m) e la temperatura dell'acqua (T in °C) in corrispondenza della profondità di installazione. Il calcolo del carico idraulico (H in m s.l.m.) avviene in due fasi: la prima fase prevede il calcolo della colonna d'acqua che sovrasta lo strumento (WC in m), sottraendo a P_{tot} i valori di pressione atmosferica (P_{atm} in m), registrati da un datalogger modello BARO-DIVER (Van Essen Instruments; Tabella 3-2), installato presso la captazione della sorgente Forcal, secondo la formula:

$$WC = P_{tot} - P_{atm}$$

e successivamente sommando WC alla differenza tra la quota di un punto di riferimento, in genere il boccaforo del piezometro (Z_{bf} in m s.l.m.), e la lunghezza del cavo con cui lo strumento viene calato all'interno del piezometro (L in m), secondo:

$$H = (Z_{bf} - L) + WC$$

La metodologia prevede la verifica periodica attraverso il rilievo manuale della soggiacenza (S in m) ed il successivo calcolo di H attraverso:

$$H = Z_{bf} - S$$

Nel caso in questione, il monitoraggio è stato accompagnato da 13 sopralluoghi con cadenza circa mensile per lo scarico dei dati, la manutenzione dei sensori e la misura manuale della soggiacenza.

ID	X (m)	Y (m)	Z _{bf} (m s.l.m.)	Prof. (m)	Filtro da (m)	Filtro a (m)	Diametro (")
VsF	1754117	5101027	186	3.60	<<	<<	<<
PzN	1755182	5102444	175	28.65	<<	<<	1.5
PzL	1755925	5103849	205	30.00	6.00	30.00	3
Pz1	1756011	5104258	257	25.18	<<	<<	4
Pz2	1756447	5105263	274	21.14	<<	<<	4
PzBP	1756428	5105555	274	20.54*/29.00**	19.00	20.54*/29.00**	5.9

Tabella 3-1: Caratteristiche dei piezometri dell'acquifero freatico di fondovalle; le coordinate dei punti sono espresse nel sistema di riferimento Gauss Boaga, Roma 1940, Fuso Ovest; * valore misurato in campagna, ** valore riportato nei documenti forniti da Piave Servizi.

Marca/modello	Parametri	Campo di misura	Accuratezza	Risoluzione	Ubicazione
TD-DIVER	Pressione	0 – 20 m	±1.0 cm	0.4 cm	VsF, PzN, PzL, Pz1, Pz2, PzBP, CsB
	Temperatura	- 20 +80 °C	±0.1 °C	0.01 °C	
BARO-DIVER	Pressione	0 – 1.5 m	±0.5 cm	0.1 cm	VsF
	Temperatura	- 20 +80 °C	±0.1 °C	0.01 °C	

Tabella 3-2: Caratteristiche dei sensori utilizzati per monitoraggio in continuo dell'acquifero freatico di fondovalle.

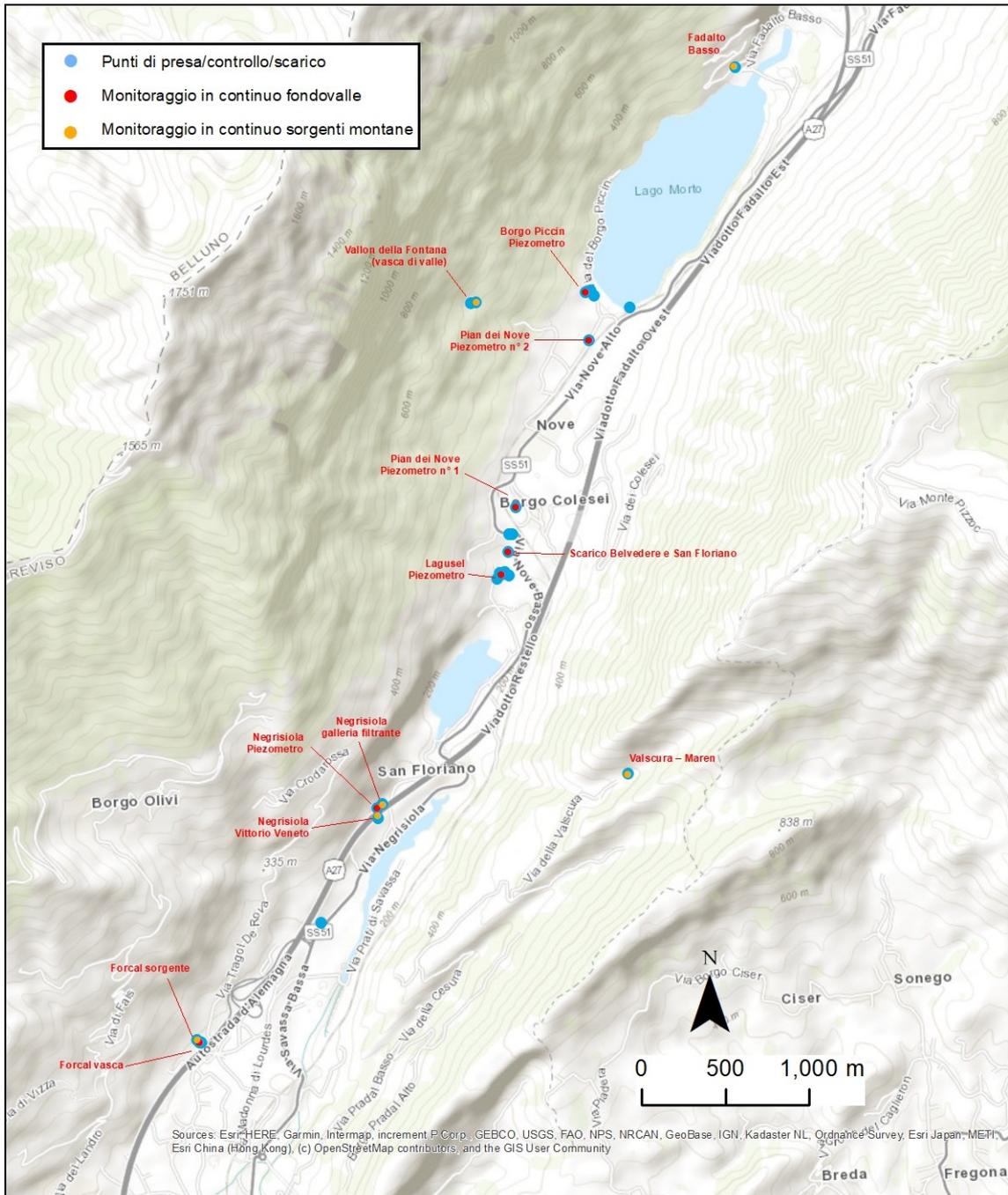


Figura 3-2: Ubicazione dei punti di monitoraggio dell'acquifero freatico di fondovalle e delle sorgenti montane.

3.2.1 Vasca Forcal

La sorgente presso la località di Forcal si trova in un'area presso la quale un tempo era presente un lago il cui bacino è stato colmato da un fenomeno franoso (Figura 3-2 e Figura 3-3; Par. 0). Le acque sgorgano dalla coltre detritica presente al piede del versante montuoso in destra idrografica della valle e sono captate per fini acquedottistici mediante una galleria artificiale di drenaggio posta parallelamente al versante, profonda 2÷3 m e lunga circa 26 m

(Figura 3-4). A Forcal è stato installato un sensore per la misura in continuo di livello e temperatura dell'acqua sotterranea nella vasca di raccolta esterna alla captazione della sorgente, che drena le acque sotterranee.

In Figura 3-5 è riportato l'andamento del carico idraulico registrato in VsF nel periodo compreso tra il 12/04/2023 ed il 29/02/2024, l'andamento della temperatura dell'acqua sotterranea alla profondità di installazione della sonda, vale a dire 3.49 m da p.c., della precipitazione e della temperatura atmosferica orarie registrate presso la stazione ARPAV di Vittorio Veneto. Come anticipato sopra, il 29/02/2024 il monitoraggio si è interrotto perché il sensore è caduto sul fondo della vasca senza possibilità di recupero. Come si può osservare l'andamento del carico idraulico risente delle variazioni del regime pluviometrico dell'area. I valori di carico idraulico massimo, minimo e medio registrati in VsF risultano rispettivamente pari a: 187.30 m s.l.m., 185.74 m s.l.m. e 185.84 m s.l.m., da cui deriva un'escursione di 1.55 m. L'andamento della temperatura evidenzia come il sensore, anche se installato entro la zona di eterotermia, cioè quello spessore di sottosuolo in cui la temperatura dell'acqua sotterranea è influenzata dalle variazioni della temperatura atmosferica, non risente delle variazioni di temperatura esterne. Le variazioni, di pochi gradi, sono quasi sempre associate ad eventi meteorici intensi ed ai conseguenti incrementi del carico idraulico. I valori di temperatura dell'acqua massimo, minimo e medio registrati in VsF durante il periodo di monitoraggio, risultano rispettivamente pari a: 12.26 °C, 8.90 °C e 11.27 °C, da cui un'escursione termica di 3.37°C.



Figura 3-3: L'opera di captazione presso Forcal.

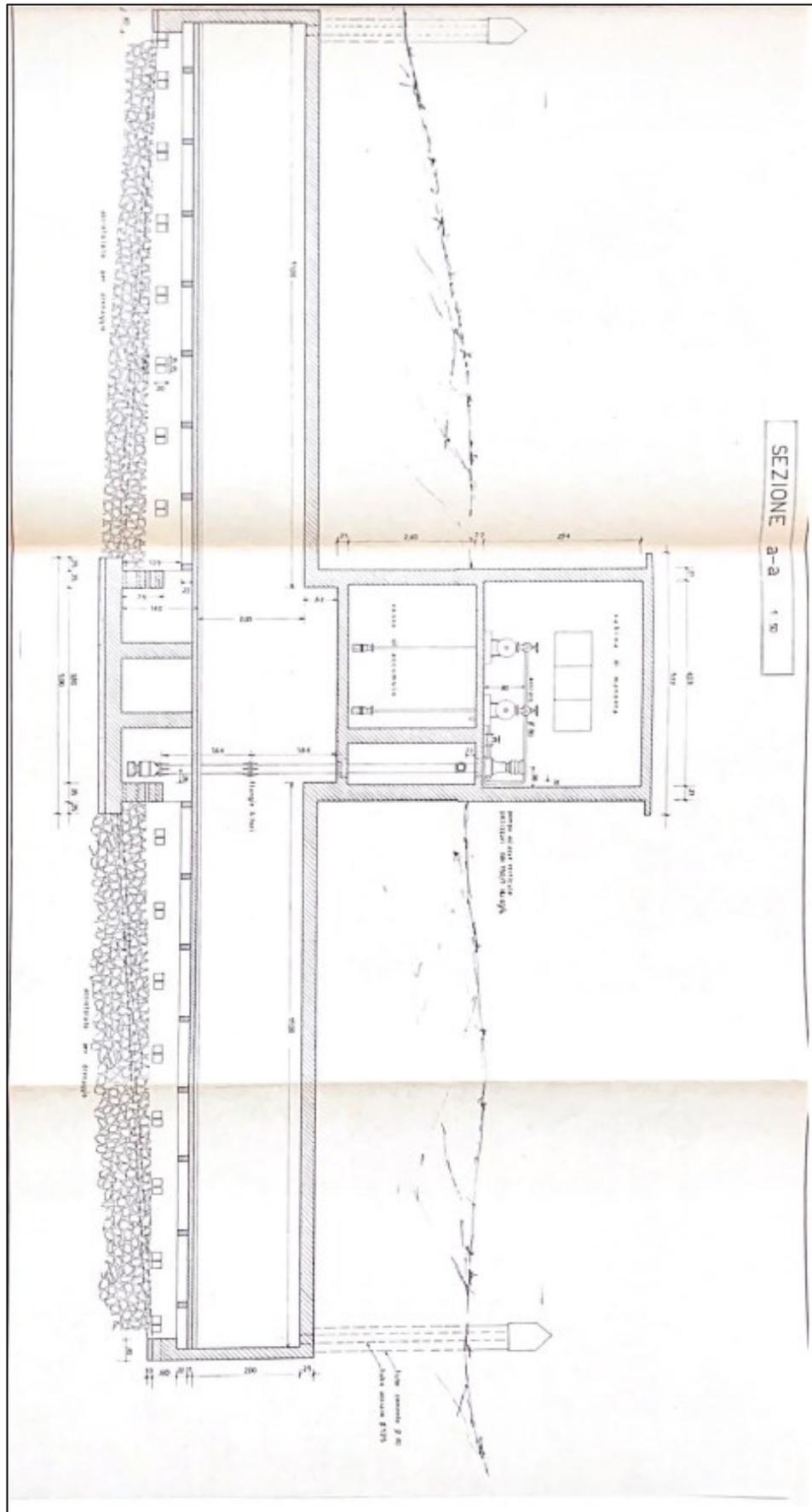


Figura 3-4: Sezione dell'opera di captazione presso Forcal.

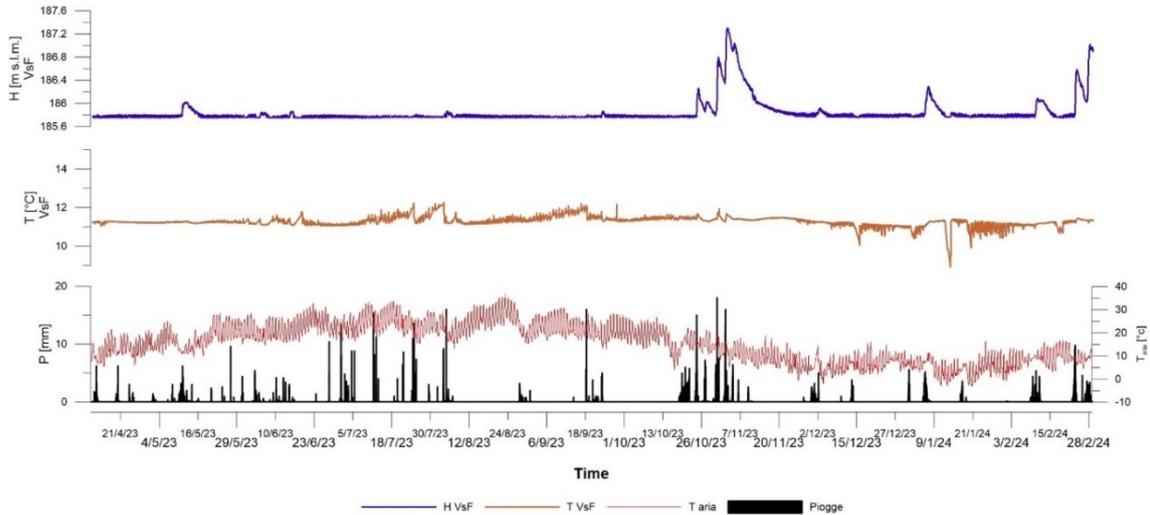


Figura 3-5: Andamento del carico idraulico (H) e della temperatura dell'acqua (T) registrati in VsF, della pioggia (P) e della temperatura dell'aria (T_{aria}) registrate alla stazione di Vittorio Veneto, nel periodo 12/04/2023-29/02/2024.

3.2.2 Negrisiola

Il fronte sorgentizio di Negrisiola rappresenta uno dei punti di captazione più importanti per l'intera rete acquedottistica della valle ed è sfruttato sia dal Comune di Vittorio Veneto che da Piave Servizi attraverso due opere di presa separate consistenti in due gallerie artificiali, parallele al versante, che intercettano il deflusso sotterraneo. In particolare, l'opera di presa posta più a nord, denominata "Galleria Filtrante Negrisiola" (nel seguito Negrisiola Galleria) è risalente al 1958 ed è lunga circa 36 m (Figura 3-6); la struttura drenante posta più a sud si presenta anch'essa come un dreno/galleria addossato al versante e viene denominata "Negrisiola Vittorio Veneto" (nel seguito Negrisiola Vittorio; Figura 3-7). Il fronte sorgivo si sviluppa per circa 200 m e le acque sgorgano dal detrito di falda in modo perenne. Le captazioni sono ubicate al piede del massiccio del Col Visentin sul fianco in destra idrografica della Val Lapisina (Figura 3-2). In particolare, le stesse opere insistono su un terrazzo fluvio-glaciale, immediatamente a ridosso del ripido versante del Col Visentin.

Al nodo di Negrisiola è stato installato un sensore all'interno di un piezometro posizionato sul versante poco a monte delle captazioni (Figura 3-2), per il monitoraggio del carico idraulico e della temperatura delle acque sotterranee.

In Figura 3-8 è riportato l'andamento del carico idraulico registrato in PzN nel periodo compreso tra il 29/02/2024 ed il 06/06/2024, l'andamento della temperatura dell'acqua sotterranea alla profondità di installazione della sonda, vale a dire 19.92 m da p.c., l'andamento della precipitazione e della temperatura dell'aria orarie registrate presso la stazione ARPAV di Vittorio Veneto. Come si può osservare l'andamento del carico idraulico risente delle variazioni del regime pluviometrico dell'area. I valori di carico idraulico

massimo, minimo e medio registrati in PzN risultano rispettivamente pari a: 175.74 m s.l.m., 174.38 m s.l.m. e 174.70 m s.l.m., da cui deriva un'escursione di 1.37 m. L'andamento della temperatura evidenzia come il sensore sia installato presumibilmente al limite della zona di eterotermia, cioè quello spessore di sottosuolo in cui la temperatura dell'acqua sotterranea è influenzata dalle variazioni della temperatura atmosferica; esso quindi oltre a risentire delle variazioni della temperatura esterna registra delle variazioni, di pochi decimi di grado, che sono quasi sempre associate ad eventi meteorici intensi ed ai conseguenti incrementi del carico idraulico. I valori di temperatura dell'acqua massimo, minimo e medio registrati in PzN durante il periodo di monitoraggio, risultano rispettivamente pari a: 11.38 °C, 11.04 °C e 11.15 °C, da cui un'escursione termica di 0.34 °C.



Figura 3-6: L'opera di captazione denominata Galleria Fitrante Negrisiola.



Figura 3-7: L'opera di captazione denominata Negrisola Vittorio Veneto.

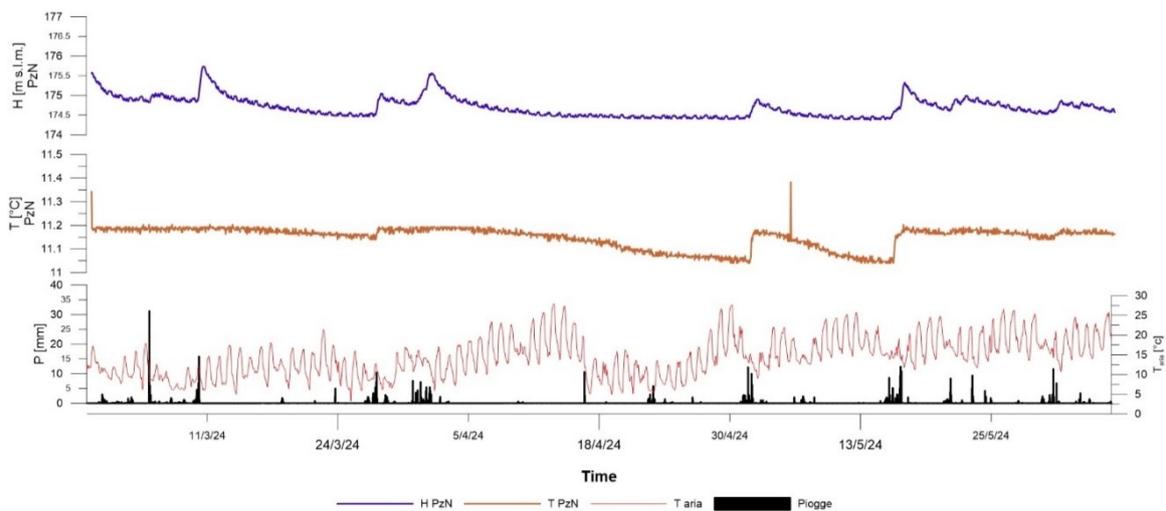


Figura 3-8: Andamento del carico idraulico (H) e della temperatura dell'acqua (T) registrati nel piezometro PzN, della pioggia (P) e della temperatura dell'aria (T_{aria}) registrate alla stazione di Vittorio Veneto, nel periodo 29/02/2024-06/06/2024.

3.2.3 Lagusel

Il piezometro PzL si trova nell'area del campo pozzi di Lagusel (Figura 3-2 e Figura 3-9), tra i pozzi P1, P2, P3 e P4. È stato realizzato tra il 14/02/2023 ed il 20/02/2023 dalla ditta SonGeo S.r.l. attraverso un sondaggio meccanico a rotazione e carotaggio continuo che ha raggiunto la profondità massima di 68 m da p.c., intercettando il substrato roccioso a 65 m di profondità. Si tratta di un piezometro a tubo aperto in PCV, con diametro pari a 3" e filtri compresi tra 6 e 30 m da p.c.

In Figura 3-10 è riportato l'andamento del carico idraulico registrato in PzL, l'andamento della temperatura dell'acqua sotterranea alla profondità di installazione della sonda, vale a dire 15.90 m da p.c., l'andamento del livello idrometrico del Lago Morto, della pioggia e della temperatura dell'aria registrate presso la stazione ARPAV di Vittorio Veneto nel periodo compreso tra il 12/04/2023 ed il 06/06/2024. Come si può osservare l'andamento del carico idraulico risente sia delle variazioni di livello idrometrico del lago, come evidenziato dalle linee tratteggiate poste in corrispondenza dei due periodi in cui il livello è stato mantenuto al di sotto del valore medio (Par. 0), sia del regime pluviometrico dell'area. I valori di carico idraulico massimo, minimo e medio registrati in PzL risultano rispettivamente pari a: 206.04 m s.l.m., 204.09 m s.l.m. e 205.28 m s.l.m., da cui deriva un'escursione di 1.95 m. L'andamento della temperatura evidenzia come il sensore sia installato entro la zona di eterotermia. In località Lagusel a circa 16 m di profondità, però, queste variazioni non risultano sincrone al regime termometrico dell'atmosfera ma sono traslate di circa 6 mesi. Il valore minimo della temperatura (9.28 °C), infatti, si registra tra il 04/07/2023 ed il 05/07/2023, mentre il massimo (12.60 °C) tra il 14/12/2023 ed il 23/12/2023. La temperatura media durante il periodo di monitoraggio risulta pari a 10.75 °C, mentre l'escursione termica è di 3.33 °C.



Figura 3-9: Il campo pozzi di Lagusel ripreso da drone: in rosso l'ubicazione dei pozzi con il numero di riferimento; in azzurro l'ubicazione di PzL (foto: Nuova AGEPI).

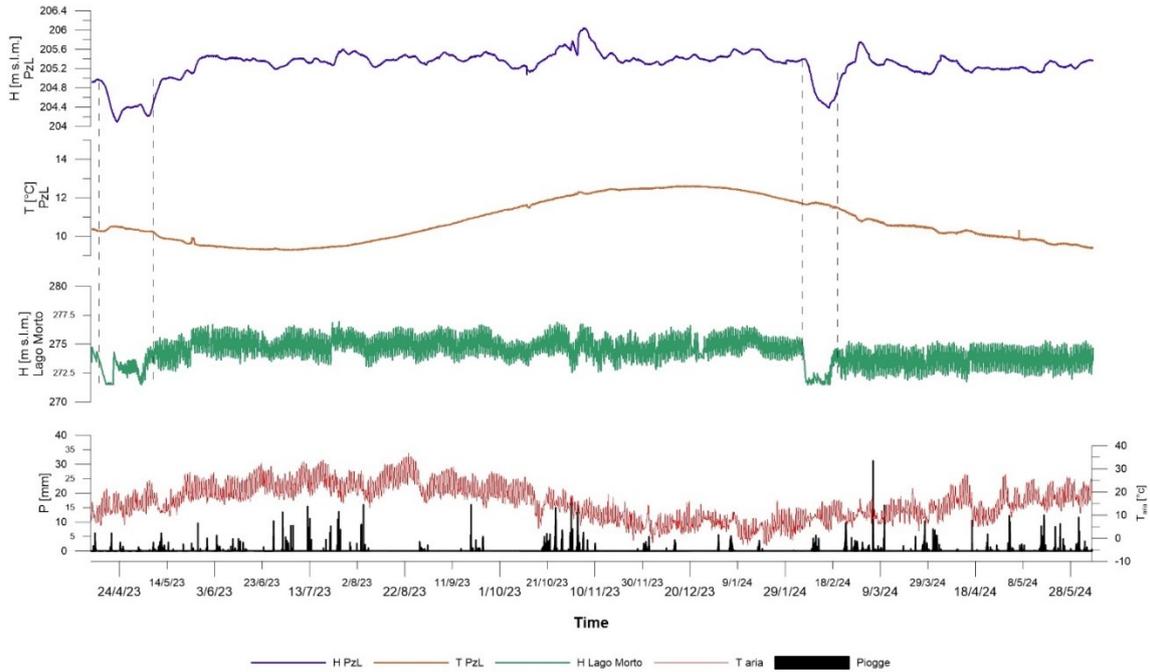


Figura 3-10: . Andamento del carico idraulico (H) e della temperatura dell'acqua (T) registrati nel piezometro PzL, del livello idrometrico del Lago Morto (L), della pioggia (P) e della temperatura dell'aria (T_{aria}) registrate alla stazione di Vittorio Veneto, nel periodo 12/04/2023-06/06/2024.

3.2.4 Pian dei Nove

Presso il Pian dei Nove, all'interno di due piezometri perforati in occasione di un episodio di inquinamento da terbutilazina avvenuto in Val Lapisina nel 1992 (Dal Prà & Della Libera, 1993) che ha interessato anche le captazioni in esame, sono stati installati i sensori per il monitoraggio in continuo del carico idraulico e della temperatura delle acque sotterranee. Di seguito vengono presentati e brevemente commentati i risultati ottenuti.

3.2.4.1 Piezometro Pz1

Il Pz1 è posizionato in Località Borgo Colesei, sul margine meridionale del Pian dei Nove, subito a monte di una scarpata morfologica che separa il Pian dei Nove-Lago Morto dal ripiano del Pian della Torre-Lago del Restello (Figura 3-2).

In Figura 3-11 è riportato l'andamento del carico idraulico registrato in Pz1, l'andamento della temperatura dell'acqua sotterranea alla profondità di installazione della sonda, vale a dire 28.87 m da p.c., l'andamento del livello idrometrico del Lago Morto, la pioggia e la temperatura dell'aria registrate presso la stazione ARPAV di Vittorio Veneto nel periodo compreso tra il 12/04/2023 ed il 06/06/2024. Come si può osservare l'andamento del carico idraulico risente delle variazioni di livello idrometrico del Lago Morto, si prolungate (linee tratteggiate in corrispondenza dei due periodi in cui il livello del lago è stato mantenuto più basso della media), sia giornaliera che si manifestano nell'idrogramma con oscillazioni appena

percettibili; oltre a ciò, il carico idraulico risente anche in questo caso del regime pluviometrico dell'area. I valori di carico idraulico massimo, minimo e medio registrati in Pz1 risultano rispettivamente pari a: 258.21 m s.l.m., 255.99 m s.l.m. e 257.23 m s.l.m., da cui deriva un'escursione di 2.22 m. L'andamento della temperatura dell'acqua evidenzia come il sensore sia installato entro la zona di eterotermia. In località Borgo Colesei a circa 29 m di profondità, però, queste variazioni non risultano sincrone al regime termometrico dell'atmosfera ma sono traslate di circa 6 mesi. Il valore minimo della temperatura (7.90 °C), infatti, si registra tra il 08/06/2023 ed il 09/06/2023, mentre il massimo (12.70 °C) tra il 21/11/2023 ed il 22/11/2023. La temperatura media durante il periodo di monitoraggio risulta pari a 9.98 °C, mentre l'escursione termica è di 4.80 °C.

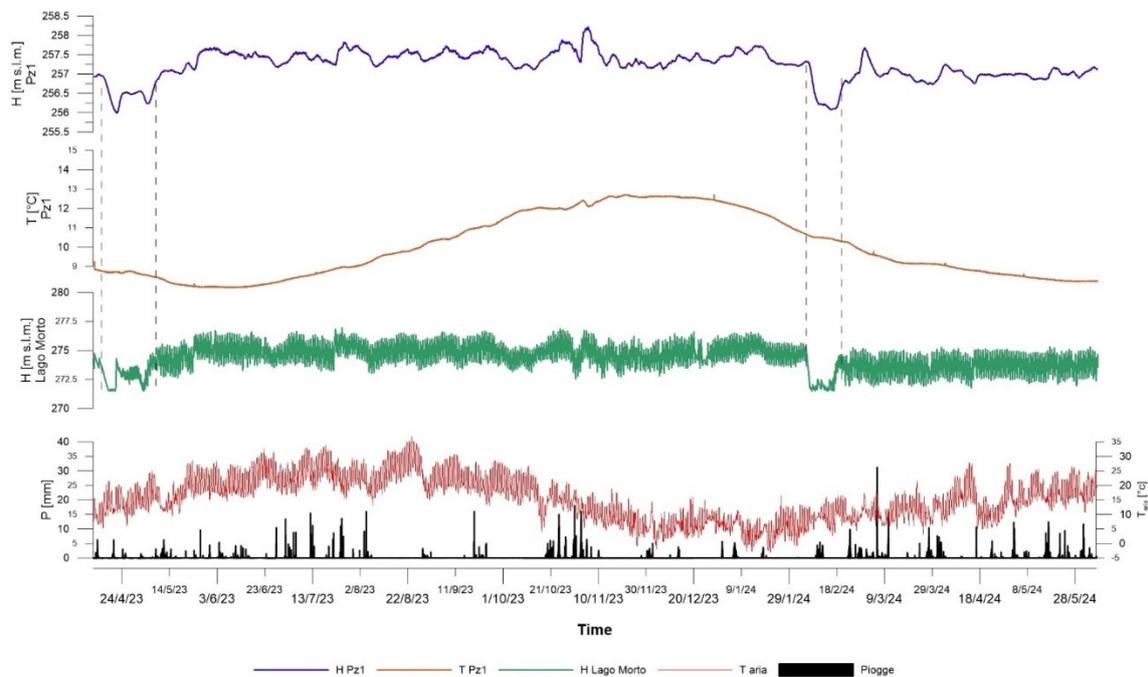


Figura 3-11: Andamento del carico idraulico (H) e della temperatura dell'acqua (T) registrati nel piezometro Pz1, del livello idrometrico del Lago Morto (L), della pioggia (P) e della temperatura dell'aria (T_{aria}) registrate alla stazione di Vittorio Veneto, nel periodo 12/04/2023-06/06/2024.

3.2.4.2 Piezometro Pz2

Il Pz2 è posizionato in Località Nove, sul margine settentrionale del Pian dei Nove, circa 300 m a valle della sponda meridionale del Lago Morto (Figura 3-2).

In Figura 3-12 è riportato l'andamento del carico idraulico registrato in Pz2, l'andamento della temperatura dell'acqua sotterranea alla profondità di installazione della sonda, vale a dire 20.12 m da p.c., l'andamento del livello idrometrico del Lago Morto, la pioggia e la

temperatura dell'aria registrate presso la stazione ARPAV di Vittorio Veneto nel periodo compreso tra il 12/04/2023 ed il 06/06/2024. Come si può osservare l'andamento del carico idraulico risente fortemente delle variazioni di livello idrometrico del Lago Morto, siano esse prolungate (linee tratteggiate in corrispondenza dei due periodi in cui il livello del lago è stato mantenuto più basso della media), oppure giornaliere, che si manifestano nell'idrogramma con oscillazioni periodiche apprezzabili. Il carico idraulico in Pz2 sembra risentire in modo molto minore o addirittura non risentire delle variazioni del regime pluviometrico dell'area. I valori di carico idraulico massimo, minimo e medio registrati in Pz2 risultano rispettivamente pari a: 275.16 m s.l.m., 270.62 m s.l.m. e 273.37 m s.l.m., da cui deriva un'escursione di 4.55 m. L'andamento della temperatura evidenzia come il sensore sia installato entro la zona di eterotermia. In località Nove a circa 20 m di profondità, queste variazioni non risultano sincrone al regime termometrico dell'atmosfera ma sono traslate di circa 6 mesi. Il valore minimo della temperatura ($4.83\text{ }^{\circ}\text{C}$), infatti, si registra tra il 27/02/2024 ed il 28/02/2024, mentre il massimo ($16.48\text{ }^{\circ}\text{C}$) il 28/09/2023. La temperatura media durante il periodo di monitoraggio risulta pari a $10.25\text{ }^{\circ}\text{C}$, mentre l'escursione termica è di $11.65\text{ }^{\circ}\text{C}$.

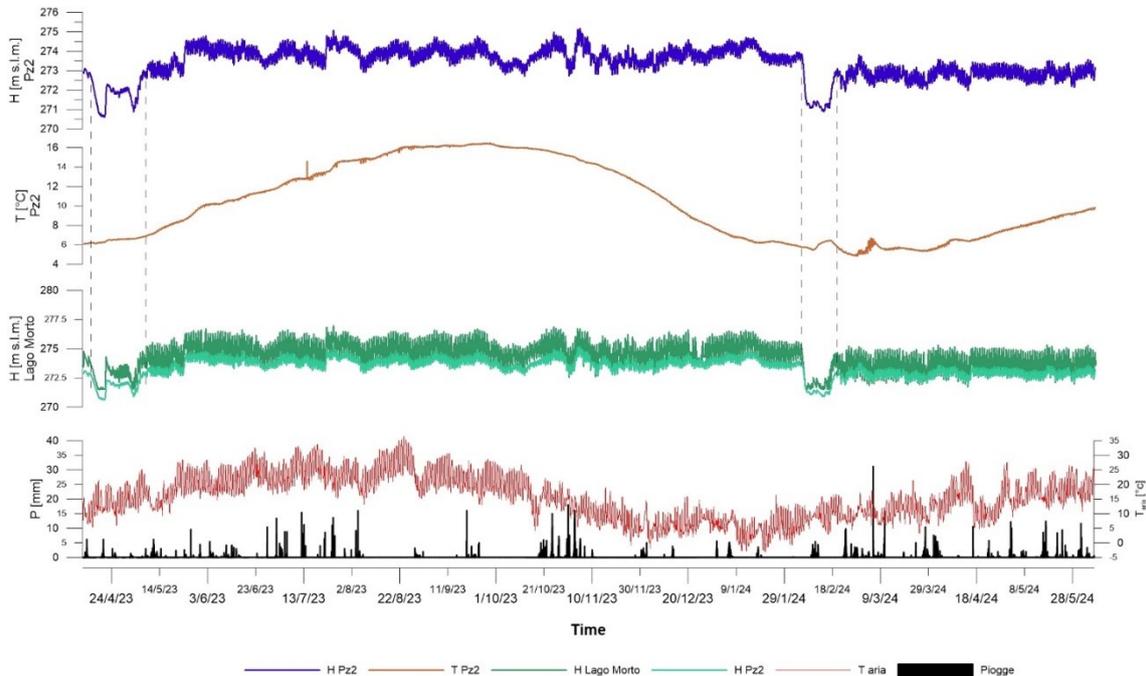


Figura 3-12: Andamento del carico idraulico (H) e della temperatura dell'acqua (T) registrati nel piezometro Pz2, del livello idrometrico del Lago Morto (L), della pioggia (P) e della temperatura dell'aria (T_{aria}) registrate alla stazione di Vittorio Veneto, nel periodo 12/04/2023 – 06/06/2024.

3.2.5 Borgo Piccin

Il campo pozzi di Borgo Piccin è dotato di due pozzi terebrati nel 1993 per l'approvvigionamento idrico in sostituzione delle captazioni in località Belvedere. Oltre ai pozzi è presente un piezometro profondo 29 m e di diametro pari a 150 mm (Figura 3-13). Il piezometro è stato installato a partire da un sondaggio esplorativo perforato in fase di progettazione del campo pozzi.

Il sottosuolo dell'area è costituito da detrito di frana con presenza di massi e trovanti immersi in materiale ghiaioso sciolto, che ospita l'acquifero freatico e che presenta valori di soggiacenza media pari a circa 10.4 m di profondità da piano campagna (Figura 3-2).

All'interno del piezometro realizzato nella fase di progettazione del campo pozzi (PzBP) è stato installato un sensore per la misura del carico idraulico e della temperatura delle acque sotterranee. In Figura 3-14 è riportato l'andamento del carico idraulico registrato in PzBP, l'andamento della temperatura dell'acqua sotterranea alla profondità di installazione della sonda, vale a dire 18.69 m da p.c., l'andamento del livello idrometrico del Lago Morto, la pioggia e la temperatura dell'aria registrate presso la stazione ARPAV di Vittorio Veneto nel periodo compreso tra il 12/04/2023 ed il 06/06/2024. Come si può osservare l'andamento del carico idraulico risente fortemente delle variazioni di livello idrometrico del lago, siano esse prolungate (linee tratteggiate in corrispondenza dei due periodi in cui il livello del lago è stato mantenuto più basso della media), oppure giornaliere, che si manifestano nell'idrogramma con oscillazioni periodiche piuttosto accentuate. Il carico idraulico in PzBP sembra risentire in modo molto minore o addirittura non risentire delle variazioni del regime pluviometrico dell'area. I valori di carico idraulico massimo, minimo e medio registrati in PzBP risultano rispettivamente pari a: 276.22 m s.l.m., 270.88m s.l.m. e 273.95 m s.l.m., da cui deriva un'escursione di 5.34 m. L'andamento della temperatura evidenzia come il sensore sia installato entro la zona di eterotermia, che qui, oltre ad essere influenzata dalle variazioni della temperatura atmosferica, è ipotizzabile possa risentire anche delle fluttuazioni di temperatura delle acque di dispersione del lago. Anche in località Borgo Piccin, a circa 19 m di profondità, queste variazioni non risultano sincrone al regime termometrico dell'atmosfera ma, anche se influenzate dalle dispersioni del lago, sono traslate di circa 6 mesi. Il valore minimo della temperatura (9.01 °C), infatti, si registra tra il 07/06/2024 ed il 08/06/2024, mentre il massimo (15.24 °C) si registra tra il 28/10/2024 ed il 29/10/2024. La temperatura media durante il periodo di monitoraggio risulta pari a 10.25 °C, mentre l'escursione termica è di 6.24 °C.



Figura 3-13: Il campo pozzi di Borgo Piccin: vista aerea da drone; in rosso i pozzi con il codice di riferimento; in azzurro il piezometro PzBP (foto: Nuova AGEPI).

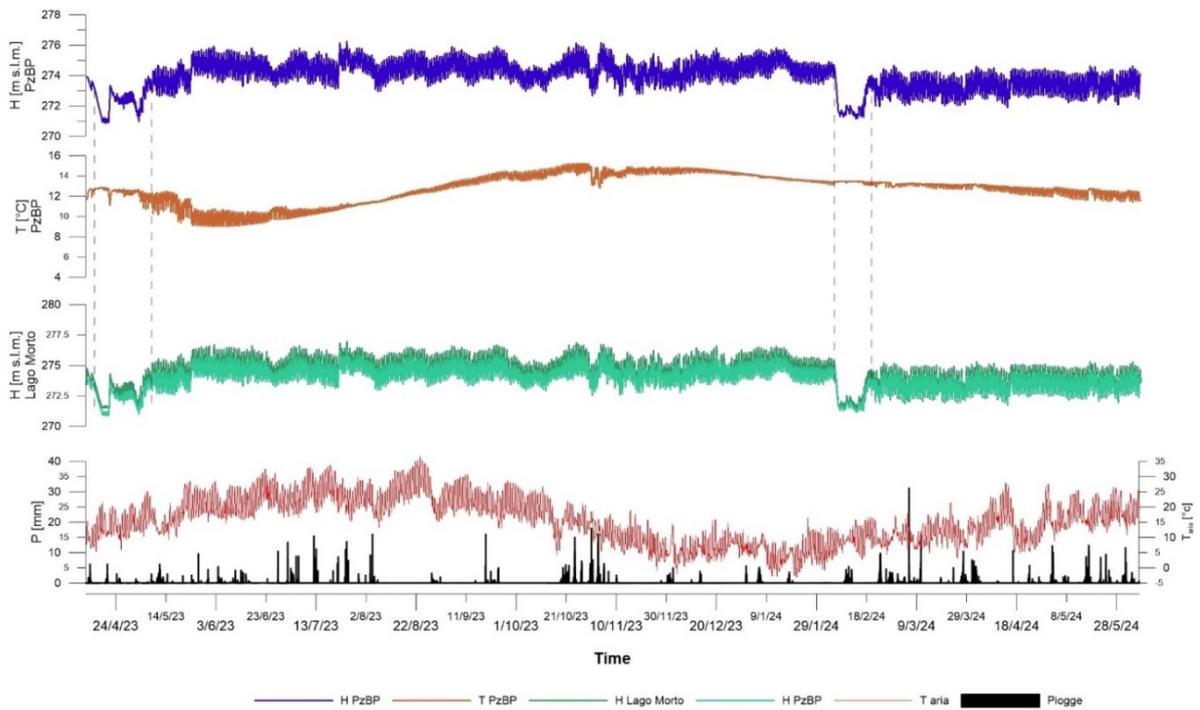


Figura 3-14: Andamento del carico idraulico (H) e della temperatura (T) registrati nel piezometro PzBP, del livello idrometrico del Lago Morto (L), della pioggia e della temperatura atmosferica (T_{aria}) registrate alla stazione di Vittorio Veneto nel periodo 12/04/2023 – 06/06/2024.

3.3 Portate dai pozzi e dalle opere drenanti

Nell'ambito dello studio sulla protezione delle risorse idriche della Val Lapisina, di cui il lavoro di questa tesi fa parte, la società Piave Servizi ha fornito i dati di monitoraggio dei punti che sono collegati alle captazioni presenti nella valle e che possono essere utilizzati per ricostruire l'andamento delle portate da essi derivate. I dati utili per le simulazioni numeriche che riproducono l'acquifero freatico di fondovalle riguardano le portate in uscita dai due pozzi di Borgo Piccin e dalle due opere drenanti in località Belvedere: la galleria drenante Belvedere e la sorgente San Floriano. Le portate monitorate da Piave Servizi sono fornite su base oraria in L/s nel periodo compreso tra il 12/04/2023 e il 07/06/2024.

3.3.1 Campo pozzi di Borgo Piccin

Il campo pozzi di Borgo Piccin (Figura 3-13) è dotato di due pozzi terebrati nel 1993 per l'approvvigionamento idrico in sostituzione delle captazioni in località Belvedere. L'ubicazione del campo pozzi fu scelta sia per la vicinanza con il Lago Morto sia per l'effetto di depurazione ottenuto attraverso la filtrazione delle acque superficiali nei depositi inconsolidati interposti tra il lago ed i pozzi. I due pozzi hanno profondità di 29.6 m (P1) e 30 m da p.c. (P2), diametro 400 mm con tratto filtrante posto negli ultimi 10 m.

Come descritto nel Par. 3.2.5, i pozzi e il piezometro di Borgo Piccin sono stati terebrati in un sottosuolo costituito da detrito di frana a prevalenza di materiale ghiaioso, con la presenza di massi e trovanti, che ospita l'acquifero.

Per il campo pozzi in questione, Piave Servizi ha fornito i dati dal 12/04/2023 ore 7:00 al 07/06/2024 ore 17:00, relativi alla portata totale in uscita emunta dai due pozzi, il cui andamento è visualizzato nel grafico in Figura 3-15. Nel periodo in oggetto, dai pozzi di Borgo Piccin sono state estratte portate totali comprese fra 47.87 L/s e 116.87 L/s, con un valore medio di 110.16 L/s e un'escursione di oltre 69 L/s. Del valore di portata totale, il 45% rappresenta la portata emunta da P1, mentre il 55% la portata emunta da P2, così come riferito dalla società stessa.

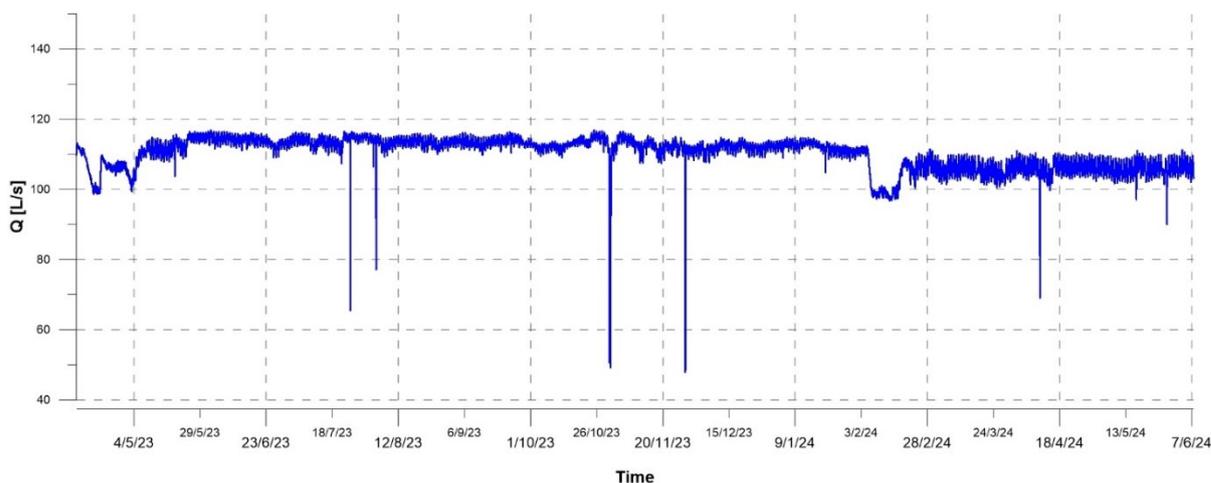


Figura 3-15: Portata totale in uscita dal campo pozzi di Borgo Piccin.

3.3.2 Galleria drenante Belvedere e sorgente San Floriano

Il fronte di risorgiva captato dalle due opere drenanti denominate galleria drenante Belvedere e sorgente San Floriano si trova in Località Borgo Colesai, sul margine di una scarpata morfologica che separa il Pian dei Nove-Lago Morto dal ripiano del Pian della Torre-Lago del Restello (Figura 3-2 e Figura 3-16).

Per la galleria drenante Belvedere, Piave Servizi ha fornito i dati dal 12/04/2023 ore 9:00 al 07/06/2024 ore 18:00 aggregati su base oraria, relativi alla portata in ingresso alla vasca di carico e la portata allo scarico; in Figura 3-17 è visualizzabile la somma di questi due contributi, mentre per stimare la portata totale è stato necessario aggiungere il monitoraggio della portata nel canale di scarico della captazione (Par. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

Per la Sorgente San Floriano, Piave Servizi ha fornito i dati aggregati su base oraria, dal 12/04/2023 ore 9:00 al 07/06/2024 ore 18:00 relativi alla portata in ingresso alla vasca di carico, la portata derivata dall'acquedotto di Vittorio Veneto (V.V.) e la portata di troppo pieno; la portata totale è stata calcolata come la somma di questi tre contributi (Figura 3-18). Durante il periodo considerato, la sorgente San Floriano ha presentato portate comprese fra 11.18 L/s e 80.69 L/s, con una media di 42.02 L/s e un'escursione di 69.51 L/s.



Figura 3-16: A: galleria drenante Belvedere; B: Sorgente San Floriano; C: serbatoio/vasca (foto Nuova AGEPI).

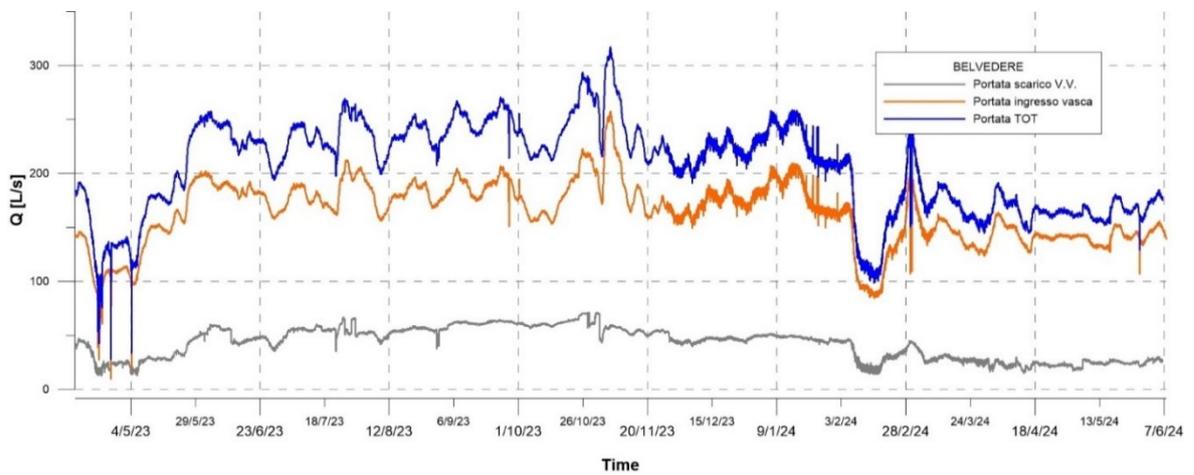


Figura 3-17: Portata in ingresso alla vasca di Belvedere (linea arancione), portata allo scarico (linea grigia) e somma dei due contributi (linea blu) per la galleria drenante Belvedere.

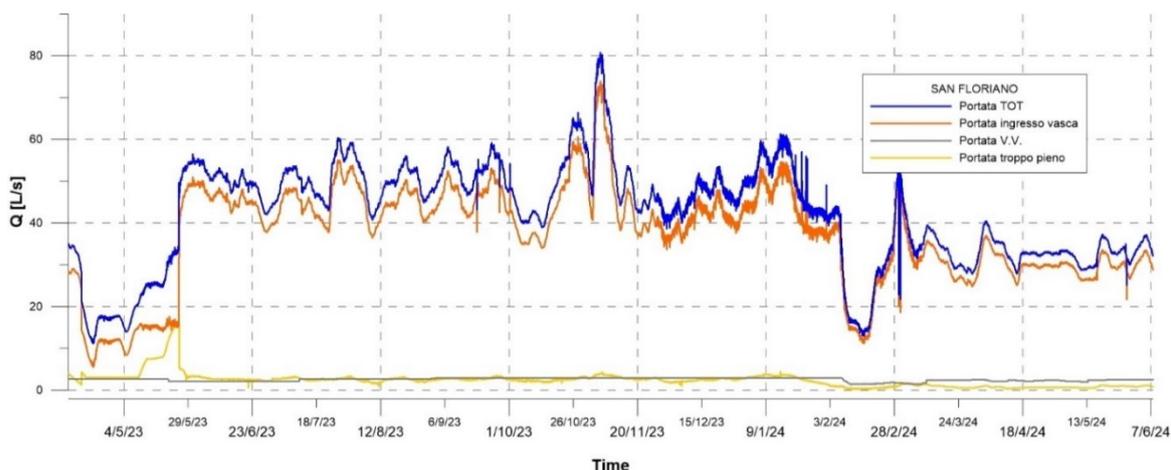


Figura 3-18: Portata in ingresso alla vasca (linea arancione), portata acquedotto V.V. (linea grigia), portata di troppo pieno (linea gialla) e portata totale (linea blu) per la galleria Sorgente San Floriano.

3.3.2.1 Canale di scarico della galleria Belvedere

Nei pressi della galleria drenante Belvedere è stata stimata la portata del canale di scarico che raccoglie le acque di troppo pieno (CsB), allo scopo di ricostruirne la portata totale a partire dai dati di monitoraggio forniti da Piave Servizi (Par. 3.3.2). La stima della portata del canale è avvenuta attraverso il monitoraggio in continuo del livello idrometrico e la ricostruzione di una scala di deflusso sperimentale. Perciò un sensore TD-DIVER (Par. 3.2) è stato installato lungo l'alveo del canale, all'interno di un tubo piezometrico in PVC di 2" di diametro, opportunamente fenestrato per favorire variazioni di livello congrue a quelle del corso d'acqua. In questo caso, la colonna d'acqua sovrastante lo strumento (WC; Par. 3.2) corrisponde al livello idrometrico del canale (L in m), per cui, per derivare la portata (Q in L/s), è stato sufficiente individuare una scala di deflusso sperimentale, del tipo:

$$Q = aL^2 + bL + c$$

dove a , b e c sono dei coefficienti determinati attraverso una regressione ai minimi quadrati dei valori di portata e livello misurati contemporaneamente. Per la misura della portata è stato utilizzato il metodo della diluizione (Herschy, 2009), il quale prevede l'immissione nel corso d'acqua di un tracciante e la successiva misura del suo grado di diluizione (curva di *breakthrough*) in un punto posizionato a valle rispetto al punto di iniezione. Con questo metodo, la portata può essere stimata attraverso la formula:

$$Q = \frac{M}{\int_t^T C(t) dt}$$

dove M è la massa del tracciante immessa (in mg), $C(t)$ è la sua concentrazione (in mg/L) e t è il tempo (in s) dall'immissione. Come tracciante è stato utilizzato il cloruro di sodio (NaCl),

mentre per la stima del suo grado di diluizione lungo l'alveo del canale è stata misurata la conducibilità elettrica specifica a 25 °C (SpCE), il cui valore è direttamente proporzionale alla quantità di soluto disciolto nell'acqua. Per il rilievo delle variazioni di SpCE è stato utilizzato un conduttivimetro portatile modello HD 2016.2 della Delta Ohm. Le misure di portata sono state realizzate durante i sopralluoghi mensili. In Tabella 3-3 sono riportati i valori di portata misurati mensilmente con il metodo della diluizione salina, mentre in Figura 3-19 è mostrata la scala di deflusso derivata dal confronto tra i valori di portata e livello misurati contemporaneamente, assieme ai valori dei coefficienti della funzione polinomiale utilizzata per il fittaggio ed il relativo coefficiente di determinazione (R^2). Infine, in Figura 3-20 sono visualizzati i dati di monitoraggio acquisiti nel periodo 12/04/2023-06/06/2024 e i valori di portata derivati dalla trasformazione L-Q. In questo caso la temperatura è la temperatura dell'acqua nel canale di scarico, che risulta influenzata dall'andamento della temperatura atmosferica.

La portata totale della galleria drenante Belvedere (Figura 3-21) è data dalla somma della portata oraria derivata da Piave Servizi (Figura 3-17) e la portata oraria del canale di scarico. Nel periodo in questione la galleria drenante Belvedere ha presentato portate comprese tra 316.85 L/s e 27.90 L/s, con un valore medio di 206.73 L/s ed un'escursione di oltre 288.95 L/s. Le portate della galleria drenante Belvedere sono fortemente correlate con il carico idraulico del piezometro Pz1 (Par. 0), ubicato a monte idrogeologico, secondo la direzione prevalente di deflusso delle acque sotterranee, e distante circa 290 m.

Data	Ora solare	L (m)	Q (L/s)
24/05/2023	14:00	13.90	17.75
14/07/2023	09:00	33.64	48.99
31/08/2023	14:30	28.73	45.46
28/09/2023	13:46	40.08	59.45
31/10/2023	17:00	50.50	72.91
28/11/2023	09:40	30.38	58.87
28/12/2023	09:00	23.64	55.35
29/01/2024	10:50	25.10	42.74
04/03/2024	09:50	18.27	37.88
03/05/2024	09:30	11.88	42.81
06/05/2024	09:20	8.89	13.59
06/06/2024	10:30	10.83	29.94

Tabella 3-3: Valori di portata (Q) stimati presso il canale di scarico della galleria drenante Belvedere durante il periodo di monitoraggio e valori di livello (L) utilizzati per la costruzione della scala di deflusso sperimentale.

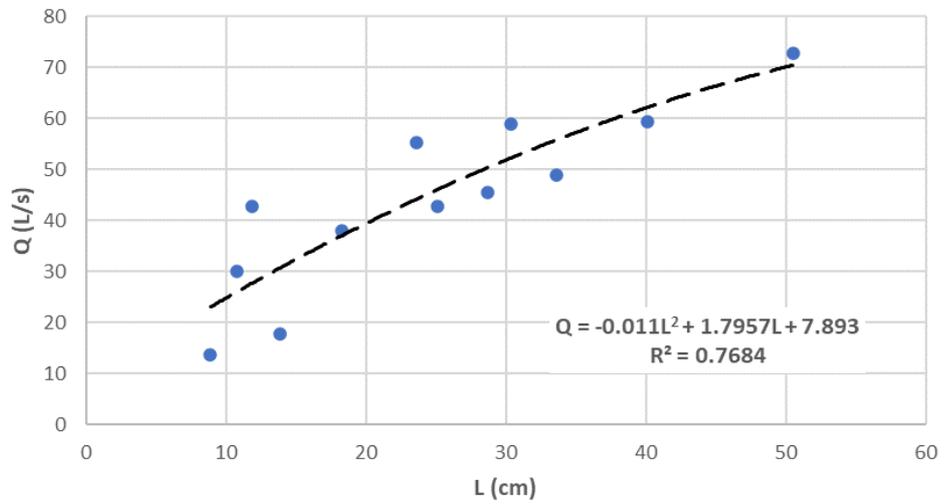


Figura 3-19: Scala di deflusso sperimentale del canale di scarico della galleria drenante Belvedere.

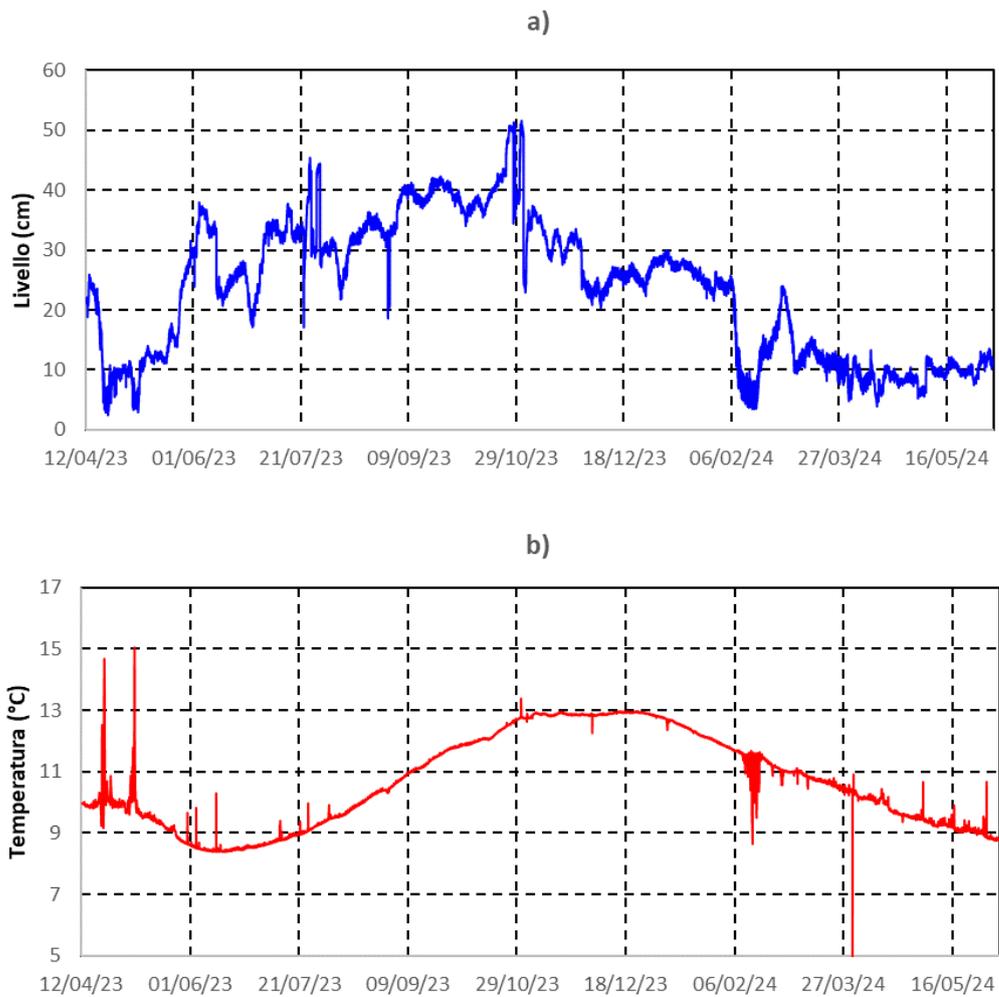




Figura 3-20: Andamento dei valori orari di: a) livello (L), b) temperatura (T) e c) portata (Q), registrati presso il canale di scarico della galleria drenante Belvedere tra il 12/04/2023 al 06/06/2024.

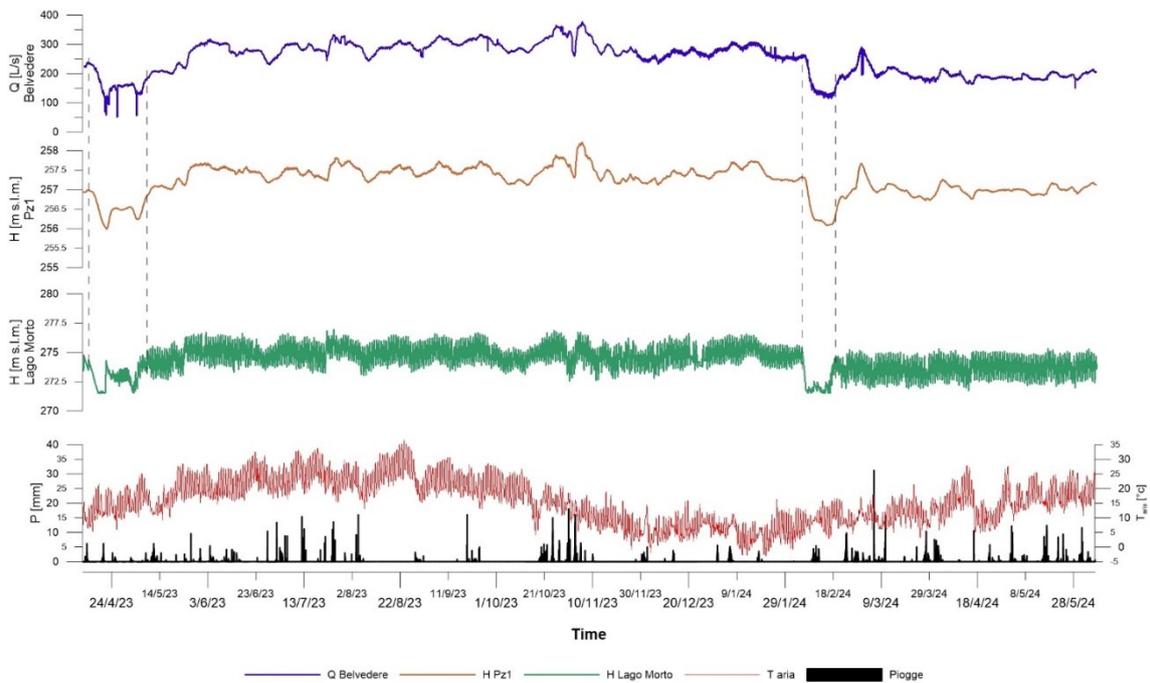


Figura 3-21: Andamento della portata totale oraria (Q) della galleria drenante Belvedere, del carico idraulico orario (H) in Pz1, del livello idrometrico del Lago Morto, della pioggia e della temperatura atmosferica (T_{aria}) registrate alla stazione di Vittorio Veneto nel periodo 12/04/2023-06/06/2024.

4 Bilancio idrico del suolo e stima dell'infiltrazione

L'elaborazione del modello idrogeologico concettuale e l'implementazione del modello numerico dell'acquifero richiedono una stima quanto più accurata dell'infiltrazione derivante dalle precipitazioni. Un metodo comunemente utilizzato è il calcolo del bilancio idrico del suolo, che può essere espresso dalla relazione:

$$P = E_r + R + I \pm \Delta S$$

dove P rappresenta la precipitazione, E_r l'evapotraspirazione reale, R il ruscellamento superficiale, I l'infiltrazione e ΔS la variazione di immagazzinamento. Se si stima il bilancio idrico utilizzando valori medi delle componenti su un periodo sufficientemente lungo (> 10 anni), le variazioni di immagazzinamento risultano trascurabili, e la somma di ruscellamento e infiltrazione è definita precipitazione efficace (P_e), secondo l'equazione:

$$P - E_r = R + I = P_e$$

Per il bilancio idrico del suolo dell'area di studio, è stato adottato il metodo di Thornthwaite & Mather (1957), ampiamente utilizzato in idrogeologia per la sua semplicità e comprovata affidabilità in diversi contesti climatici, tra cui l'Italia Settentrionale (Barazzuoli & Salleolini, 1993). Questo metodo stima l'evapotraspirazione reale mensile ($E_{r,m}$) a partire dall'evapotraspirazione potenziale mensile ($E_{p,m}$), calcolata sulla base della precipitazione mensile (P_m) e della temperatura media mensile (T_m).

Nel presente studio, il bilancio idrico del suolo è stato calcolato su un'area più ampia del bacino idrografico della Val Lapisina, in funzione delle stazioni meteorologiche disponibili. Lo scopo è stato quello di stimare l'infiltrazione mensile da inserire nelle simulazioni numeriche che riproducono i dati di monitoraggio dell'acquifero freatico di fondovalle, considerando il periodo di 13 mesi compreso tra il 1 maggio 2023 e il 31 maggio 2024

4.1 Dati di precipitazione e temperatura orari

Dal portale di ARPAV sono stati acquisiti i dati orari di precipitazione (P) e temperatura atmosferica (T) registrati nel periodo 01/01/2023 - 04/07/2024 e provenienti dalle stazioni meteorologiche più prossime al bacino idrografico della Val Lapisina (Figura 4-1): Belluno-Aeroporto, Cansiglio-Tramedere, Col Indes-Tambre, Conegliano, Farra di Soligo, Follina, Fortogna-Longarone, Gaiarine, La Secca, Longarone, Nogarolo di Tarzo, San Martino d'Alpago, Santa Giustina Bellunese, Sant'Antonio Tortal, Sospirolo, Torch e Vittorio Veneto.

Le principali caratteristiche delle stazioni e delle serie acquisite sono riportate in Tabella 4-1. Le stazioni con serie di precipitazione incomplete sono risultate quelle di: Farra di Soligo, Follina, Longarone, Vittorio Veneto, Fortogna-Longarone, La Secca e Nogarolo di Tarzo, mentre quelle con lacune nei valori di temperatura sono: Belluno-Aeroporto, Cansiglio-Tramedere, Col Indes-Tambre, Farra di Soligo, Longarone, San Martino d'Alpago, Fortogna-Longarone, Santa Giustina Bellunese. Le stazioni di La Secca e Nogarolo di Tarzo, invece, sono prive di misura della temperatura atmosferica. Siccome il metodo di Thornthwaite & Mather richiede l'aggregazione dei dati su base mensile e poiché le lacune di registrazione

presentano percentuali molto basse, comprese tra il 2.04% (T a San Martino d'Alpago) e lo 0.01% (P a Farra di Soligo e T a Fortogna-Longarone), non è stato necessario ricostruire i valori mancanti e si è proceduto al calcolo P_m e T_m per il periodo compreso tra maggio 2023 e maggio 2024 (13 mesi). Per le stazioni prive della misura di temperatura dell'aria si è provveduto a ricostruirne i valori a partire dalle relazioni mensili tra T_m e la quota di ciascuna stazione meteorologica (Figura 4-2). Le relazioni sono individuate attraverso delle regressioni ai minimi quadrati di funzioni lineari, in Microsoft Excel, e la significatività del *fitting* è valutata attraverso il parametro R^2 . Come si può vedere in Figura 4-2p il parametro R^2 è in genere superiore a 0.7, con eccezione dei mesi invernali di novembre-dicembre 2023 e gennaio 2024 in cui diminuisce progressivamente per effetto di una maggiore dispersione dei valori di T_m . Infine, in Tabella 4-2 e in Tabella 4-3 sono riportati rispettivamente i valori di P_m e T_m utilizzati per il bilancio idrico del suolo nel periodo maggio 2023 – maggio 2024. Il periodo di monitoraggio è stato caratterizzato da piogge abbondanti soprattutto nei mesi di ottobre 2023, febbraio, marzo e maggio 2024, con precipitazioni prossime o di poco superiori a 250 mm a Vittorio Veneto.

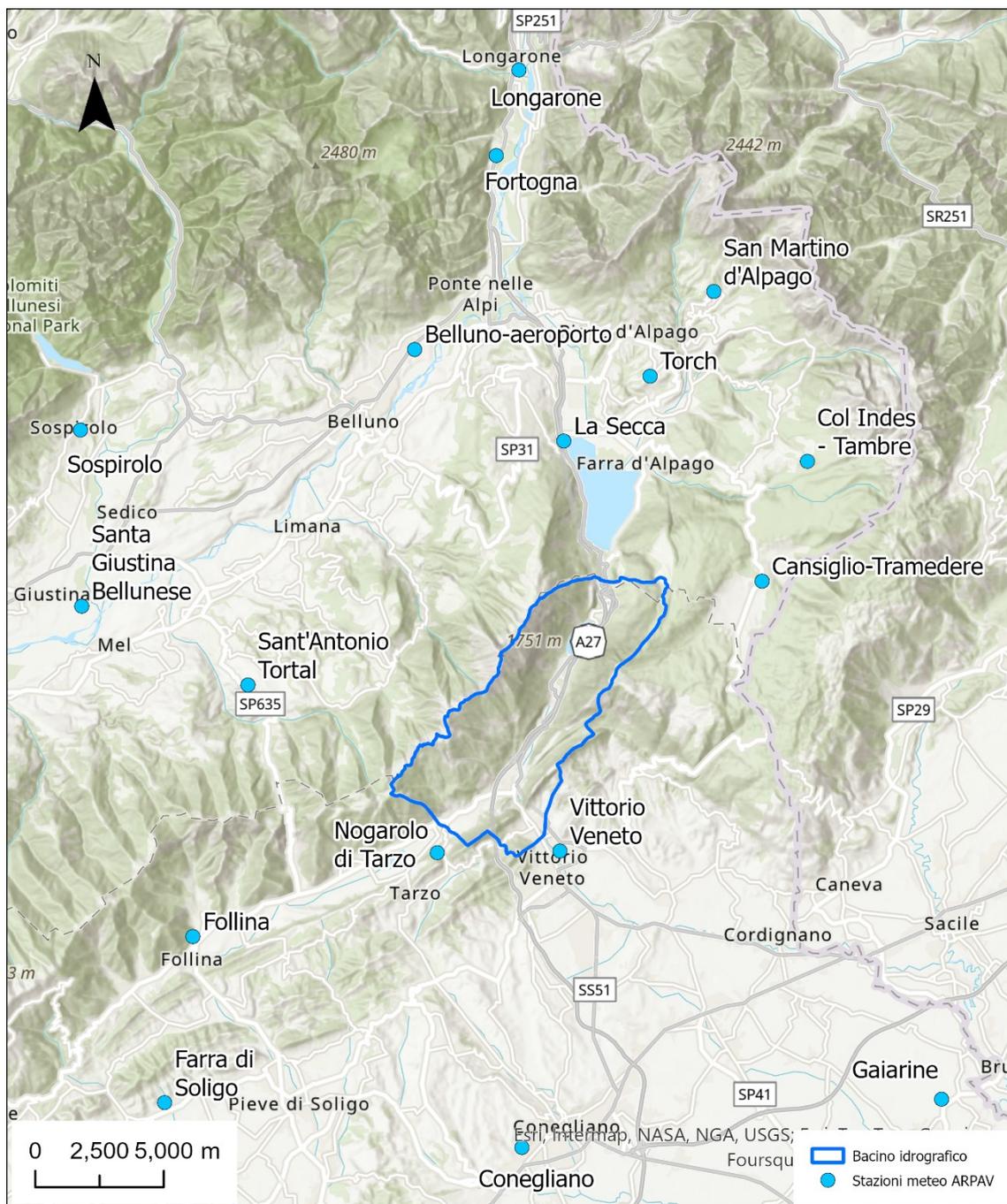
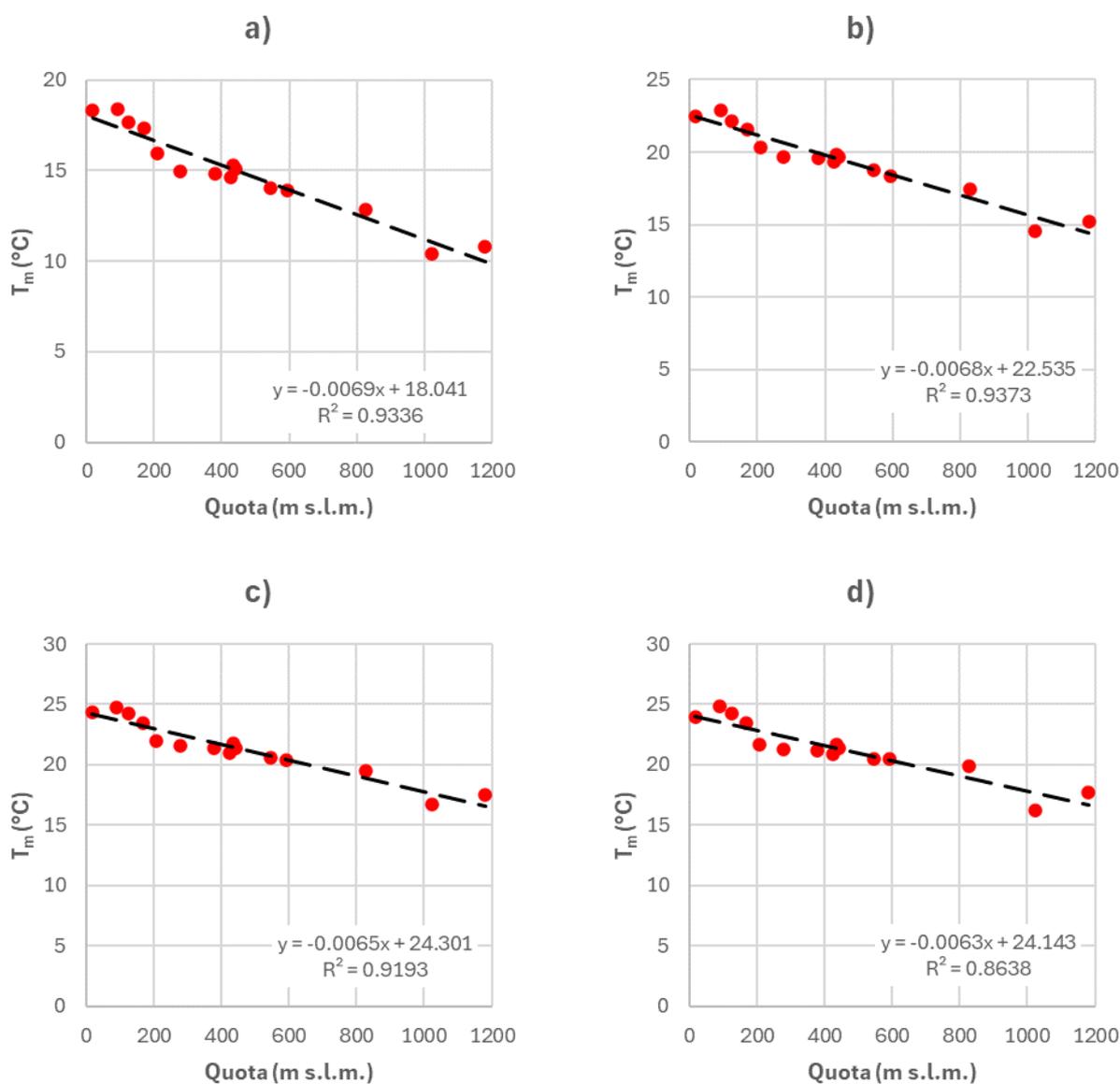


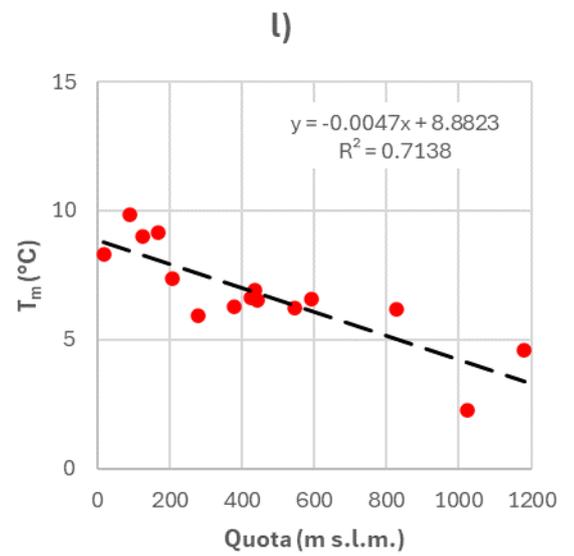
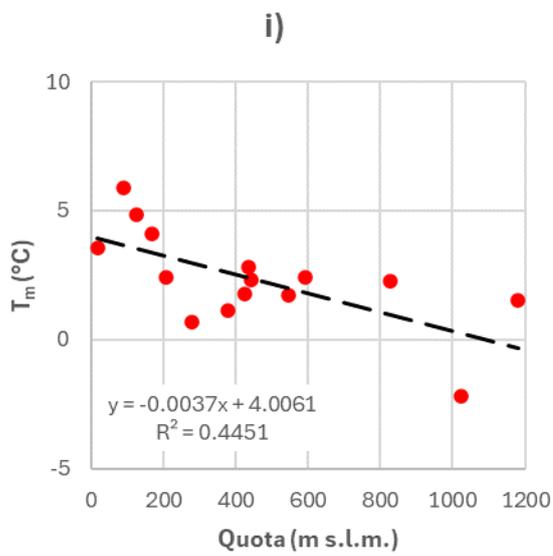
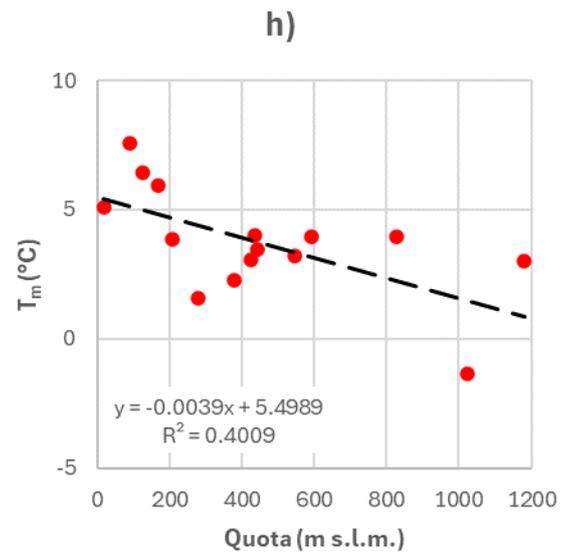
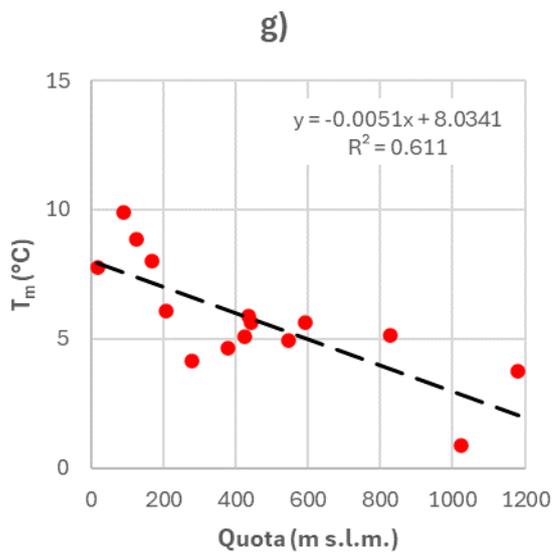
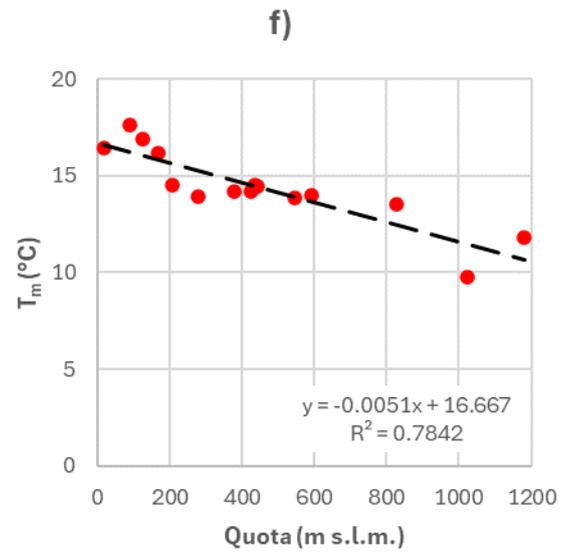
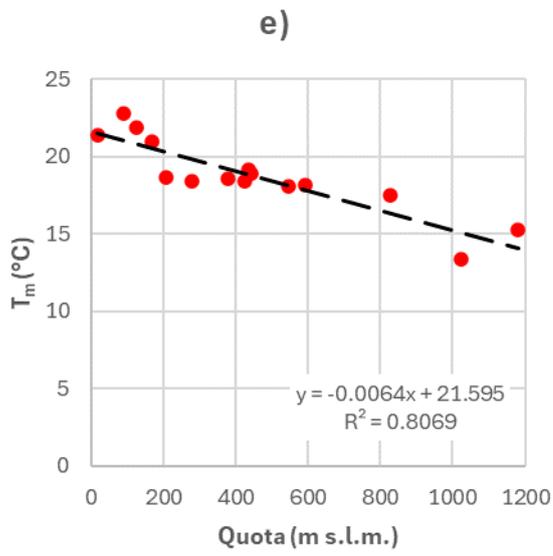
Figura 4-1: Ubicazione delle stazioni meteorologiche utilizzate per il calcolo del bilancio idrico del suolo nel periodo di monitoraggio.

Stazione	Sigla	X (m)	Y (m)	Quota (m s.l.m.)	%P	%T
Belluno - Aeroporto	BA	1750560	5117458	379		0.28
Cansiglio - Tramedere	CA	1764069	5108350	1022		0.18
Col Indes - Tambre	CT	1765830	5113061	1181		0.12
Conegliano	CO	1754728	5086125	90	0.00	
Farra di Soligo	FS	1740836	5087883	169	0.01	1.64
Follina	FO	1741932	5094402	208	0.27	
Gaiarine	GA	1771060	5088027	17		
Longarone	LO	1754615	5128434	435	0.18	0.12
San Martino d'Alpago	SM	1762192	5119729	828		2.04

Sant'Antonio Tortal	SA	1744072	5104281	544		
Sospirolo	SO	1737557	5114295	426		
Torch	TO	1759719	5116409	593		
Vittorio Veneto	VV	1756209	5097768	123	0.08	
Fortogna - Longarone	FL	1753736	5125075	442	0.19	0.01
La Secca	LS	1756366	5113856	386	0.52	*
Nogarolo di Tarzo	NT	1751438	5097705	329	0.29	*
Santa Giustina Bellunese	SG	1737598	5107374	278		0.09

Tabella 4-1: Caratteristiche delle stazioni metereologiche utilizzate per il calcolo del bilancio idrico del suolo e percentuali delle lacune di registrazione della precipitazione (%P) e della temperatura (%T); longitudine (X in m) e latitudine (Y in m) sono nel sistema di riferimento Gauss-Boaga, fuso Ovest; * sono le stazioni prive di misura della temperatura atmosferica.





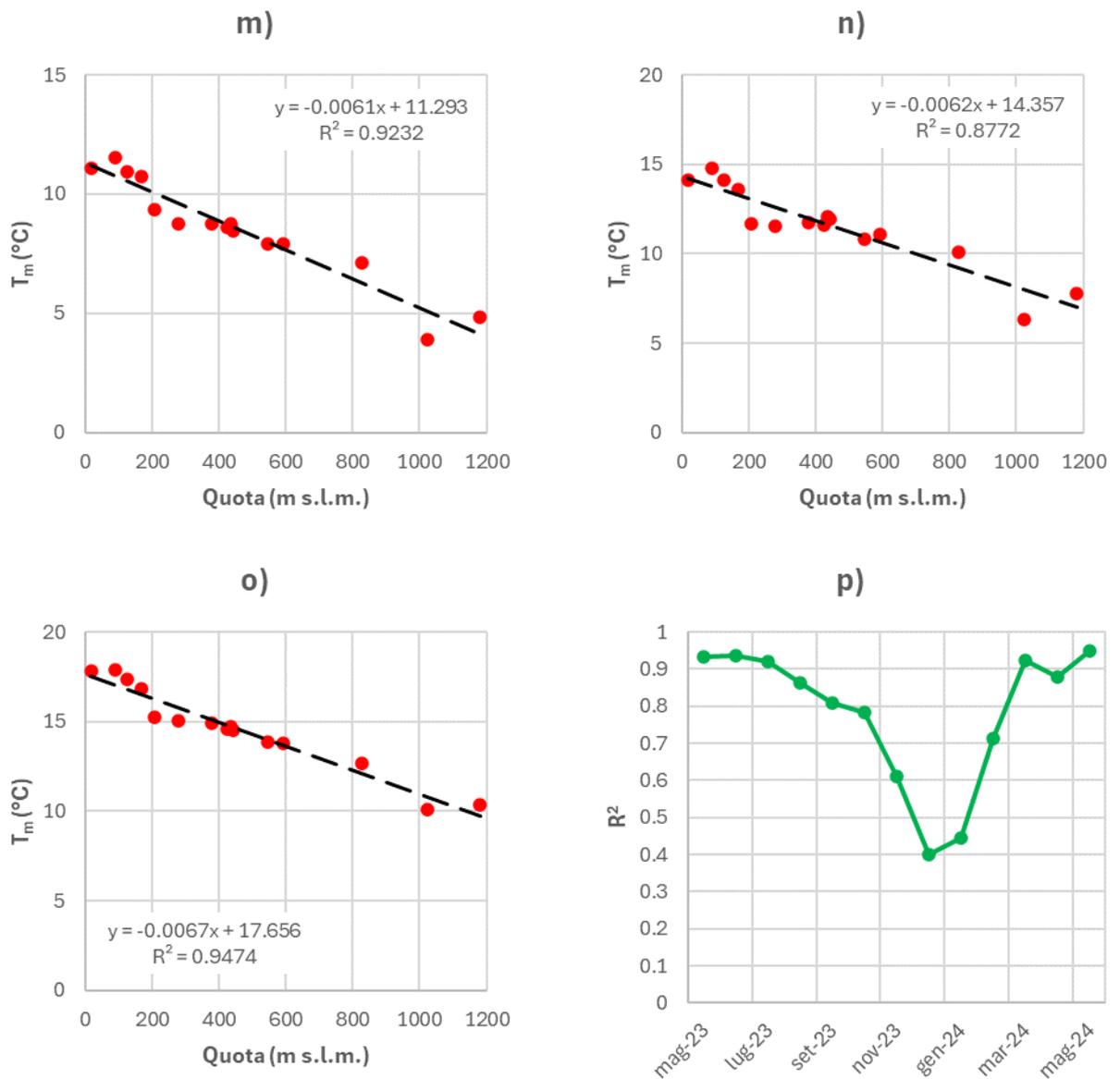


Figura 4-2: Scatter-plot e rette di regressione tra i valori di T_m e la quota delle stazioni per i mesi di: a) maggio 2023, b) giugno 2023, c) luglio 2023, d) agosto 2023, e) settembre 2023, f) ottobre 2023, g) novembre 2023, h) dicembre 2023, i) gennaio 2024, l) febbraio 2024, m) marzo 2024, n) aprile 2024, o) maggio 2024 e p) andamento dei valori del coefficiente di determinazione (R^2) delle rette di regressione.

Sigla	05/23	06/23	07/23	08/23	09/23	10/23	11/23	12/23	01/24	02/24	03/24	04/24	05/24
BA	206.6	219.0	216.8	159.2	77.4	269.0	124.0	106.6	73.4	204.2	196.6	70.0	321.0
CA	227.0	188.8	234.8	154.0	118.2	359.0	274.2	119.6	125.8	411.2	448.4	147.8	449.4
CT	228.6	233.6	300	160	98	395.8	267	135.4	108.2	331.2	393.8	155.2	545
CO	158.0	80.0	165.4	127.6	80.8	230.8	148.2	54.0	131.0	175.2	188.8	80.4	282.0
FS	148.2	130.0	164.4	180.6	55.8	220.0	181.6	57.6	106.4	259.8	229.6	105.0	354.2
FO	171.2	178.4	176.0	172.8	73.4	305.8	230.6	78.6	124.4	359.4	293.4	117.8	444.2
GA	163.0	163.0	153.4	93.8	64.2	240.8	138.2	61.8	122.2	140.8	196.6	100.4	238.6
LO	133.4	88.6	191.4	185.0	93.0	318.6	158.6	179.2	66.8	207.6	236.6	120.4	329.6
SM	192.8	227.2	266.6	105.6	67.4	353.8	182.0	133.6	94.8	210.2	211.6	101.6	356.4
SA	184.0	140.4	146.8	159.4	73.6	344.8	250.0	79.0	107.6	391.0	359.2	128.6	374.0
SO	190.0	127.4	225.4	131.0	65.0	353.4	150.8	127.0	83.6	259.4	234.8	135.6	334.6
TO	133.4	186.8	202	81.8	67.8	317	189.4	107	91.2	221.4	222	82.2	325.4
VV	128.2	81.6	189.0	83.8	58.6	242.0	164.6	69.2	103.0	219.4	253.6	85.0	260.6

FL	129.4	102.8	271.0	151.6	102.2	326.0	146.6	164.2	78.0	256.4	235.6	128.2	324.2
LS	115.4	169.6	179.4	112.8	59.6	258.0	168.4	90.4	76.2	222.8	221.0	74.2	278.6
NT	171.4	126.4	151.8	113.2	81.8	228.6	178	65	103.2	251.6	283.4	97.4	344.8
SG	203.6	159.6	175.2	136.6	44.8	290.6	137.6	69.2	87.2	248.4	288	84.8	325.8

Tabella 4-2: Valori di Precipitazione mensile (P_m in mm) utilizzati per il bilancio idrico del suolo del periodo maggio 2023 – maggio 2024.

Sigla	05/23	06/23	07/23	08/23	09/23	10/23	11/23	12/23	01/24	02/24	03/24	04/24	05/24
BA	14.84	19.62	21.42	21.16	18.52	14.20	4.66	2.28	1.15	6.28	8.76	11.77	14.89
CA	10.38	14.56	16.67	16.21	13.36	9.78	0.89	-1.33	-2.17	2.25	3.90	6.35	10.11
CT	10.79	15.25	17.50	17.76	15.24	11.78	3.78	2.99	1.53	4.61	4.85	7.76	10.36
CO	18.38	22.93	24.79	24.88	22.77	17.64	9.88	7.57	5.89	9.83	11.51	14.76	17.89
FS	17.33	21.57	23.49	23.45	20.93	16.18	7.99	5.92	4.09	9.14	10.75	13.58	16.80
FO	15.94	20.33	21.97	21.69	18.62	14.51	6.09	3.87	2.43	7.39	9.37	11.71	15.23
GA	18.30	22.46	24.30	23.95	21.32	16.41	7.78	5.12	3.55	8.33	11.08	14.10	17.83
LO	15.30	19.87	21.73	21.71	19.13	14.52	5.89	3.96	2.80	6.92	8.76	12.07	14.71
SM	12.85	17.47	19.47	19.85	17.49	13.53	5.14	3.22	2.28	6.19	7.12	10.10	12.67
SA	14.04	18.72	20.54	20.48	18.03	13.85	4.94	3.93	1.72	6.25	7.90	10.80	13.86
SO	14.61	19.31	21.02	20.92	18.43	14.21	5.07	6.42	1.76	6.63	8.60	11.61	14.57
TO	13.90	18.37	20.35	20.48	18.15	13.99	5.65	3.99	2.43	6.59	7.90	11.09	13.78
VV	17.70	22.18	24.21	24.29	21.86	16.86	8.84	4.22	4.84	9.00	10.92	14.12	17.34
FL	15.12	19.64	21.39	21.38	18.90	14.45	5.62	3.48	2.34	6.54	8.47	11.95	14.55
LS	15.38	19.91	21.79	21.71	19.12	14.70	6.07	4.00	2.58	7.07	8.94	11.96	15.07
NT	15.77	20.30	22.16	22.07	19.49	14.99	6.36	1.59	2.79	7.34	9.29	12.32	15.45
SG	14.98	19.68	21.59	21.24	18.37	13.95	4.17	3.06	0.68	5.91	8.74	11.57	15.07

Tabella 4-3: Valori di Temperatura atmosferica media mensile (T_m in °C) utilizzati per il bilancio idrico del suolo del periodo maggio 2023 – maggio 2024; in rosso i valori ricostruiti attraverso la relazione T_m vs quota (Figura 4-2).

4.2 Evapotraspirazione reale e surplus

L'evapotraspirazione reale è la quantità d'acqua restituita all'atmosfera sotto forma di vapore, sia per evaporazione diretta che per traspirazione delle piante. La stima dell'evapotraspirazione reale è stata eseguita in base al metodo proposto da Thornthwaite & Mather (1957), il quale si basa sul calcolo dell'evapotraspirazione potenziale media mensile (Ep_m), che rappresenta la quantità di acqua che potenzialmente può evapotraspirare nel caso in cui, in termini di bilancio idrico del suolo, ve ne fosse una disponibilità continua e sufficiente. Ep_m è calcolata in base alla relazione sperimentale che la lega alla temperatura media mensile (T_m), secondo la formula:

$$Ep_m = J \cdot 16 \cdot \left(10 \cdot \frac{T_m}{I}\right)^\beta$$

dove J è un coefficiente di correzione di latitudine riferito al mese i -esimo, pari al rapporto tra le ore diurne e la metà (12) delle ore giornaliere, I è l'indice termico annuale, pari alla sommatoria degli indici mensili (i) dei dodici mesi dell'anno, ciascuno espresso da:

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$$

mentre β è la funzione cubica dell'indice termico annuale data da:

$$\beta = 0.49239 + (1.792 \cdot 10^{-5} \cdot I) - (771 \cdot 10^{-7} \cdot I^2) + (6.75 \cdot 10^{-9} \cdot I^3)$$

L'evapotraspirazione potenziale media annua ($E_{p_{ma}}$) viene calcolata come somma dei contributi mensili. La successiva stima dell'evapotraspirazione reale mensile (E_{r_m}) avviene attraverso una procedura indiretta, che tiene conto del contenuto d'acqua, che, per ciascun mese, è presente nel suolo in funzione del suo bilancio idrico. Il meccanismo di calcolo è quindi subordinato alla quantità di precipitazione e alla capacità di ritenuta dell'acqua da parte del suolo espressa dalla riserva idrica (*available water capacity*, AWC), legata a sua volta alla capacità di campo ed al punto di appassimento. Applicando il bilancio idrico del suolo di Thornthwaite & Mather, a partire dai valori di P_m e T_m , è quindi possibile valutare E_{r_m} , ma anche il deficit idrico (D) e l'eccedenza idrica o surplus (S), su base mensile e annua. Il surplus rappresenta la quantità d'acqua disponibile al suolo per infiltrazione e ruscellamento e, in prima approssimazione, può essere equiparato alla precipitazione efficace (P_e).

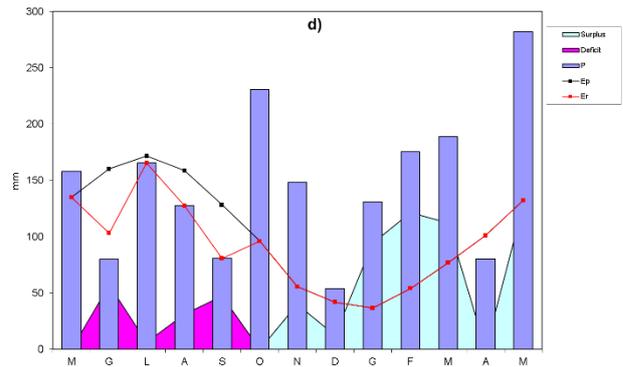
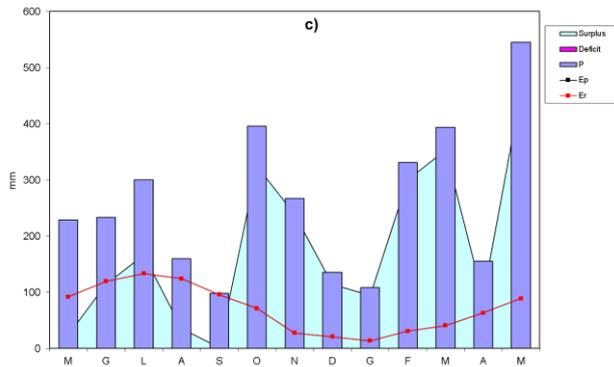
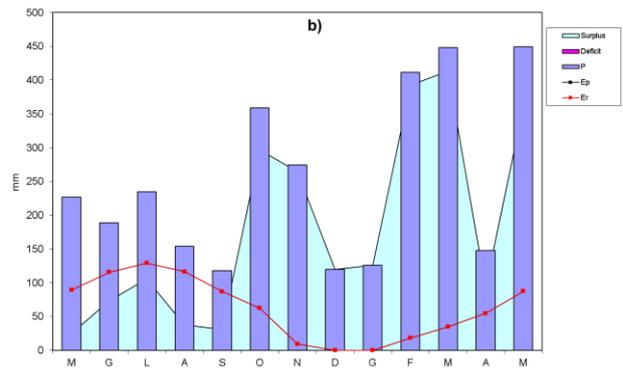
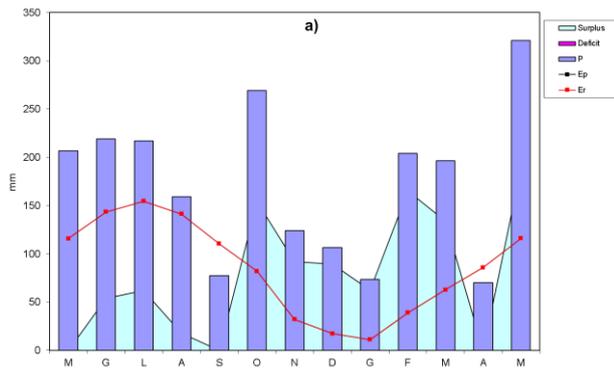
Nel caso specifico, per stimare AWC in corrispondenza di ciascuna stazione meteorologica è stata utilizzata la Carta della Riserva Idrica dei Suoli del Veneto alla scala 1:250,000 (disponibile al link: <https://gaia.arpa.veneto.it/maps/292>). I valori di AWC utilizzati sono compresi tra 187.5 mm e 37.5 mm (Tabella 4-4) e corrispondono ai valori medi delle classi di riserva idrica moderata, bassa e molto bassa individuate dalla cartografia regionale in corrispondenza delle stazioni utilizzate.

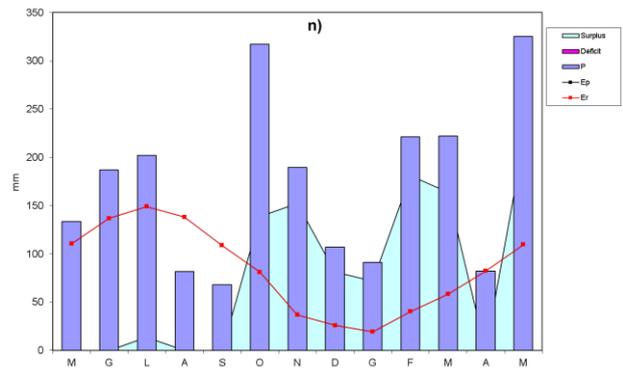
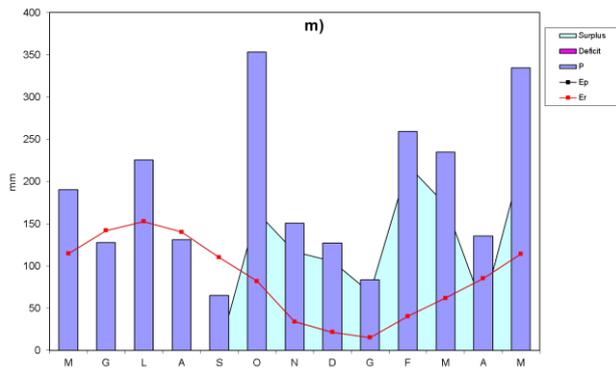
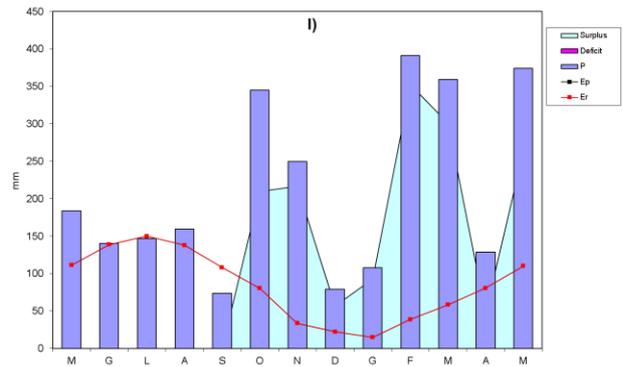
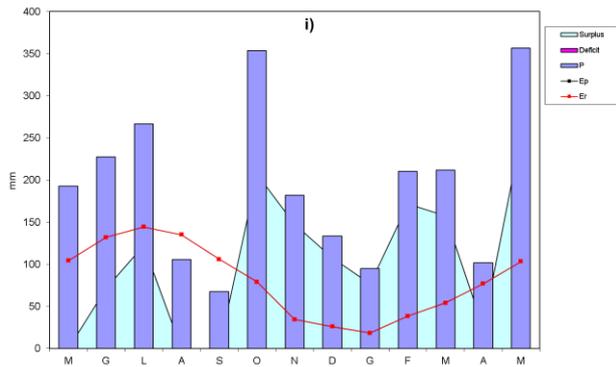
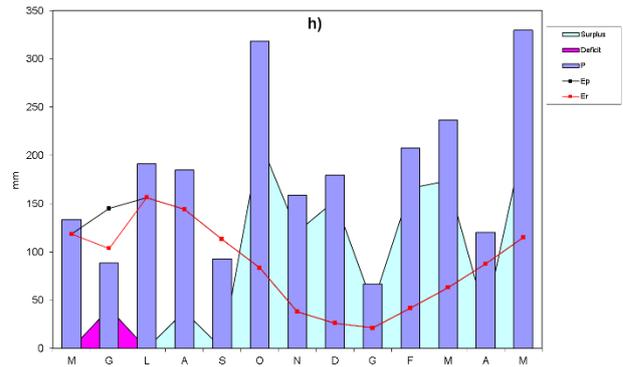
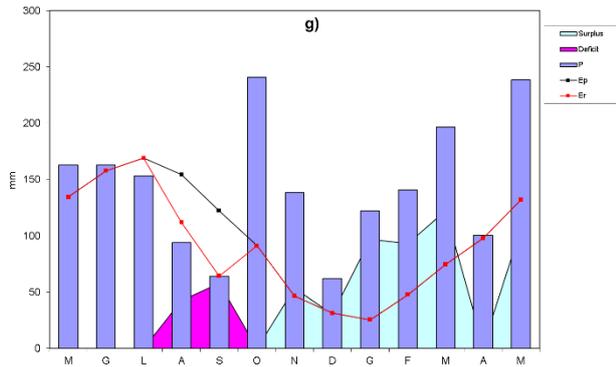
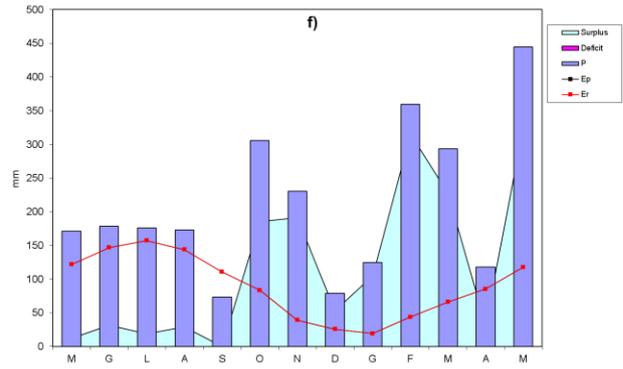
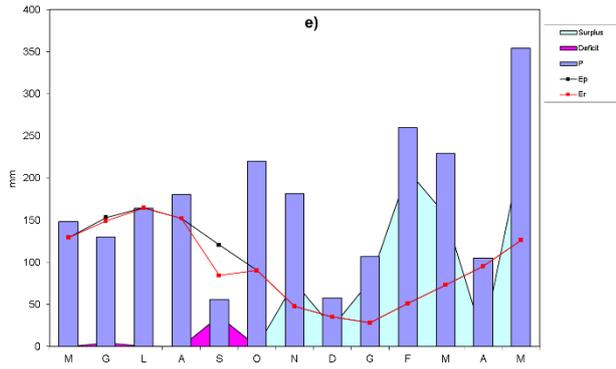
In Tabella 4-4 sono riportati i valori di surplus calcolati per il periodo maggio 2023 – maggio 2024. Essi risultano compresi tra 2340.16 mm e 505.21 mm, con un valore medio di 1598.23 mm. In Figura 4-3 sono mostrati i bilanci idrici calcolati su ciascuna stazione per il periodo in questione. Come si può osservare, soprattutto nella stagione estiva e nelle stazioni a quote meno elevate, l'evapotraspirazione potenziale è superiore alla disponibilità di acqua e si genera deficit idrico.

Infine, la stima del surplus ha richiesto la spazializzazione dei valori puntuali ricostruiti in corrispondenza delle stazioni meteorologiche. Per la spazializzazione è stata utilizzata una funzione di base radiale multiquadratica (*Multiquadratic Radial Basis Function* o RBF; Carlson & Foley, 1992), attraverso il software *Surfer 12* (Golden Software). Il parametro r^2 , associato alla RBF multiquadratica, è stato fissato pari a 0 in modo da rendere il risultato dell'interpolazione dipendente prevalentemente dalla distanza tra le stazioni. In Figura 4-4 sono riportate le distribuzioni di surplus calcolate per il periodo da maggio 2023 a maggio 2024 ed utilizzate per stimare l'infiltrazione nelle simulazioni numeriche che riproducono l'acquifero freatico di fondovalle.

Stazione	AWC (mm)	S 2023-2024 (mm)
Belluno - Aeroporto	112.5	1019.31
Cansiglio - Tramedere	112.5	2340.16
Col Indes - Tambre	112.5	2315.39
Conegliano	187.5	509.07
Farra di Soligo	187.5	780.25
Follina	37.5	1528.08
Gaiarine	187.5	505.21
Longarone	37.5	1159.95
San Martino d'Alpago	112.5	1339.19
Sant'Antonio Tortal	112.5	1540.67
Sospirolo	187.5	1116.81
Torch	112.5	1018.27
Vittorio Veneto	187.5	645.38
Fortogna - Longarone	37.5	1272.93
La Secca	112.5	797.99
Nogarolo di Tarzo	112.5	1135.47
Santa Giustina Bellunese	37.5	1145.71

Tabella 4-4: Valori di surplus (S_m) calcolato nel periodo di monitoraggio dell'acquifero di fondovalle tra maggio 2023 e maggio 2024 sulle stazioni ubicate in prossimità del bacino idrografico della Val Lapisina.





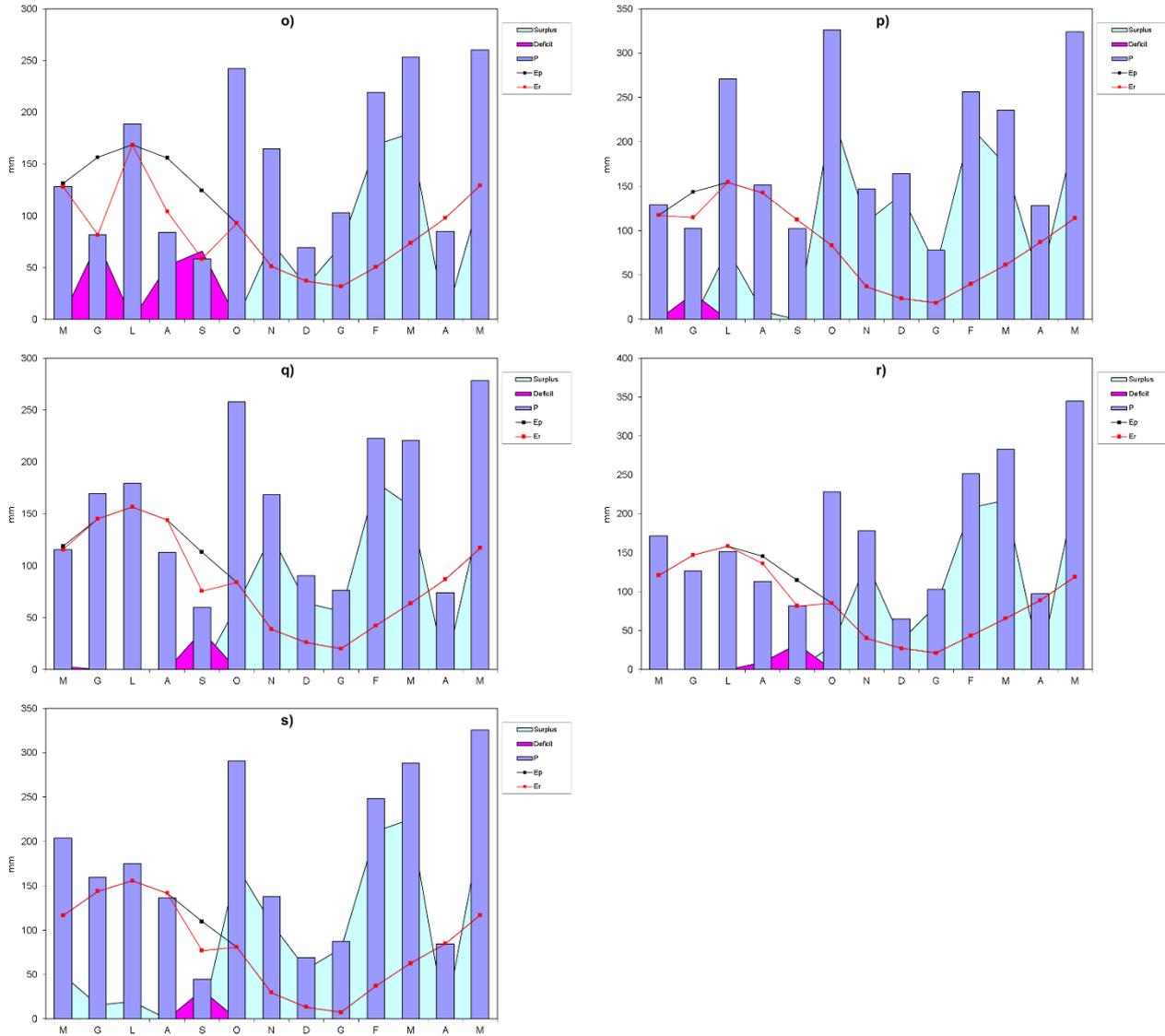
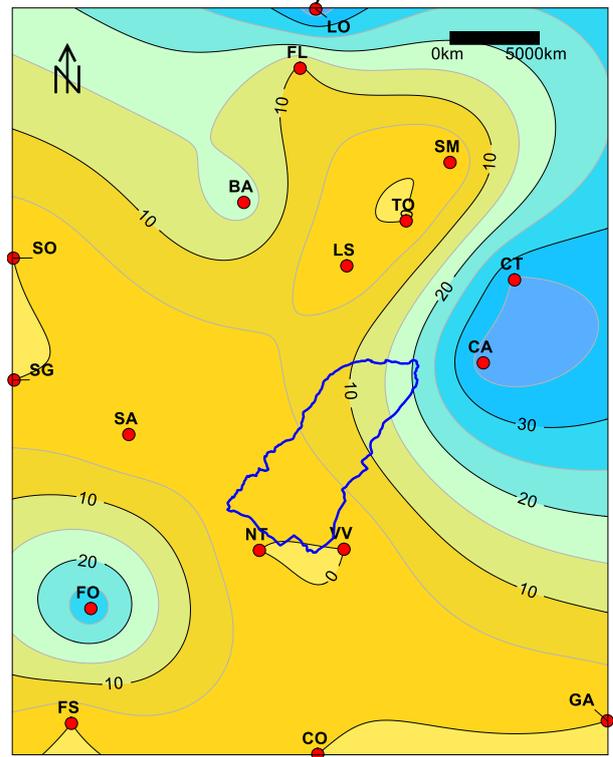
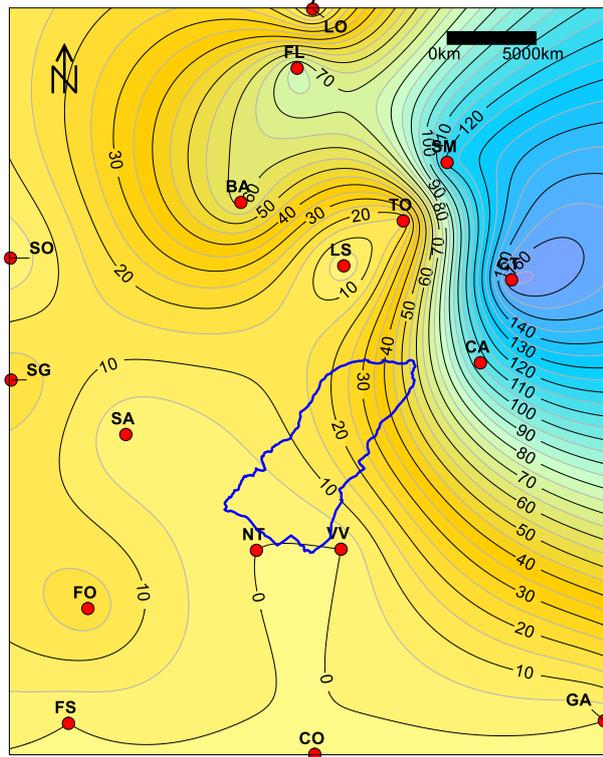
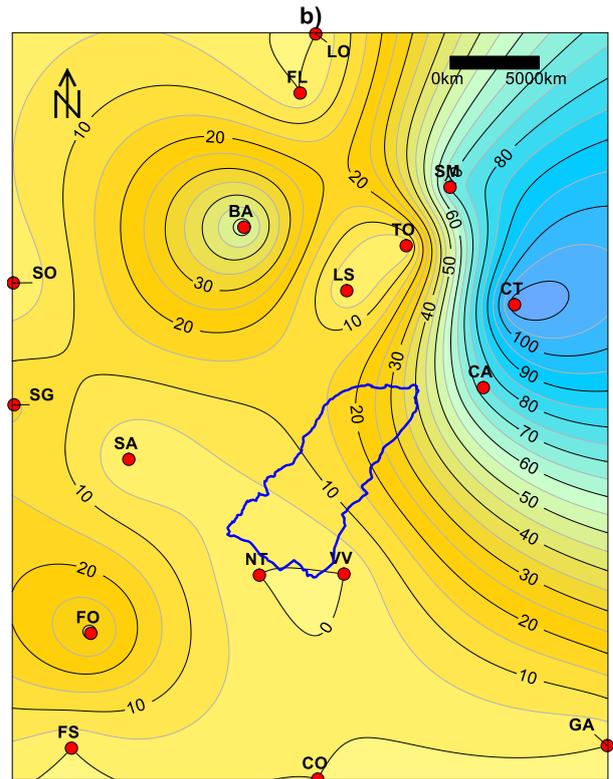
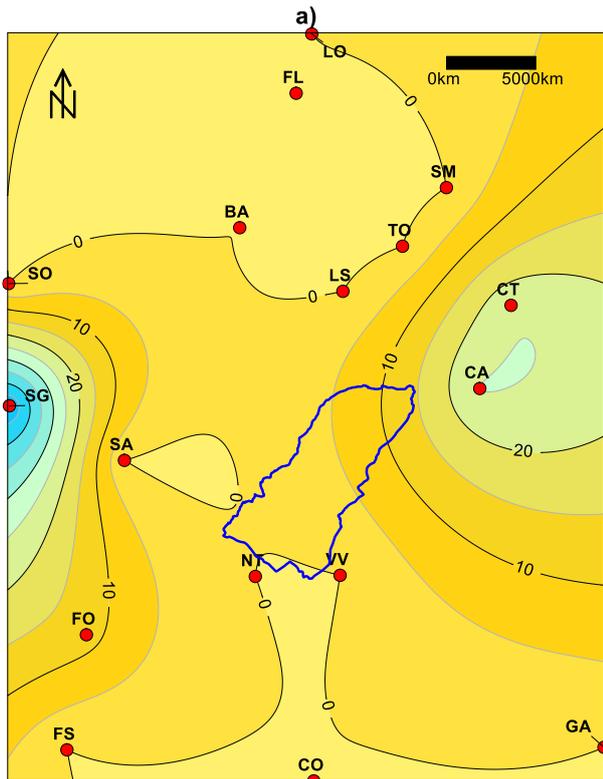
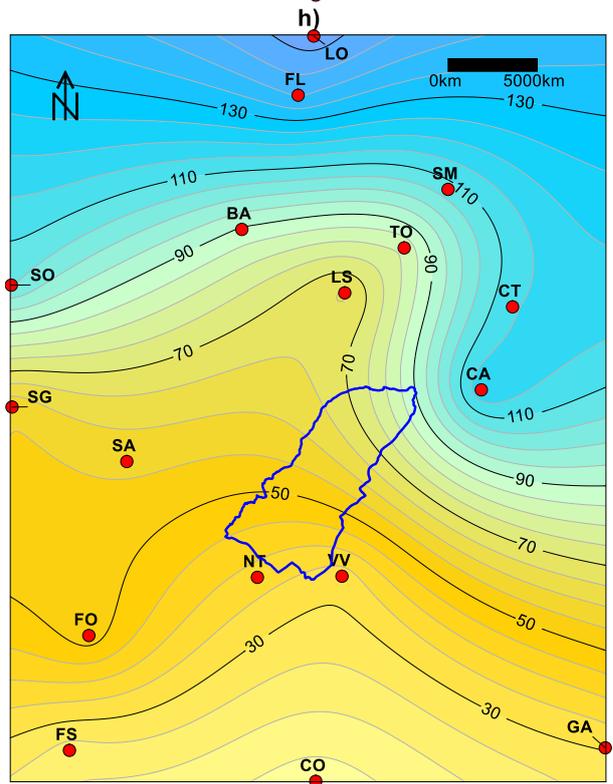
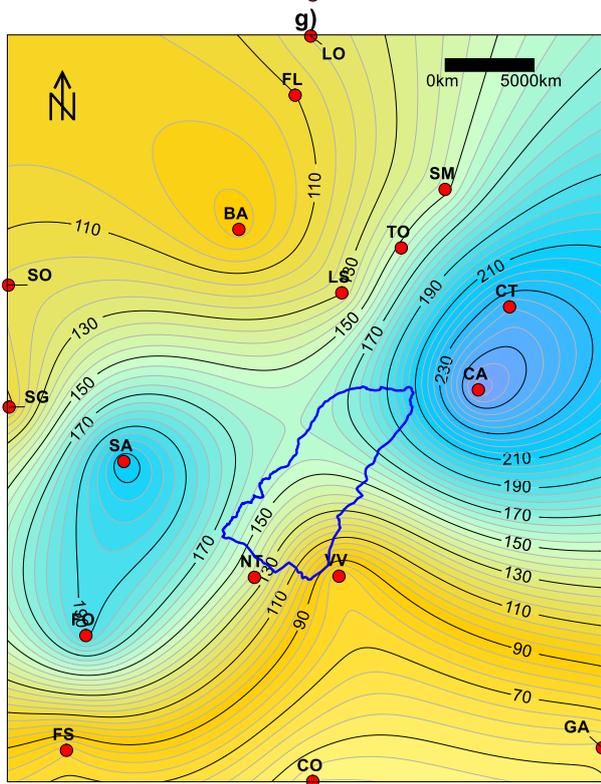
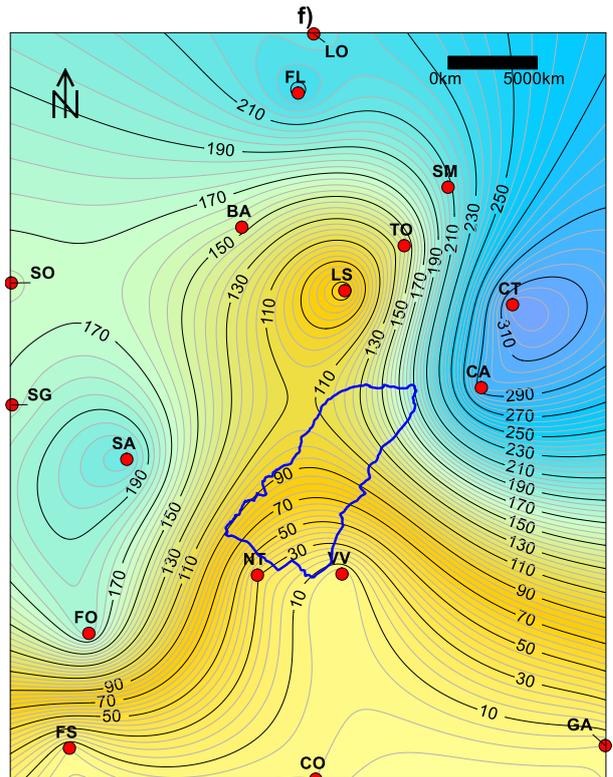
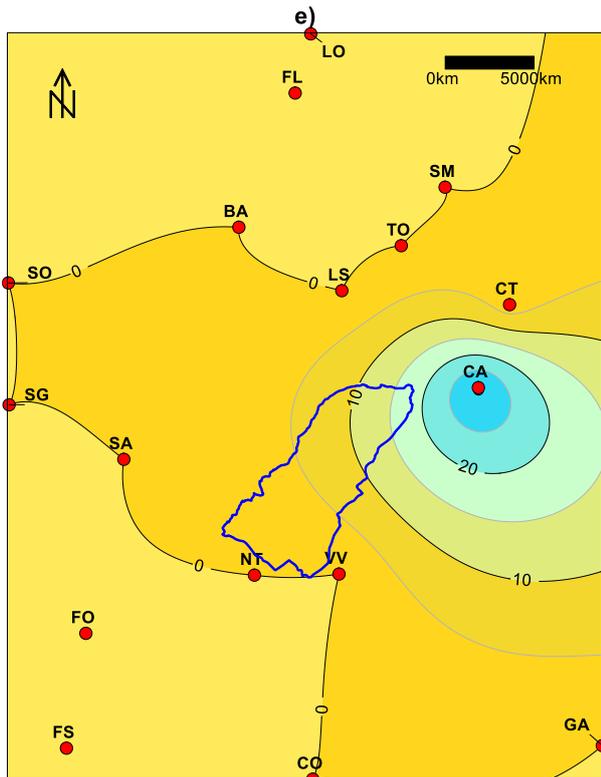
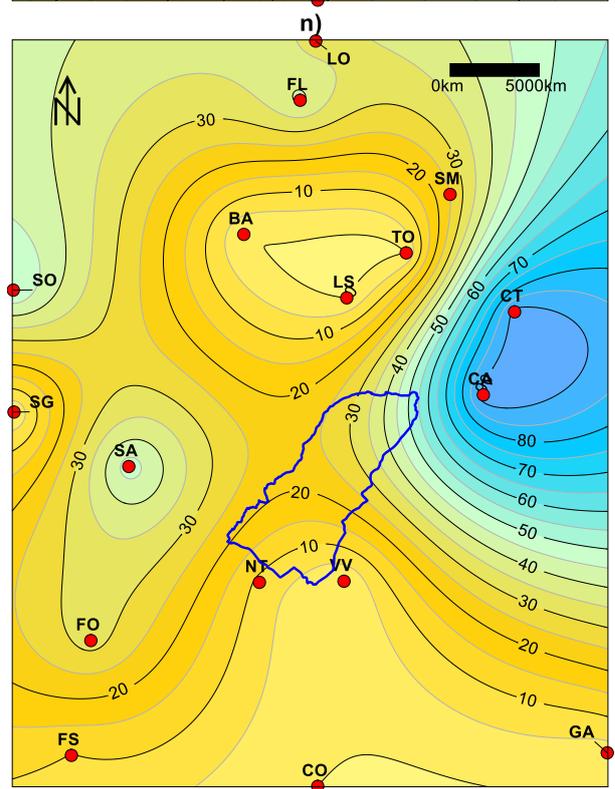
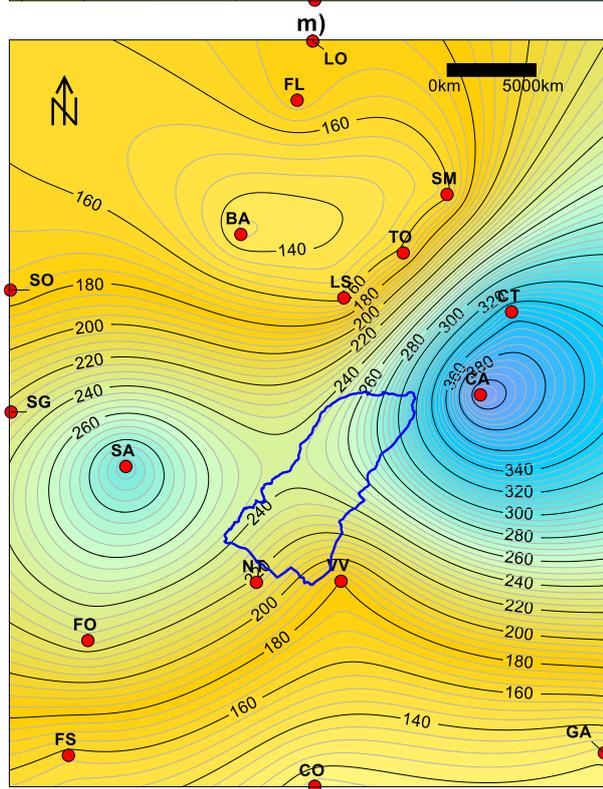
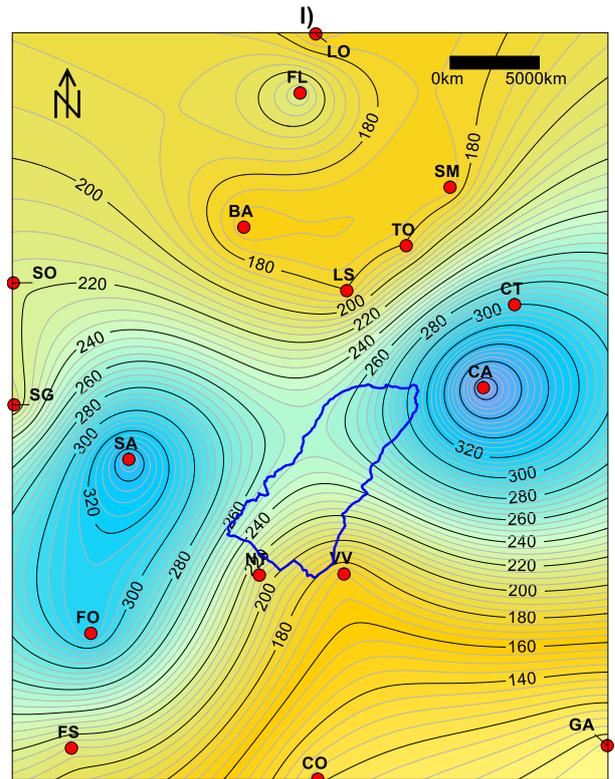
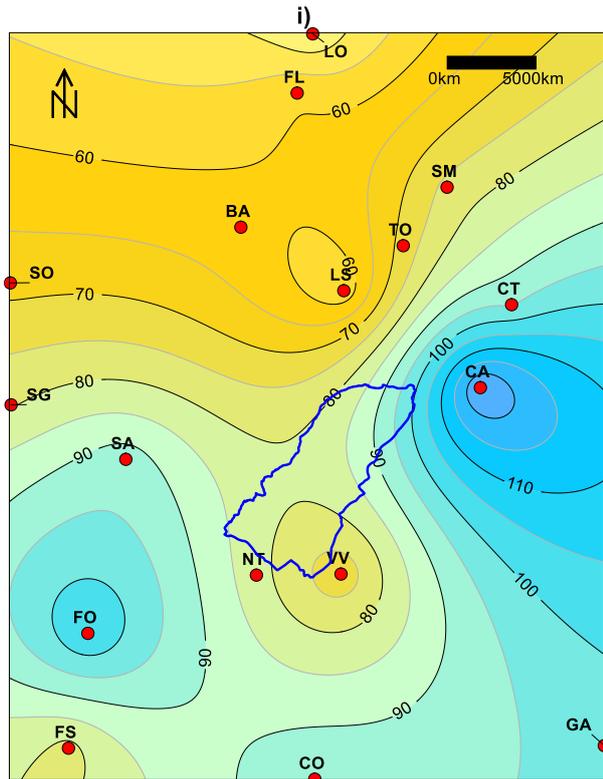


Figura 4-3: : Bilancio idrico del suolo secondo Thornthwaite & Mather nelle stazioni di: a) Belluno – Aeroporto, b) Cansiglio – Tramedere, c) Col Indes – Tambre, d) Conegliano, e) Farra di Soligo, f) Follina, g) Gaiarine, h) Longarone, i) San Martino d’Alpago, l) Sant’Antonio Tortal, m) Sospirolo, n) Torch, o) Vittorio Veneto, p) Fortogna – Longarone, q) La Secca, r) Nogarolo di Tarzo e s) Santa Giustina Bellunese per il periodo maggio 2023 – maggio 2024.







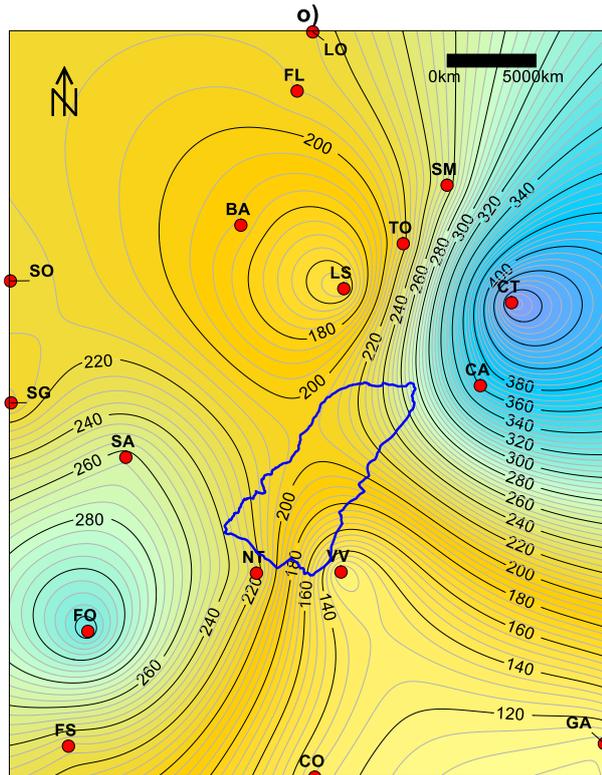


Figura 4-4: Distribuzione del Surplus (in mm/mese) nell'area di studio per i mesi: a) maggio 2023, b) giugno 2023, c) luglio 2023, d) agosto 2023, e) settembre 2023, f) ottobre 2023, g) novembre 2023, h) dicembre 2023, i) gennaio 2024, l) febbraio 2024, m) marzo 2024, n) aprile 2024 e o) maggio 2024.

4.3 Infiltrazione

Per la stima dell'infiltrazione mensile applicata alle simulazioni numeriche, il valore della precipitazione efficace di ciascun mese è stato moltiplicato per un coefficiente di infiltrazione potenziale (χ), secondo:

$$I = P_e * \chi$$

P_e è posto in prima approssimazione pari al surplus mensile, mentre per χ si è deciso di non differenziare questo valore sulla base della litologia di superficie, ma di utilizzare un unico valore per tutto il dominio di modellazione pari al 30%. Questa scelta è dettata dai valori di soggiacenza presenti nell'acquifero freatico di fondovalle, che superano o sono prossimi a 10 m da piano campagna (p.c.). Valori inferiori, si registrano solamente nelle località di Lagusel e Forcal (Par. 2.4). In questo modo, si ammette che all'interno dello spessore insaturo, al di sotto del piano campagna, vi possano essere delle differenziazioni litologiche in grado di incidere sull'infiltrazione.

Il calcolo dell'infiltrazione è stato realizzato sempre mediante l'utilizzo del software *Surfer 12*.

Il valore medio dell'infiltrazione, per il periodo considerato, risulta pari a 479.47 mm.

5 Modello idrogeologico concettuale

La sintesi dei dati idrogeologici raccolti e delle informazioni possedute sul sistema idrogeologico di cui si vuole risolvere uno specifico problema riguardo al flusso delle acque sotterranee confluiscono in un modello idrogeologico concettuale (Kresic & Mikszewski, 2012). Si tratta di un'interpretazione qualitativa del problema affrontato, che integra le informazioni idrogeologiche più rilevanti del sito di interesse, e come tale presenta necessariamente delle semplificazioni rispetto alla realtà (Anderson et al., 2015). Il modello concettuale rappresenta la base di partenza del modello numerico e quest'ultimo risulta tanto più affidabile quanto più il modello concettuale riesce a descrivere in modo accurato le componenti che lo caratterizzano. A sua volta, la bontà del modello concettuale dipende dalla qualità dei dati raccolti.

Il primo aspetto da definire nel modello concettuale sono i limiti del dominio ed i rapporti di dipendenza che esistono tra l'interno e l'esterno dello stesso. La loro corretta definizione è fondamentale in quanto ad essi verranno poi associate delle condizioni al contorno (*boundaries*) nel modello numerico (Par. 6.4). I confini possono essere di tipo idraulico, come ad esempio uno spartiacque potenziometrico o idrografico, o di tipo fisico, come corpi idrici superficiali o strati di roccia impermeabile (Anderson et al., 2015). Nel caso della Val Lapisina, il dominio rappresenta l'acquifero freatico ospitato dai depositi di fondovalle, che può essere delimitato a nord dal Lago Morto, a est e ovest dai fianchi rocciosi della valle costituiti dai versanti del Col Visentin e del Cansiglio, a sud dallo spartiacque idrografico che separa la Val Lapisina dalla Vallata Trevigiana nei pressi dei Laghi di Revine e dalla Stretta di Serravalle, che mette in comunicazione la valle con la pianura.

Il bottom del dominio è rappresentato dal limite impermeabile del bedrock costituito da rocce calcaree mesozoiche (Par. 2.2), la cui profondità variabile è stata individuata per mezzo delle sezioni geologiche (Par 2.2.2), con un massimo di circa 230 m nei pressi del Lago Morto e un minimo di circa 20 m nella parte bassa della valle. Va specificato però che l'andamento del bottom è stato ricostruito su base interpretativa, in quanto l'unico dato diretto riguardante la profondità del bedrock è fornito dal sondaggio per la realizzazione del piezometro nel campo pozzi di Lagusel (Par. 3.2.3), effettuato proprio a tale scopo ed in cui è stato raggiunto il substrato roccioso a una profondità di 65 m dal piano campagna. L'acquifero è ospitato da potenti depositi di frana caotici ed eterometrici nella parte alta del dominio, fino all'affioramento roccioso intravallivo nei pressi della torre di San Floriano, che delimita a sud il Lago del Restello, mentre nella parte bassa lo spessore dell'acquifero diminuisce progressivamente ed è costituito in maggioranza da depositi di origine alluvionale e

fluvioglaciale (Par. 0). I depositi sono formati da materiale a granulometria prevalentemente ghiaiosa e sabbiosa, a cui può essere attribuito un valore medio di conducibilità idraulica (K) pari a $1.00E-03$ m/s che corrisponde a 86.4 m/d. Una zona particolare del dominio, lungo il pendio che da Pian dei Nove degrada verso Lagusel, in cui si trovano le captazioni Belvedere e San Floriano, è costituita molto probabilmente da materiale meno grossolano e meno permeabile e perciò a essa può essere assegnato un valore di conducibilità idraulica di un ordine di grandezza più basso ($1.00E-04$ m/s; 8.64 m/d) (Par. 6.3). Per la porosità, si può assumere un valore medio del 30%, coerente con la granulometria grossolana dell'acquifero, che si riduce al 20% per la zona a permeabilità minore.

Le principali fonti di alimentazione dell'acquifero sono le infiltrazioni dovute alle precipitazioni (Par. 4) e soprattutto i deflussi provenienti dal Lago Morto e dal Lago di Santa Croce. Quest'ultimo riceve parte delle acque del Fiume Piave, convogliate da un canale che parte dalla centrale idroelettrica di Soverzene e successivamente alimenta le tre centrali della Val Lapisina attraverso una serie di condotte, scaricando le sue acque nei tre laghi della valle. Le acque dei laghi filtrano poi attraverso i depositi inconsolidati del fondovalle. La direzione del flusso all'interno dell'acquifero è quindi da nord verso sud secondo la direzione di sviluppo della valle. Altri afflussi provengono dalle vallecole laterali, ma essi risultano molto meno importanti.

L'analisi delle precipitazioni nel periodo maggio 2023-maggio 2024 descritta nel Paragrafo 4 ha fornito un valore medio di precipitazione efficace pari a 1,598.23 mm. Ipotizzando un'infiltrazione del 30%, si stima che 479.47 mm di pioggia abbiano contribuito all'alimentazione dell'acquifero durante il periodo di monitoraggio.

L'importanza fondamentale che il livello idrometrico dei laghi ricopre sull'alimentazione dell'acquifero è stata descritta nel Paragrafo 3 riguardante il monitoraggio idrogeologico, dove in particolare è mostrato lo stretto rapporto fra l'andamento del livello idrometrico del Lago Morto e le variazioni di carico idraulico misurate nei piezometri di fondovalle.

I principali deflussi dall'acquifero sono rappresentati dalla rete idrica superficiale costituita dal Fiume Meschio e dai corsi d'acqua minori, i quali scorrendo sul fondo della valle presumibilmente presentano un comportamento prevalentemente drenante (Par. 6.4); dai pozzi presenti nel fondovalle nelle aree di Lagusel (non in funzione durante il periodo di monitoraggio) e di Borgo Piccin, che nel periodo di monitoraggio compreso fra il 12/04/2023 e il 07/06/2024 hanno emunto una portata media totale di 110.16 L/s corrispondente a $9,517.82$ m³/d (Par. 0); e dalle opere di captazione denominate galleria Belvedere e sorgente San Floriano, che nello stesso periodo hanno drenato dall'acquifero

portate medie rispettivamente di 206.73 L/s e 42.02 L/s, corrispondenti a 1,7861.47 m³/d e 3,630.53 m³/d.

6 Implementazione delle simulazioni numeriche

6.1 Approccio metodologico e obiettivi delle simulazioni

L'obiettivo primario delle simulazioni numeriche è stato quello di riprodurre nel modo più significativo i valori di carico idraulico e di flusso osservati durante la campagna di monitoraggio. Per far questo, sono state implementate due simulazioni di calibrazione, una allo stato stazionario che riproducesse i valori medi di carico idraulico (H) e portata (Q) del periodo compreso fra il 1 maggio 2023 e il 31 maggio 2024, e una allo stato transitorio che riproducesse i valori medi mensili di H e Q nello stesso periodo (13 mesi), utilizzando il codice numerico MODFLOW-NWT (Niswonger et al., 2011).

Una volta calibrato il modello, sono state implementate due simulazioni di tipo predittivo:

- la prima, basata sulla calibrazione allo stato stazionario, che simula la componente advettiva del trasporto di sostanze inquinanti secondo l'approccio della *particle tracking analysis*, utilizzando il codice MODPATH (Pollock, 2016), al fine di delimitare le zone di rispetto per le captazioni d'acqua ad uso idropotabile, soggette al rischio di possibile contaminazione (Par.6.7; Par. 7.2);
- la seconda, basata sulla calibrazione in transitorio, che ricostruisce il comportamento del sistema nei 365 giorni successivi al periodo di monitoraggio, nel caso di uno scenario in cui il Lago Morto viene tenuto costantemente a un livello minimo di 271.5 m s.l.m. (Par. 0).

Per modello numerico si intende un modello matematico *process-based*, che sia in grado cioè di simulare il flusso delle acque sotterranee all'interno di un dominio di modellazione sulla base di principi fisici e approssimando algebricamente le equazioni che li governano (Anderson et al., 2015). I modelli *process-based* possono essere distinti in stocastici o deterministici a seconda delle modalità di assegnazione dei parametri di input. I primi sono caratterizzati dal fatto che almeno uno dei parametri è attribuito attraverso una distribuzione probabilistica, mentre nei secondi i parametri assumono valori fissi. Nel caso delle simulazioni oggetto di questa tesi si è utilizzato l'approccio deterministico.

La scelta del modello matematico più adatto a simulare il problema che si sta affrontando e del codice numerico associato è guidata dagli obiettivi che ci si propone di raggiungere

mediante la simulazione e dal modello idrogeologico concettuale che è stato formulato in via preliminare con le informazioni e i dati di campo in possesso.

I modelli matematici in idrogeologia possono essere raggruppati in tre categorie principali con riferimento alle loro finalità: modelli predittivi, interpretativi e generici.

I modelli predittivi (*forecasting*) sono utilizzati per riprodurre e/o prevedere le conseguenze di determinate azioni o modificazioni del sistema. Per l'implementazione di questo tipo di modelli risulta fondamentale la parte di calibrazione in cui i risultati delle simulazioni vengono comparati con i dati misurati sul campo, andando successivamente a modificare ragionevolmente i parametri di input fino a quando i valori di carico idraulico e/o flusso calcolati non vanno a rappresentare in modo soddisfacente i valori osservati (Anderson et al., 2015).

I modelli interpretativi sono utili per sviluppare una conoscenza preliminare di un sistema idrogeologico, per analizzare i parametri che controllano un determinato fenomeno o per validare ipotesi riguardo al comportamento del sistema. Questo tipo di modello può prevedere la fase di calibrazione, anche se questa non è strettamente necessaria come nei modelli predittivi (Anderson et al., 2015).

I modelli generici, infine, vengono impiegati allo scopo di idealizzare il comportamento dei sistemi idrogeologici e solitamente non vengono calibrati (Anderson et al., 2015).

Un modello numerico è caratterizzato da tre componenti fondamentali. Esso richiede prima di tutto un'equazione costitutiva che descriva il fenomeno fisico all'interno del dominio. In idrogeologia, legge costitutiva è rappresentata dall'equazione di flusso delle acque sotterranee entro un mezzo poroso saturo. Vanno specificate inoltre delle condizioni al contorno (*boundary conditions*) che descrivano il carico idraulico e il flusso ai confini del dominio e i rapporti tra l'interno e l'esterno di esso (ad esempio: infiltrazione, interazione fra acque superficiali e sotterranee, prelievi da pozzo, etc.). Infine, se la simulazione è allo stato transitorio, e prende cioè in considerazione anche il fattore tempo, vanno indicate le condizioni iniziali che descrivono lo stato del sistema all'inizio della simulazione (Anderson et al., 2015).

L'equazione di flusso delle acque sotterranee in un mezzo poroso saturo allo stato transitorio è un'equazione differenziale alle derivate parziali ricavata combinando la Legge di Darcy e il Principio di Conservazione di Massa all'interno di un volume elementare rappresentativo (*representative elementary volume* o REV):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - W$$

K_x , K_y e K_z rappresentano le componenti della conducibilità idraulica lungo gli assi x , y e z di un sistema di riferimento cartesiano, b è il carico idraulico, S l'immagazzinamento e t il tempo. L'utilizzo dell'equazione di flusso è subordinato al rispetto di tre condizioni di validità: il flusso deve verificarsi in condizioni di completa saturazione; la densità dell'acqua deve essere costante e pari a circa $1,000 \text{ kg/m}^3$; il flusso deve avvenire in regime di moto laminare e non turbolento.

I modelli numerici utilizzano una forma approssimata dell'equazione di flusso e, a differenza dei modelli analitici che forniscono una soluzione continua nello spazio e nel tempo, essi calcolano valori di carico idraulico in punti specifici dello spazio chiamati nodi e per specifici intervalli di tempo. Necessitano perciò di discretizzazioni sia spaziali che temporali. I metodi di approssimazione numerica maggiormente utilizzati in idrogeologia dai più comuni codici numerici sono le differenze finite e gli elementi finiti. Nel primo metodo, le derivate parziali dell'equazione vengono sostituite da differenze finite misurabili fra i nodi di una griglia di discretizzazione 3D con celle a forma di cubo o di parallelepipedo. I nodi sono designati mediante indici i, j, k che rappresentano rispettivamente la colonna, la riga e il layer di ciascun nodo (Anderson et al., 2015). I codici numerici alle differenze finite comunemente utilizzati in idrogeologia sono quelli della famiglia MODFLOW sviluppati dall'United States Geological Survey (USGS; Harbaugh et al., 2000).

Nel metodo agli elementi finiti, il dominio di modellizzazione viene suddiviso in elementi identificati da nodi. Gli elementi possono avere diverse forme, ma le più comuni nello spazio tridimensionale sono tetraedri e parallelepipedi. In questo caso la variabile viene calcolata in modo continuo all'interno degli elementi attraverso funzioni di interpolazione (Anderson et al., 2015). Il codice più noto agli elementi finiti è FEFLOW del Danish Hydraulic Institute (DHI).

Per la modellazione dell'acquifero della Val Lapisina si è deciso di utilizzare il codice MODFLOW-NWT (Niswonger et al., 2011), una versione di MODFLOW che utilizza il *Newton-Raphson Solver*, un algoritmo avanzato che è stato introdotto per risolvere problemi complessi legati a condizioni non lineari, come situazioni di flusso non confinato o forti variazioni di saturazione nel terreno. L'interfaccia grafica utilizzata è GMS 10.5 (Groundwater Modeling System) sviluppata da Aquaveo. GMS è un software di *pre-* e *post-processing* che permette di implementare modelli di flusso e di trasporto delle acque sotterranee in mezzi porosi mediante l'utilizzo di diversi codici numerici, fra cui MODFLOW-NWT.

Una volta costruito il modello concettuale, definiti gli obiettivi e scelto di conseguenza il codice più adatto, vi è la fase di implementazione del modello numerico, in cui le

informazioni contenute nel modello concettuale vengono tradotte nel linguaggio del codice di calcolo. Essa comprende i seguenti step:

- individuazione e discretizzazione geometrica del dominio di modellizzazione;
- parametrizzazione delle unità idrogeologiche (permeabilità e immagazzinamento);
- definizione delle condizioni al contorno e delle condizioni iniziali;
- discretizzazione temporale per le simulazioni in transitorio.

Successivamente si passa alla fase di calibrazione e validazione del modello, con il quale, una volta ritenuto accettabile, si possono compiere simulazioni predittive per obiettivi specifici e/o simulazioni di trasporto come nel caso in oggetto.

Ognuna di queste fasi è riportata nel diagramma di flusso illustrato in Figura 6-1 e le modalità con cui si è scelto di affrontarle per il modello della Val Lapisina vengono descritte in dettaglio nei paragrafi seguenti.

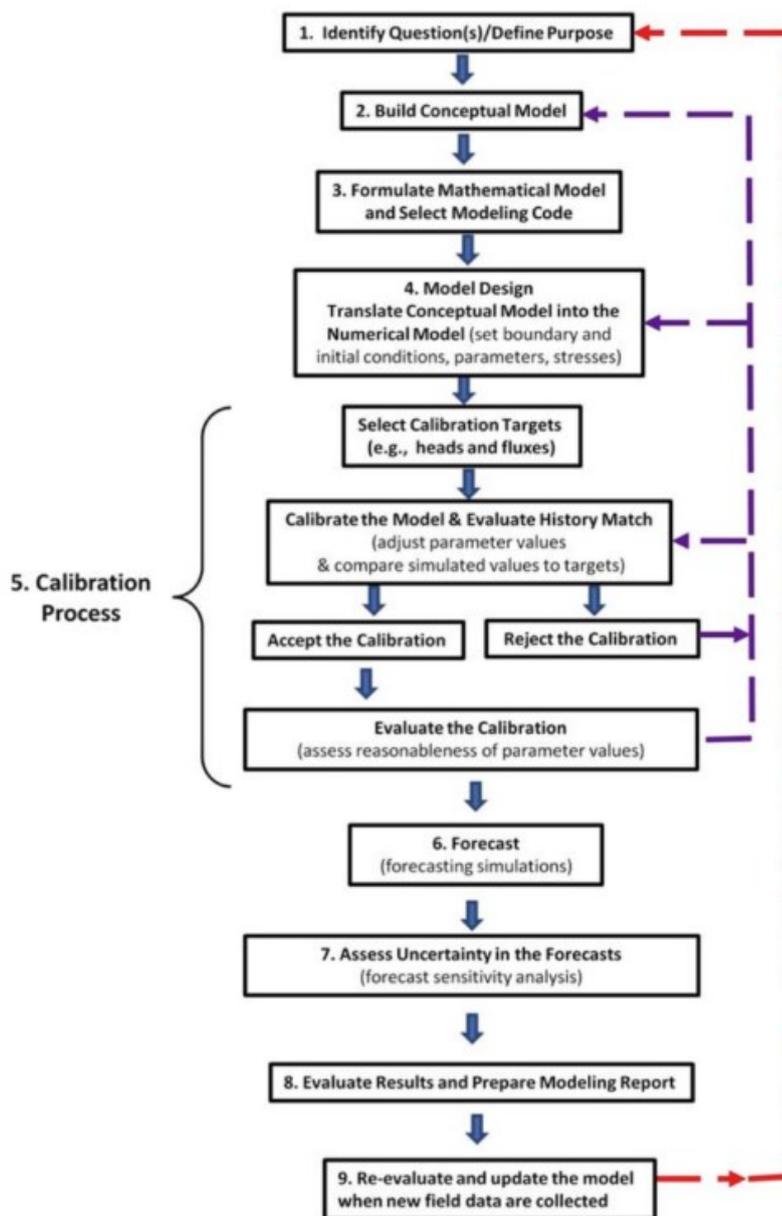


Figura 6-1: Diagramma di flusso per l'implementazione di un modello numerico (Anderson et al., 2015).

6.2 Dominio di modellazione e discretizzazione geometrica

Come anticipato, nei metodi di approssimazione numerica il carico idraulico viene calcolato in un numero di punti definito all'interno del dominio di modellazione (nodi). L'area di interesse individuata dal modello concettuale viene discretizzata attraverso una griglia di nodi a cui vengono poi associate, nei codici alle differenze finite, delle celle. I nodi possono trovarsi al centro di ogni cella (griglia *block-centered*) oppure essere posti ai loro vertici. Nel caso in esame è stata utilizzata una griglia *block-centered*. I valori di carico idraulico sono stati

quindi calcolati nei nodi al centro delle celle, mentre i parametri di input (K e S) sono assegnati all'intera cella.

Il dominio di modellazione dell'acquifero freatico della Val Lapisina prende in considerazione i depositi di frana e fluvioglaciali di fondovalle, fino al limite settentrionale rappresentato dal Lago Morto. La superficie del dominio attivo si estende per poco meno di 5 km² e comprende anche l'estrema porzione orientale della valle, fino allo spartiacque idrografico che la separa dai Laghi di Revine. Per la creazione della griglia, è stato usato come riferimento un rettangolo di 25.5 km² (3 km in larghezza e 8.5 km in lunghezza). Esso è stato poi ruotato di 20° E rispetto al nord, orientandolo secondo la direzione di allungamento della valle in modo tale che la griglia fosse a sua volta orientata secondo la direzione prevalente di flusso delle acque sotterranee (Figura 6-2). All'interno del rettangolo è stata creata una griglia di discretizzazione con celle di dimensione 10 m x 10 m, costituita da un totale di 255,000 celle, organizzate in 850 righe e 300 colonne. Successivamente sono state disattivate le celle esterne al poligono che rappresenta i depositi inconsolidati di fondovalle. Le celle attive risultano quindi 47,715 mentre quelle inattive 207,285 (Figura 6-3). Per quanto riguarda la discretizzazione verticale si è scelto di rappresentare i depositi di fondovalle in cui risiede l'acquifero freatico tramite un solo layer con spessore variabile (Figura 6-4), compreso tra una superficie di bottom ricostruita attraverso le sezioni geologiche (Par. 2.2.2) e il top derivato dal LIDAR della Provincia di Treviso con passo 1 m. Lo spessore delle celle che ne risulta è compreso tra 20 e 230 m.

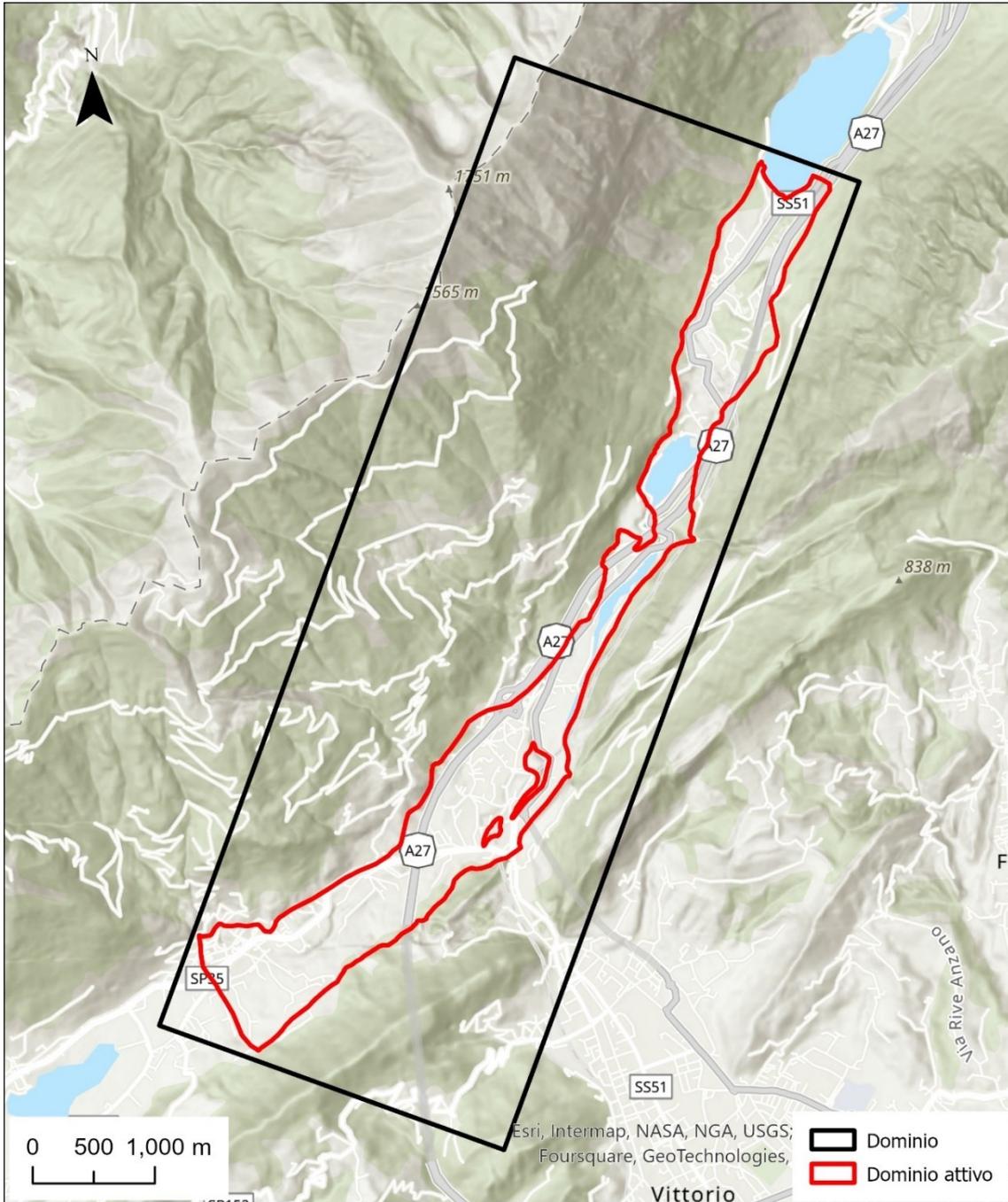


Figura 6-2: Localizzazione del dominio di modellazione.

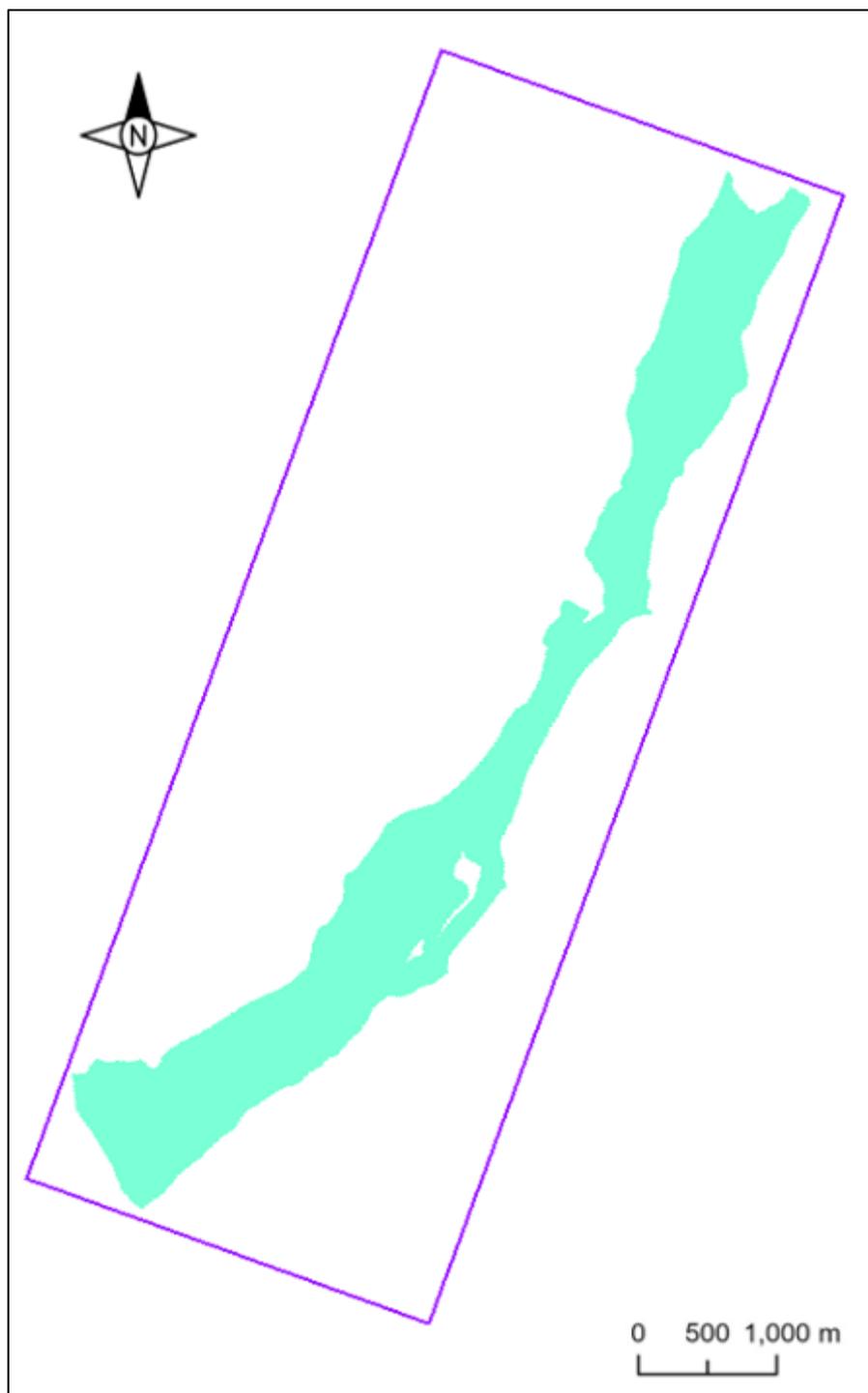


Figura 6-3: Griglia di discretizzazione in vista planimetrica.

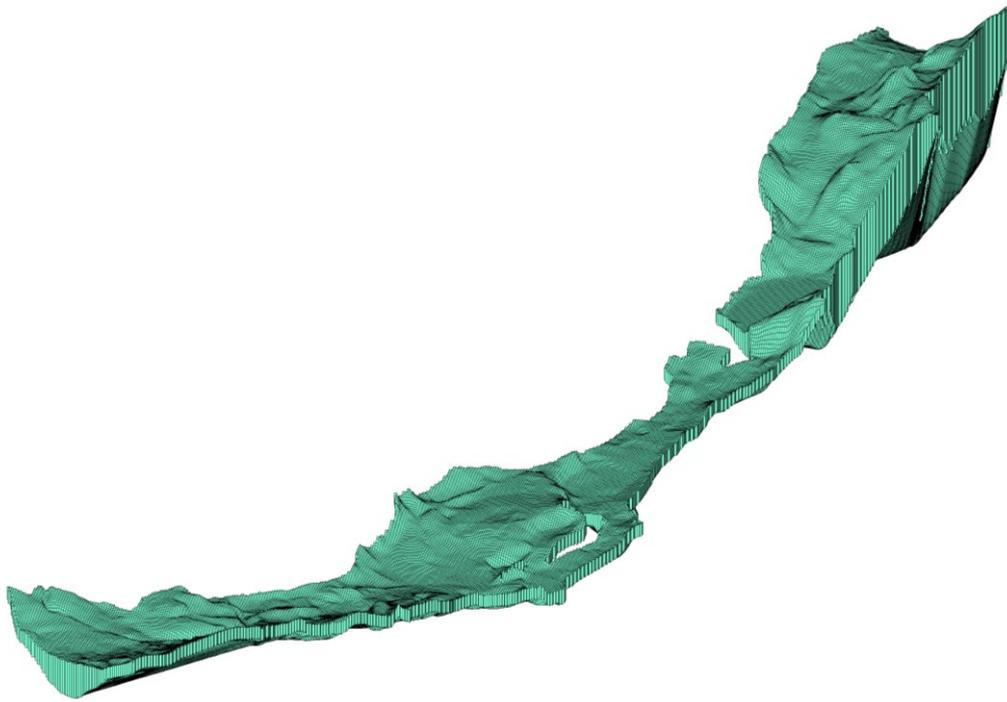


Figura 6-4: Griglia di discretizzazione in vista 3D.

6.3 Parametrizzazione delle unità idrogeologiche

Nelle simulazioni sono stati inseriti come parametri di input la conducibilità idraulica o permeabilità (K) e l'immagazzinamento (S). Per la prima, sono stati assegnati i valori della conducibilità idraulica orizzontale (K_x) e dei suoi rapporti di anisotropia sui piani orizzontale (K_x/K_y) e verticale (K_x/K_z). Per il secondo, invece, trattandosi di un acquifero libero, sono stati assegnati i valori di *specific yield* (S_y) e di immagazzinamento specifico o *specific storage* (S_s) che concorrono alla definizione di immagazzinamento secondo la formula:

$$S = S_y + S_s b$$

con b spessore dell'acquifero.

All'interno del dominio è stata individuata una zona a cui sono stati associati valori dei due parametri diversi dal resto del dominio. In particolare, si tratta del pendio che da Pian dei Nove degrada verso Lagusel (Figura 6-5), all'interno della quale sono collocate le opere drenanti di Belvedere e San Floriano e che presumibilmente è caratterizzato da materiali meno grossolani (Par. 5)

I valori di K_x assegnati inizialmente sono stati di 86.4 m/d per la maggior parte del dominio, per simulare un mezzo poroso grossolano, e di 8.64 m/d per la fascia a minor permeabilità. I rapporti di anisotropia orizzontale e verticale sono stati posti pari a 1 per entrambe le zone.

Per l'immagazzinamento, invece, sono stati assegnati valori di S_y pari a 0.3 e 0.2 rispettivamente per la zona a maggiore e minore permeabilità, coerentemente con i valori di porosità assegnati all'acquifero (Par. 5). Per l'immagazzinamento specifico è stato invece utilizzato un unico valore pari a 0.00001 1/m.

I valori assegnati ai parametri sono riassunti in Tabella 6-1. Essi sono stati successivamente ottimizzati durante il processo di calibrazione (Par. 6.6).

Parametro	Zona 1	Zona 2
Kx (m/d)	86.4	8.64
Kx/Ky (-)	1.0	1.0
Kx/Kz (-)	1.0	1.0
Sy (-)	0.3	0.2

Tabella 6-1: Riepilogo dei valori assegnati ai parametri di conducibilità idraulica e immagazzinamento.

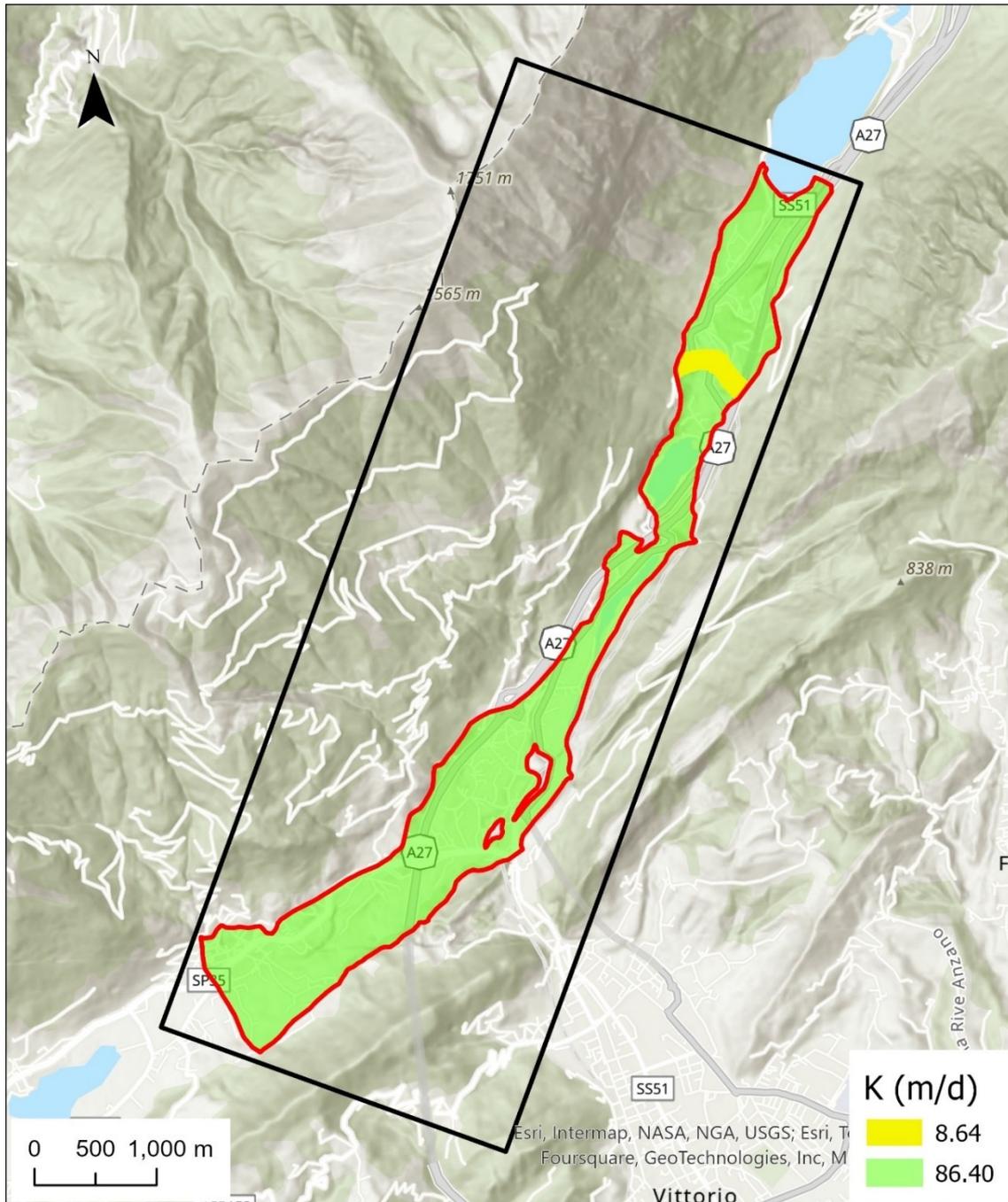


Figura 6-5: Parametrizzazione del dominio con indicate le due zone a diversa permeabilità.

6.4 Condizioni al contorno e distribuzione iniziale di carico idraulico

Le condizioni al contorno sono elementi fondamentali che vengono definiti utilizzando il modello concettuale e che permettono di simulare gli stress idrogeologici applicati al sistema. Esse possono essere di tre tipi (Anderson et al., 2015):

- di 1° tipo o di Dirichlet o di carico assegnato;
- di 2° tipo o di Neumann o di flusso assegnato;

- di 3° tipo o di Cauchy o di flusso dipendente dal carico.

La creazione di una griglia di discretizzazione comporta automaticamente la definizione di sei condizioni del 2° tipo con flusso specificato nullo. Queste possono essere mantenute o eventualmente sostituite con condizioni di altro tipo a discrezione dell'utente.

Le condizioni al contorno in MODFLOW sono attivabili tramite pacchetti (*packages*), i quali sono in grado di simulare diverse interazioni idrogeologiche. I pacchetti utilizzati per il modello in esame sono i seguenti, applicati all'interno o sui bordi del dominio (Figura 6-6):

- CONSTANT HEAD (CHD), condizione del 1° tipo, usata per simulare l'alimentazione del Lago Morto. Come anticipato (Par. 6.2), nel dominio di modellazione è stata compresa solo la sponda meridionale del lago. Esso è stato quindi rappresentato nel modello da una linea spezzata che intercetta le celle più esterne della porzione superiore della griglia, in corrispondenza della sponda. Il livello idrometrico del lago è stato specificato ai nodi estremi della linea ed è pari al valore medio del periodo di monitoraggio, vale a dire 274.33 m s.l.m.
- RECHARGE (RCH), condizione del 2° tipo, rappresenta la ricarica dell'acquifero dovuta all'infiltrazione delle precipitazioni. Essa è una condizione di flusso assegnato in quanto va specificato al codice la portata specifica (in m/d) che entra nel dominio. Il flusso in entrata è considerato come uniformemente distribuito sul lato della cella a cui è applicato, in questo caso il top della cella. I valori della ricarica sono stati assegnati durante la fase di calibrazione (Par. 6.6), a seguito della stima della distribuzione dell'infiltrazione descritta nel Paragrafo 4.3.
- WELL (WEL): condizione del 2° tipo, simula la presenza di pozzi di iniezione o di pompaggio. I parametri che vanno specificati per i pozzi sono il *flow rate*, cioè la portata iniettata o estratta, rispettivamente positiva o negativa, e il *top* e *bottom screen* per delimitare il tratto filtrante. Con questo pacchetto sono stati rappresentati i due pozzi di Borgo Piccin (P1 e P2; Par. 3.3.1) e i tre pozzi di Lagusel (Par. 6.7). La modalità di inserimento dei valori di *flow rate* è descritta nel Paragrafo 6.5 e gli stessi sono illustrati in Tabella 6-3.
- DRAIN (DRN), condizione del 3° tipo, in cui il flusso dipende dalla differenza di carico, in questo modello è stato utilizzato per simulare le captazioni Belvedere e San Floriano e per rappresentare la rete idrografica della valle, costituita dal Fiume Meschio e dagli altri corsi d'acqua minori. Questo pacchetto serve ad estrarre acqua dal dominio secondo la formula:

$$Q = C (h_e - h)$$

Dove Q è la portata drenata in m^3/d , h_e è l'elevazione del dreno (in m), coincidente in questo caso con il livello idrometrico nella rete idrografica, h il carico idraulico nelle celle circostanti (in m) e C la conduttanza (in m^2/d). La conduttanza è data da:

$$C = \frac{K_z}{L} A$$

In cui K_z è la conducibilità idraulica verticale dello strato attraverso cui avviene la filtrazione (m/d), L il suo spessore (in m) ed A la sua area (in m^2).

Il pacchetto DRN richiede l'assegnazione alle celle interessate dei valori di elevazione del dreno e di conduttanza. Per quest'ultima, alla galleria Belvedere è stato inizialmente assegnato un valore di $8,640 \text{ m}^2/\text{d}$, mentre alla captazione San Floriano e ai fiumi un valore di $864 \text{ m}^2/\text{d}$. Questi valori sono stati poi ottimizzati in fase di calibrazione (Par. 6.6). Per quanto riguarda le quote di elevazione dei dreni, sono stati assegnati valori di 218 m s.l.m. per la galleria Belvedere e di 218.8 m s.l.m. per la sorgente San Floriano. La funzione dreno è attiva solo quando il carico idraulico nell'acquifero è superiore alla quota di elevazione del dreno, rappresentando quindi una vera e propria soglia di attivazione, che una volta superata permette il generarsi di un flusso d'acqua proporzionale alla differenza di carico.

- GENERAL HEAD (GHB), condizione del 3° tipo, utilizzata per simulare l'interazione con l'acquifero da parte degli altri due laghi, il Lago del Restello e il Lago di Negrisiola. Anche questo pacchetto permette di rappresentare un flusso dipendente da una differenza di carico e per la sua attivazione vanno specificati i valori di *head stage*, che nel caso dei laghi sono i valori del loro livello idrometrico durante il periodo di monitoraggio (Par.3.1), e il valore della conduttanza, per i laghi posta uguale a $8.64 \text{ m}^2/\text{d}$. Altre due condizioni di GHB sono state utilizzate, lungo i versanti del Col Visentin, per simulare l'alimentazione legata alla circolazione nelle formazioni rocciose che non viene intercettata dalla captazione delle sorgenti Forcal e Negrisiola. Questi due GHB sono stati rappresentati come linee spezzate a cui è stato associato un valore di conduttanza pari a $86.4 \text{ m}^2/\text{d}$, mentre ai nodi estremi sono stati assegnati i valori di *head stage* compatibili con il carico idraulico misurato in VsF e PzN (Par. 3.2) e pari rispettivamente a 192 e 200 m s.l.m. per il GHB presso Forcal e 170 e 175 m s.l.m. per il GHB presso Negrisiola.

Come distribuzione iniziale di carico idraulico, per la simulazione allo stato stazionario è stato utilizzato un unico valore per tutte le celle pari a 350 m s.l.m., mentre per la

simulazione in transitorio è stato usato il risultato dalla simulazione allo stato stazionario. Questo ha permesso di utilizzare una distribuzione di carico idraulico congrua rispetto alle condizioni al contorno e ai parametri di input.

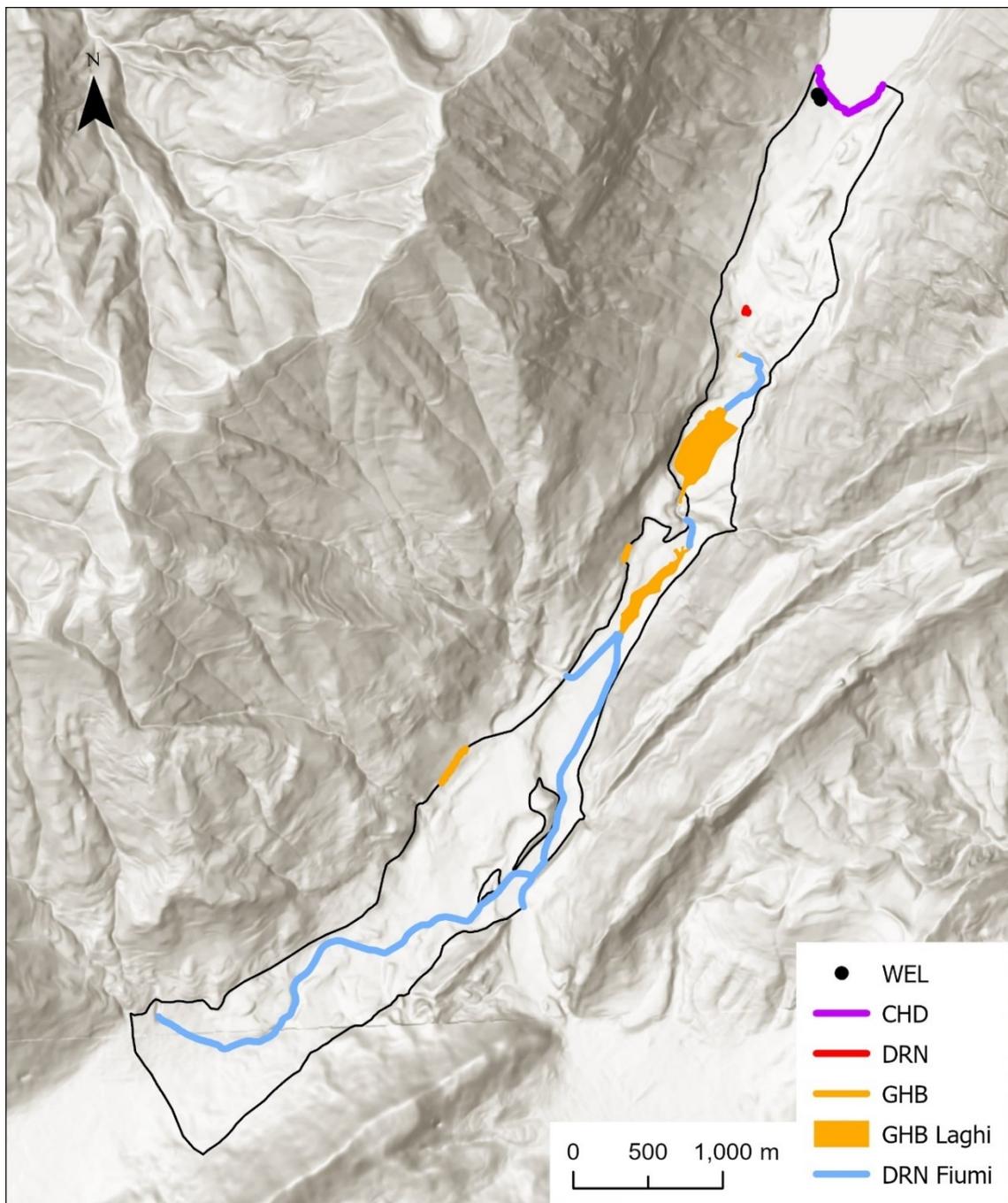


Figura 6-6: Ubicazione delle condizioni al contorno applicate al dominio di modellazione.

6.5 Discretizzazione temporale e metodi risolutivi

Le simulazioni allo stato transitorio introducono il fattore tempo nel modello e prevedono pertanto una discretizzazione anche di tipo temporale.

Per questa simulazione è stata utilizzata come unità di misura del tempo il giorno (d). Il periodo di tempo considerato per la simulazione va dal 01/05/2023 al 31/05/2024 compreso, per un totale di 397 giorni. Questo arco di tempo è stato suddiviso in 14 *stress periods* di durata variabile, di cui il primo, della durata di un giorno, è posto allo stato stazionario, mentre gli altri 13 corrispondono ai 13 mesi di monitoraggio e sono allo stato transitorio. Gli *stress periods* sono periodi all'interno dei quali gli stress applicati al sistema si mantengono costanti.

I dati di base per l'implementazione delle simulazioni in stazionario e transitorio sono i valori di carico idraulico nei piezometri, i livelli idrometrici dei laghi e le portate dai pozzi e dalle opere drenanti misurati durante la campagna di monitoraggio (Par. 3). Le misure orarie sono state aggregate su base mensile utilizzando la media di ogni punto di monitoraggio. I valori medi mensili sono stati poi inseriti nel codice come valori costanti per tutta la durata di ciascuno degli *stress periods*.

Per quanto riguarda i livelli idrometrici dei laghi, i valori medi mensili rappresentano i valori transitori di *head stage* per le rispettive condizioni di *general head boundaries* (GHB; Tabella 6-2). In modo simile, le portate emunte dai pozzi di Borgo Piccin sono state inserite come valori transitori di *flow rate* per i pacchetti *well* (WEL; Tabella 6-3).

I valori di carico idraulico misurati nei piezometri e le portate misurate nella galleria drenante Belvedere e nella captazione San Floriano sono invece stati inseriti nel modello come valori di carico e flusso osservati e costituiscono il *dataset* di valori su cui è stato basato il processo di calibrazione descritto nel prossimo paragrafo.

Infine, allo stato transitorio sono stati inseriti, per ogni *stress period*, i valori di ricarica calcolati a partire dai valori di surplus mensile (Par. 4.3).

Mese	L Morto (m slm)	L Restello (m slm)	L Negrisiola (m slm)
stz	274.33	178.15	161.12
mag-23	274.22	178.22	161.13
giu-23	274.93	178.13	161.13
lug-23	275.10	178.29	161.12
ago-23	274.90	178.26	161.13
set-23	275.08	178.26	161.13
ott-23	274.74	178.13	161.13
nov-23	274.56	177.79	161.12
dic-23	274.69	178.14	161.12
gen-24	275.00	177.89	161.12
feb-24	273.17	178.21	161.11
mar-24	273.47	178.05	161.12
apr-24	273.74	178.22	161.13
mag-24	273.67	178.06	161.12

Tabella 6-2: Valori medi mensili del livello idrometrico dei laghi nel periodo maggio 2023-maggio 2024. La riga evidenziata si riferisce allo stato stazionario e rappresenta i valori medi calcolati sull'intero periodo di monitoraggio (aprile 2023-giugno 2024).

Mese	Q P1 BP (m ³ /d)	Q P2 BP (m ³ /d)
stz	-4282.87	-5234.62
mag-23	-4325.22	-5286.38
giu-23	-4428.23	-5412.28
lug-23	-4424.61	-5407.86
ago-23	-4403.46	-5382.00
set-23	-4415.76	-5397.04
ott-23	-4348.13	-5314.38
nov-23	-4354.73	-5322.45
dic-23	-4351.18	-5318.11
gen-24	-4359.44	-5328.21
feb-24	-4056.65	-4958.12
mar-24	-4100.43	-5011.64
apr-24	-4119.79	-5035.30
mag-24	-4108.08	-5020.99

Tabella 6-3: Valori medi mensili della portata emunta dai pozzi di Borgo Piccin (P1 e P2) nel periodo maggio 2023-maggio 2024. La riga evidenziata si riferisce allo stato stazionario e rappresenta i valori medi calcolati sull'intero periodo di monitoraggio (aprile 2023-giugno 2024).

6.6 Strategia di calibrazione, punti di controllo ed indicatori statistici della calibrazione

La fase successiva all'implementazione del modello riguarda il processo di calibrazione. La calibrazione è una fase fondamentale per verificare e/o dimostrare l'affidabilità del modello implementato, cioè quanto quest'ultimo sia in grado di riprodurre i valori misurati di carico idraulico e/o flusso, i quali costituiscono gli obiettivi o *target* di calibrazione.

Le simulazioni condotte con il codice numerico scelto sono affrontate come un problema diretto (*forward problem*), in cui i parametri che rappresentano le proprietà dell'acquifero, come conducibilità idraulica e immagazzinamento, sono specificate dall'inizio, mentre i carichi e i flussi vengono calcolati al termine della procedura. Un processo di calibrazione invece può essere impostato come un problema inverso (*inverse problem*), in cui i dati di partenza sono i valori di carico idraulico e flusso osservati sul campo, dai quali si vuole ottenere il set di parametri e condizioni al contorno che meglio approssima le misure a disposizione (Anderson et al., 2015).

In effetti, i valori misurati sul campo possiedono un livello di confidenza più elevato rispetto ai parametri idrogeologici dell'acquifero, i quali spesso sono difficili da determinare direttamente. Un problema inverso può essere risolto con un approccio di *history matching* (Anderson et al., 2015), che si basa sul confronto diretto tra carichi e flussi osservati e calcolati in punti omologhi del dominio. I passaggi fondamentali previsti da questo approccio comprendono:

- l'individuazione dei punti di controllo con il relativo valore misurato;
- la stima dei parametri di input da utilizzare inizialmente nelle simulazioni e la definizione di un loro range di variazione;
- il confronto dei valori simulati con i valori osservati (*target* di calibrazione) ai punti di controllo;
- l'aggiustamento dei valori dei parametri di input al fine di ottenere il migliore adattamento fra valori simulati e *target* di calibrazione;
- la selezione del modello con l'adattamento migliore e con valori plausibili dei parametri di input.

Il processo di *history matching* (o calibrazione quantitativa) può essere di tipo manuale (o *trial & error*) se l'utente modifica di volta in volta i parametri di input fino a quando i *target* di calibrazione non vengono riprodotti con sufficiente approssimazione statistica, oppure di

tipo automatico se la calibrazione è condotta mediante l'utilizzo di specifici algoritmi numerici.

La calibrazione quantitativa si basa sull'elaborazione statistica dei residui (R_i in m), determinati come differenza tra il valore calcolato in una simulazione (X_{cal}) e il valore osservato nello stesso punto del dominio (X_{obs}), secondo la formula:

$$R_i = X_{cal} - X_{obs}$$

Per valutare la qualità della calibrazione, il parametro statistico che viene più comunemente utilizzato è lo scarto quadratico medio normalizzato (nRMS, in %), definito come lo scarto quadratico medio dei residui (RMS, in m) diviso per la massima differenza tra i valori osservati, secondo le formule:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i^2}$$
$$nRMS = \frac{RMS}{X_{obsmax} - X_{obsmin}}$$

La calibrazione è considerata accettabile se il valore di nRMS è inferiore al 10%.

I punti di controllo (*observations*) utilizzati per le simulazioni sono i 6 piezometri di fondovalle per il carico idraulico (Vasca Forcal, Negrisiola, Lagusel, Pz1 Pian dei Nove, Pz2 Pian dei Nove e Borgo Piccin; Par. 3.2) e le due opere di captazione Belvedere e San Floriano per i flussi (Par. 3.3.2). I dati registrati su base oraria durante il monitoraggio idrogeologico nei piezometri e nelle opere drenanti sono stati aggregati su base mensile ed è stato ricavato il valore medio di ogni mese da maggio 2023 a maggio 2024 per la calibrazione della simulazione in transitorio (Par. 6.5), oltre al valore medio totale riferito all'intero periodo di monitoraggio per la calibrazione della simulazione allo stato stazionario (Tabella 6-4 e Tabella 6-5). Questi valori rappresentano i *target* di calibrazione.

Mese	HVsF (m slm)	HPzN (m slm)	HPzL (m slm)	HPz1 (m slm)	HPz2 (m slm)	HBP (m slm)
stz	185.85	174.70	205.31	257.26	273.45	274.02
mag-23	185.80		204.91	257.04	273.11	273.72
giu-23	185.77		205.37	257.46	273.92	274.49
lug-23	185.77		205.39	257.48	274.02	274.64
ago-23	185.78		205.39	257.45	273.85	274.46
set-23	185.77		205.44	257.54	273.99	274.64
ott-23	185.84		205.38	257.42	273.68	274.31
nov-23	186.16		205.54	257.46	273.69	274.20
dic-23	185.79		205.37	257.33	273.74	274.35
gen-24	185.83		205.46	257.47	273.97	274.59
feb-24	185.96	175.46	205.02	256.74	272.35	272.86
mar-24		174.84	205.28	256.99	272.72	273.18
apr-24		174.60	205.25	257.00	272.91	273.44
mag-24		174.64	205.22	256.98	272.81	273.36

Tabella 6-4: Valori medi mensili di carico idraulico nei punti di controllo nel periodo maggio 2023-maggio 2024. La riga evidenziata si riferisce allo stato stazionario e rappresenta i valori medi calcolati sull'intero periodo di monitoraggio (aprile 2023-giugno 2024).

Mese	Q Belvedere (m ³ /d)	Q San Floriano (m ³ /d)
stz	17861.78	3630.55
mag-23	15589.06	2566.27
giu-23	19977.05	4283.48
lug-23	20541.82	4392.29
ago-23	20110.78	4277.12
set-23	21584.98	4520.81
ott-23	21018.16	4250.69
nov-23	20732.64	4561.41
dic-23	18866.4	4011.8
gen-24	20086.86	4417.24
feb-24	13791.56	2470.43
mar-24	15063.99	2966.81
apr-24	14388.28	2903.36
mag-24	14182.24	2785.68

Tabella 6-5: Valori medi mensili di portata nei punti di controllo nel periodo maggio 2023-maggio 2024. La riga evidenziata si riferisce allo stato stazionario e rappresenta i valori medi calcolati sull'intero periodo di monitoraggio (aprile 2023-giugno 2024).

Le simulazioni di calibrazione implementano i valori della ricarica zenitale, che rappresenta l'infiltrazione dovuta alle precipitazioni (Par. 4). Per le simulazioni allo stato stazionario è stato inserito il valore di ricarica medio riferito all'intero periodo di monitoraggio, mentre allo stato transitorio sono stati assegnati i valori di ricarica medi mensili, ottenuti secondo quanto descritto nel Par. 4.3.

Per quanto riguarda i parametri di input, si è deciso di agire, in particolare, sui valori di conducibilità idraulica (K) e sui valori di conduttanza (C) dei dreni rappresentanti le captazioni Belvedere e San Floriano e dei GHB utilizzati per simulare la ricarica laterale proveniente dai versanti (Par. 6.4). In fase di implementazione, per questi parametri erano stati assegnati inizialmente i valori indicati in Tabella 6-6.

Per la calibrazione del modello allo stato stazionario, si è agito inizialmente con un approccio manuale, variando secondo tentativi successivi i valori e cercando di diminuire la differenza fra carichi e flussi calcolati e osservati. Questi tentativi non hanno portato a risultati soddisfacenti, pertanto si è passati a una calibrazione di tipo automatico, procedendo a una simulazione inversa di tipo automatico attraverso l'ausilio del codice PEST ver. 14.0 (Doherty, 2015). Sono stati quindi assegnati dei valori iniziali e un possibile range di variazione degli stessi, così come illustrato in Tabella 6-6. Partendo da questi input, il software calcola iterativamente la soluzione con il minor errore e fornisce una stima dei parametri. La simulazione che ha prodotto i risultati migliori, allo stato stazionario, ha fornito i valori dei parametri riportati in Tabella 6-7. Il confronto fra valori di carico idraulico calcolati e osservati permette di ottenere un valore di nRMS del 5.63% (Tabella 6-8) Per quanto riguarda i flussi, il calcolo dell'nRMS non è molto significativo in quanto i punti di controllo sono solamente due. I valori calcolati sono però molto prossimi a quelli osservati, con dei residui pari a 185.35 m³/d per la galleria Belvedere e -39.95 m³/d per la sorgente San Floriano (Tabella 6-9). Questi risultati permettono di considerare accettabile la calibrazione per la simulazione allo stato stazionario. In Figura 6-7 è visualizzato lo *scatter plot* dei valori di carico idraulico calcolato in confronto con quelli osservati, in cui è possibile valutare la qualità della calibrazione e l'andamento dei residui rispetto alla retta di identità costituita dalla diagonale del grafico.

Parametro	Valore iniziale	Range variazione
Kx_Zona 1 (m/d)	86.4	0.001÷10000
Kx_Zona 2 (m/d)	8.64	0.001÷10000
C_DRN_Belvedere (m²/d)	8640	0.0001÷10000
C_DRN_San_Floriano (m²/d)	864	0.0001÷10000
C_GHB_Forcal (m²/d)	86.4	0.0001÷10000
C_GHB_Negrisiola (m²/d)	86.4	0.0001÷10000

Tabella 6-6: Valori iniziali e relativo range di variazione dei parametri oggetto di calibrazione.

Parametro	Valore calibrato
Kx_Zona 1 (m/d)	403.78
Kx_Zona 2 (m/d)	56.00
C_DRN_Belvedere (m ² /d)	69.72
C_DRN_San_Floriano (m ² /d)	79.09
C_GHB_Forcacal (m ² /d)	10000.00
C_GHB_Negrisiola (m ² /d)	10000.00

Tabella 6-7: Valori dei parametri ottenuti con l'approccio di calibrazione automatica.

ID	H calc (m slm)	H obs (m slm)	Ri (m slm)
Vasca Forcal	180.46	185.85	-5.39
Pz_Borgo Piccin	273.57	274.02	-0.45
Pz2 Pian dei Nove	270.18	273.45	-3.27
Pz1 Pian dei Nove	252.63	257.26	-4.63
Pz_Lagusel	196.18	205.31	-9.13
Pz_Negrisiola	168.14	174.7	-6.56
INDICATORI STATISTICI			
RM (m)		-4.91	
ARM (m)		4.91	
RMS (m)		5.59	
nRMS (%)		5.63%	

Tabella 6-8: Riepilogo dei valori di carico idraulico calcolati e osservati nei punti di controllo, dei rispettivi residui e dei principali indicatori statistici (media dei residui, RM; media assoluta dei residui, ARM; scarto quadratico medio, RMS; scarto quadratico medio normalizzato, nRMS) per la calibrazione allo stato stazionario.

ID	Q calc (m ³ /d)	Q obs (m ³ /d)	Ri (m ³ /d)
Belvedere	17975.06	18160.41	-185.35
San Floriano	3766.45	3726.50	39.95

Tabella 6-9: Riepilogo dei valori di portata calcolati e osservati nei punti di controllo e dei rispettivi residui per la calibrazione allo stato stazionario.

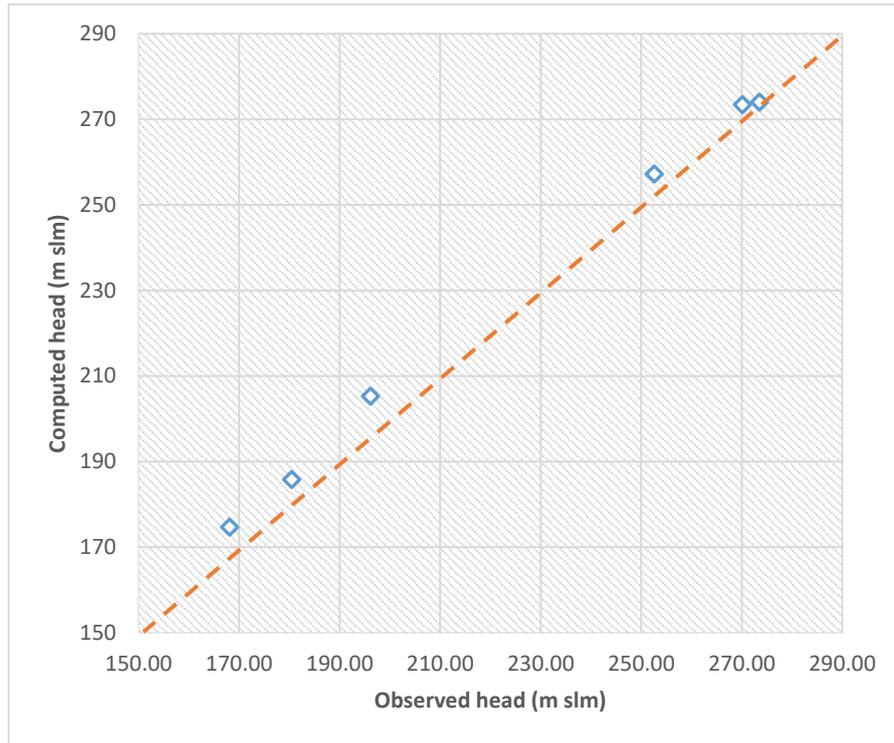


Figura 6-7: Scatter plot della calibrazione del carico idraulico allo stato stazionario.

Per la calibrazione del modello allo stato transitorio, sono stati utilizzati i valori dei parametri ottenuti dalla calibrazione allo stato stazionario riportati in Tabella 6-7, a cui sono aggiunti i valori di potenzialità specifica (S_y) attribuiti alle due zone di conducibilità idraulica, rispettivamente pari a 0.3 e 0.2. Questi valori sono risultati quelli definitivi anche per la calibrazione in transitorio. Infatti, per il carico idraulico, il confronto fra i valori calcolati e osservati nei punti di controllo, riportati in Tabella 6-4, ha fornito un nRMS del 5.46%, calcolato prendendo in considerazione i residui di tutti e 6 i punti di controllo per tutti i 14 *stress periods* della simulazione. Per il flusso è stato invece ottenuto un valore di nRMS dell'8.96%, confrontando i valori di portata calcolati con i *target* riportati in Tabella 6-5. Questi risultati, illustrati in Tabella 6-10, hanno permesso di ritenere accettabile anche la calibrazione allo stato transitorio. In Figura 6-8 e in Figura 6-9 sono visualizzati gli *scatter plot* rispettivamente del carico idraulico e del flusso.

INDICATORI STATISTICI SIMULAZIONE IN TRANSITORIO		
	Carichi idraulici H (m)	Flussi Q (m ³ /d)
n° valori	72	28
RM	-4.64	-5.94
ARM	4.64	5.94
Xobsmax-Xobsmin	100.04	19114.55
RMS	5.46	1711.84
nRMS	5.46%	8.96%

Tabella 6-10: Riepilogo dei principali indicatori statistici per la calibrazione di carichi e flussi allo stato transitorio.

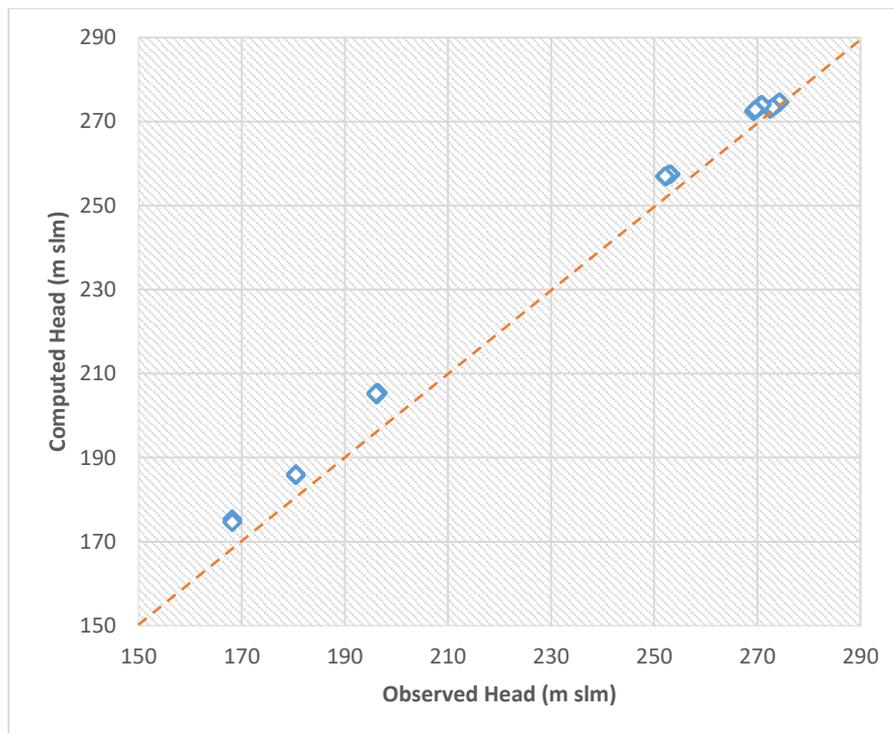


Figura 6-8: Scatter plot della calibrazione del carico idraulico allo stato transitorio.

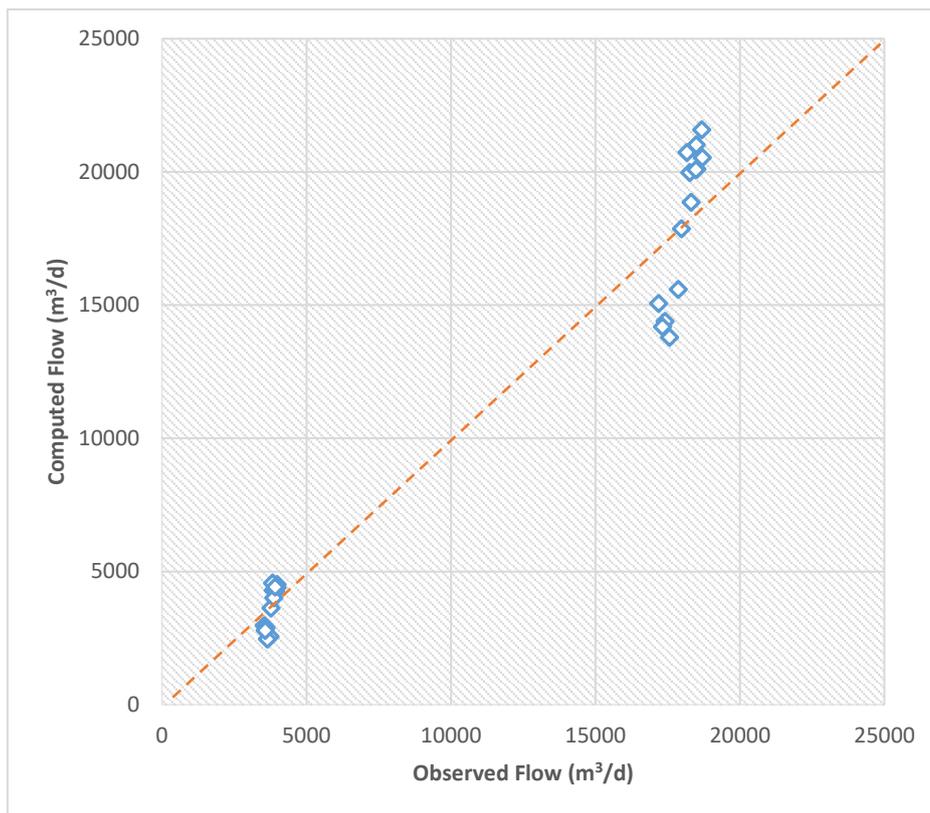


Figura 6-9: Scatter plot della calibrazione dei flussi allo stato transitorio.

6.7 Simulazione della componente advettiva del trasporto e normativa di riferimento

I meccanismi di trasporto di massa non reattivi di soluti o di sostanze inquinanti nei mezzi porosi saturi sono tre: advezione, diffusione e dispersione meccanica. Quasi sempre essi agiscono contemporaneamente sommando i loro effetti. I codici numerici per la modellazione tridimensionale dei percorsi di migrazione delle particelle (*particle tracking*) prendono in considerazione solo la componente advettiva del trasporto, la più conservativa. Per advezione si intende, infatti, il processo fisico per cui un soluto viene trasportato passivamente dall'acqua in movimento e perciò il suo moto avviene solo lungo la direzione di flusso delle acque sotterranee e a una velocità pari alla velocità reale (v_r) dell'acqua. La velocità calcolata attraverso la Legge di Darcy prende il nome di velocità apparente o velocità di Darcy ed è pari a:

$$v_{darcy} = K * i$$

dove K è la conducibilità idraulica del mezzo e i il gradiente idraulico. Questa velocità è detta apparente in quanto il flusso d'acqua non avviene a piena sezione ma attraverso una sezione effettiva costituita dall'area totale dei pori in cui l'acqua fluisce. La velocità reale può essere definita quindi da:

$$v_r = \frac{v_{darcy}}{n_e} = \frac{Ki}{n_e}$$

dove n_e rappresenta la porosità efficace (adimensionale), cioè il rapporto tra il volume dei pori interconnessi, attraverso il quale effettivamente avviene il flusso, e il volume totale del materiale poroso (Anderson et al., 2015).

Il codice numerico usato per questa simulazione è MODPATH, sviluppato anch'esso dall'U.S.G.S. (Pollock, 2016; Par. 6.1). Si tratta di un codice di *post-processing* per il calcolo dei percorsi di migrazione delle particelle a partire dai risultati di simulazioni allo stato stazionario o transitorio implementate con il codice MODFLOW, nello specifico le direzioni di flusso e la distribuzione di carico idraulico. A partire da questi risultati, e con l'aggiunta dei valori di porosità efficace specificati dall'utente, MODPATH calcola i valori di velocità reale ai nodi della griglia di discretizzazione utilizzando la Legge di Darcy. La velocità viene poi interpolata in modo lineare su tutti i punti del dominio e il codice genera delle particelle di soluto ipotetiche, il cui percorso all'interno del dominio viene tracciato da una cella all'altra a partire da un punto scelto dall'utente e fino a che esse non incontrano una *boundary* oppure arrivano a soddisfare alcuni criteri, come ad esempio un tempo prestabilito di migrazione (Anderson et al., 2015; Pollock, 2016; Figura 6-10). I percorsi compiuti dai set di particelle sono visualizzati dal software come delle linee continue (*pathlines*). Il tracciamento può avvenire sia in modalità *backward*, partendo da pozzi o da opere di captazione e andando indietro nel tempo e nello spazio, come nel caso di questa simulazione, sia in modalità *forward*, partendo dai punti del dominio in cui può verificarsi una potenziale contaminazione, come discariche o zone industriali, e andando in avanti nel tempo e nello spazio (Anderson et al., 2015). Per determinare i percorsi delle particelle, il codice deve calcolare la distanza che ogni particella compie nelle tre direzioni dello spazio (dx , dy , dz) in un intervallo di tempo dt , secondo le formule:

$$dx = v_x dt$$

$$dy = v_y dt$$

$$dz = v_z dt$$

MODPATH fornisce una soluzione semi-analitica di queste equazioni, mentre altri codici utilizzano metodi numerici (Anderson et al., 2015).

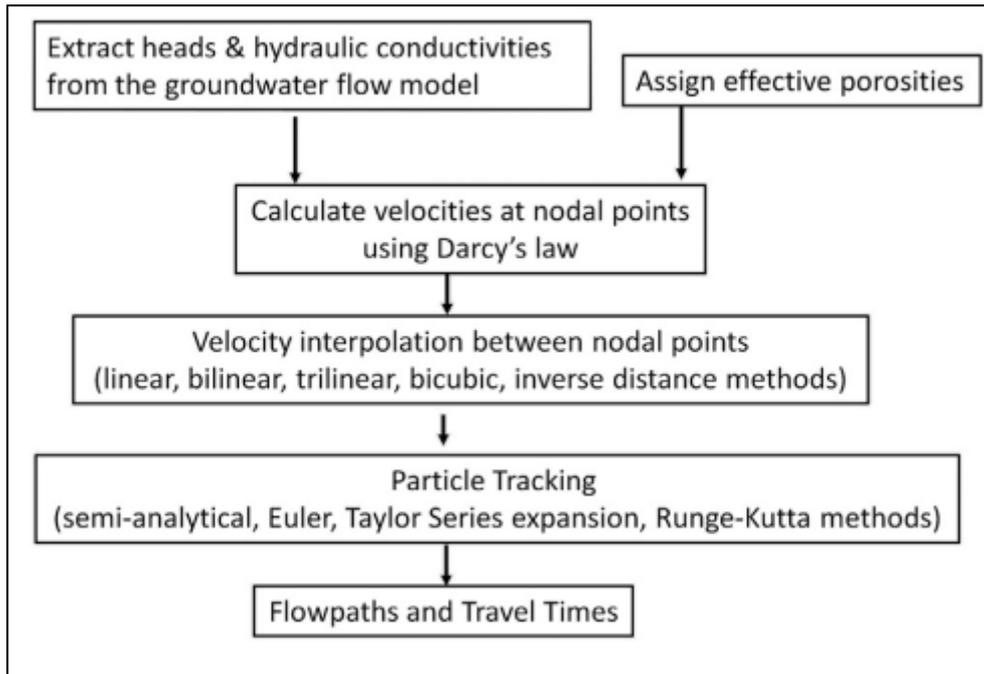


Figura 6-10: Diagramma di flusso per il processo di particle tracking (da Anderson et al., 2015).

Come anticipato, la simulazione in oggetto è stata svolta in modalità backward, a partire dai risultati della simulazione di calibrazione allo stato stazionario, con lo scopo di identificare le aree di cattura (*capture zones*) dei pozzi di Borgo Piccin e Lagusel e delle opere di captazione Belvedere e San Floriano e di stimare i tempi di trasporto (*travel times*) delle particelle dal Lago Morto ai pozzi e alle captazioni. Ai tre pozzi di Lagusel, non in funzione durante il periodo di monitoraggio, è stata assegnata una portata media di 1,586.3 m³/d. Questo valore è stato ottenuto basandosi sul dato fornito da Piave Servizi, secondo il quale la portata media totale emunta dal campo pozzi di Lagusel è pari a circa la metà della portata emunta dal campo pozzi di Borgo Piccin, vale a dire 4,758.91 m³/d. Si è assunto che i tre pozzi emungano la stessa portata; perciò, il valore medio totale è stato diviso per 3.

Un'area di cattura rappresenta la porzione di flusso delle acque sotterranee influenzata dall'attività di un pozzo in pompaggio o di una captazione (Anderson et al., 2015). Queste aree vengono calcolate secondo uno specifico tempo di cattura indicato dalla normativa di riferimento. In Italia, la normativa vigente in materia ambientale è il D.Lgs. 152/2006 "Norme in materia ambientale". L'articolo 94, in particolare, disciplina le aree di salvaguardia delle acque superficiali e sotterranee destinate al consumo umano. Esso individua le aree di salvaguardia distinte in zone di tutela assoluta e zone di rispetto. Le prime sono costituite dall'area immediatamente circostante le captazioni o derivazioni, per un'estensione di almeno

10 m di raggio, devono essere adeguatamente protette e adibite esclusivamente a opere di captazione o presa e ad infrastrutture di servizio. Le seconde, invece, sono costituite “dalla porzione di territorio circostante la zona di tutela assoluta da sottoporre a vincoli e destinazioni d'uso tali da tutelare qualitativamente e quantitativamente la risorsa idrica captata” e possono essere suddivise in “zona di rispetto ristretta e zona di rispetto allargata, in relazione alla tipologia dell'opera di presa o captazione e alla situazione locale di vulnerabilità e rischio della risorsa”. L'individuazione delle zone di rispetto è di competenza regionale, sulla base dell'Accordo Stato-Regioni del 12 dicembre 2002 denominato “Linee guida per la tutela della qualità delle acque destinate al consumo umano e criteri generali per l'individuazione delle aree di salvaguardia delle risorse idriche di cui all'art. 21 del D. Lgs. 11 maggio 1999, n.152”. In Veneto, il DGR nr. 1621 del 5 novembre 2019, Allegato A, ha ripreso dall'accordo sopracitato tre criteri per l'individuazione delle zone di rispetto: criterio geometrico, cronologico ed idrogeologico. Il criterio di interesse per questa simulazione è quello cronologico. Esso è basato sul “tempo di sicurezza”, inteso come l'intervallo temporale necessario perché una particella compia il suo percorso dal punto di infiltrazione al punto di captazione. Questo criterio si applica per la delimitazione definitiva della zona di rispetto dei pozzi di prelievo e in generale delle opere di captazione. Tale criterio consiste quindi nel definire le dimensioni delle aree di rispetto in funzione del tempo di trasferimento di un possibile inquinamento dalla sorgente della contaminazione al punto di captazione. Il valore numerico da attribuire a tale intervallo temporale può quindi essere stabilito in funzione delle caratteristiche dell'inquinante e dell'acquifero in cui esso si muove, ma deve essere definito tenendo conto dei tempi di reazione che il soggetto gestore della risorsa idrica captata può mettere in atto nel momento in cui si accerta la presenza dell'inquinante ovvero del tempo necessario per implementare sistemi d'approvvigionamento idrico alternativo e comunque misure di sicurezza. A livello generale, per la delimitazione della zona di rispetto ristretta è consigliato di adottare un tempo di sicurezza di 60 giorni (Al. 3 p. 2 dell'Accordo Stato Regioni, 2002), mentre per la zona di rispetto allargata è di norma adottato un tempo di sicurezza di 180 o di 365 giorni (Al. 3 p. 3; Figura 6-11).

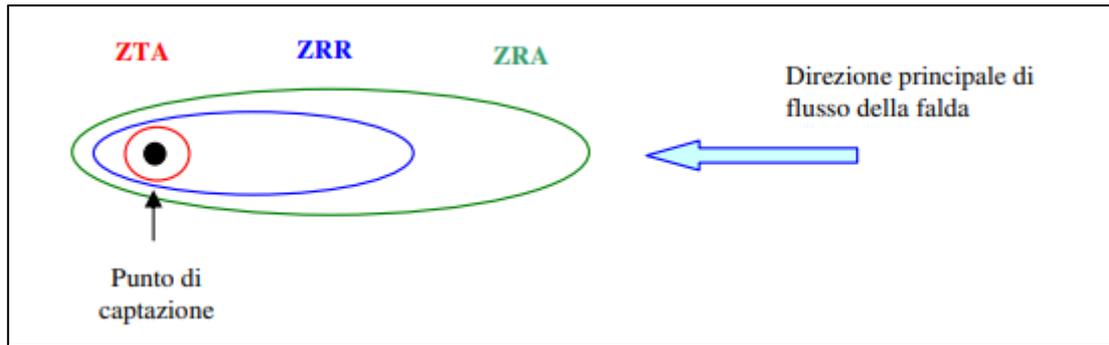


Figura 6-11: Schema delle aree di salvaguardia definite in base al criterio cronologico. ZTA – zona di tutela assoluta ($r=10m$), ZRR – zona di rispetto ristretta (isocrona 60 gg) e ZRA – zona di rispetto allargata (isocrona 180 gg) (da DGR 1621/2019 – Allegato A, Regione Veneto).

Nella simulazione in esame, sono stati quindi creati due differenti set di particelle, entrambi aventi come punti di partenza i pozzi e le captazioni, ma con tempi di tracciamento in modalità *backward* diversi, rispettivamente di 60 e 180 giorni, al fine di individuare le corrispondenti aree di cattura. Per quanto riguarda i valori di porosità efficace, essi sono stati considerati uguali ai valori di *specific yield* (S_y) nelle due zone a diversa permeabilità (Par. 6.3). I risultati della simulazione sono illustrati nel Par. 7.2.

7 Risultati delle simulazioni numeriche

7.1 Risultati delle simulazioni di calibrazione

7.1.1 Simulazione di calibrazione allo stato stazionario

La simulazione di calibrazione allo stato stazionario ha prodotto risultati soddisfacenti, che ben riproducono la distribuzione media di carico idraulico nel dominio e le portate medie in uscita dalle opere di captazione misurate durante il periodo di monitoraggio (Par. 3).

La distribuzione di carico idraulico calcolata con questa simulazione è mostrata in Figura 7-1. Il carico è compreso fra un valore minimo di circa 151 m s.l.m. in località Savassa e nella stretta di Serravalle e un massimo di circa 317 m s.l.m. in località Colesei, ai piedi del versante del Monte Millifret. In generale, i valori più alti si riscontrano nella parte nord del dominio, per poi diminuire progressivamente verso il centro del dominio, in corrispondenza alla diminuzione delle quote altimetriche. Nella parte più a sud si verifica invece un nuovo aumento del carico a mano a mano che ci si sposta verso lo spartiacque di Revine che fa da confine al dominio (Par. 6.2). Nella zona compresa fra il Lago del Restello e il Lago di Negrisiola, si può notare un rapido aumento del carico, dell'ordine di 20-30 m, lungo il

versante in sinistra idrografica, in corrispondenza di un conoide posto all'imboccatura di una vallecola laterale (Par. 2.2.2).

Il codice MODFLOW-NWT al termine della simulazione genera anche il bilancio di massa (*Flow Budget*), che mette a confronto le portate d'acqua in entrata e in uscita dal sistema nel tempo di simulazione, specificandone i vari contributi (Tabella 7-1). La percentuale di discrepanza fra portate in entrata e uscita è molto inferiore al valore soglia del 2% comunemente utilizzato come riferimento. I contributi al bilancio sono visualizzati nell'istogramma di Figura 7-2. Dal grafico si può vedere come la principale fonte di alimentazione dell'acquifero sia il Lago Morto (61.16%), seguito dai GHB (38.46%) che rappresentano il Lago del Restello, il Lago di Negrisiola e le ricariche laterali presso Forcal e Negrisiola (Par. 6.4). La ricarica dovuta all'infiltrazione delle precipitazioni contribuisce invece solo per lo 0.39%. Per quanto riguarda, invece, i contributi in uscita, la maggior parte è fornita dai dreni (captazioni Belvedere e San Floriano e rete idrografica) con l'80.79%, seguiti dai GHB (18.21%), mentre risulta molto meno importante il contributo dei pozzi di Borgo Piccin (0.99%).

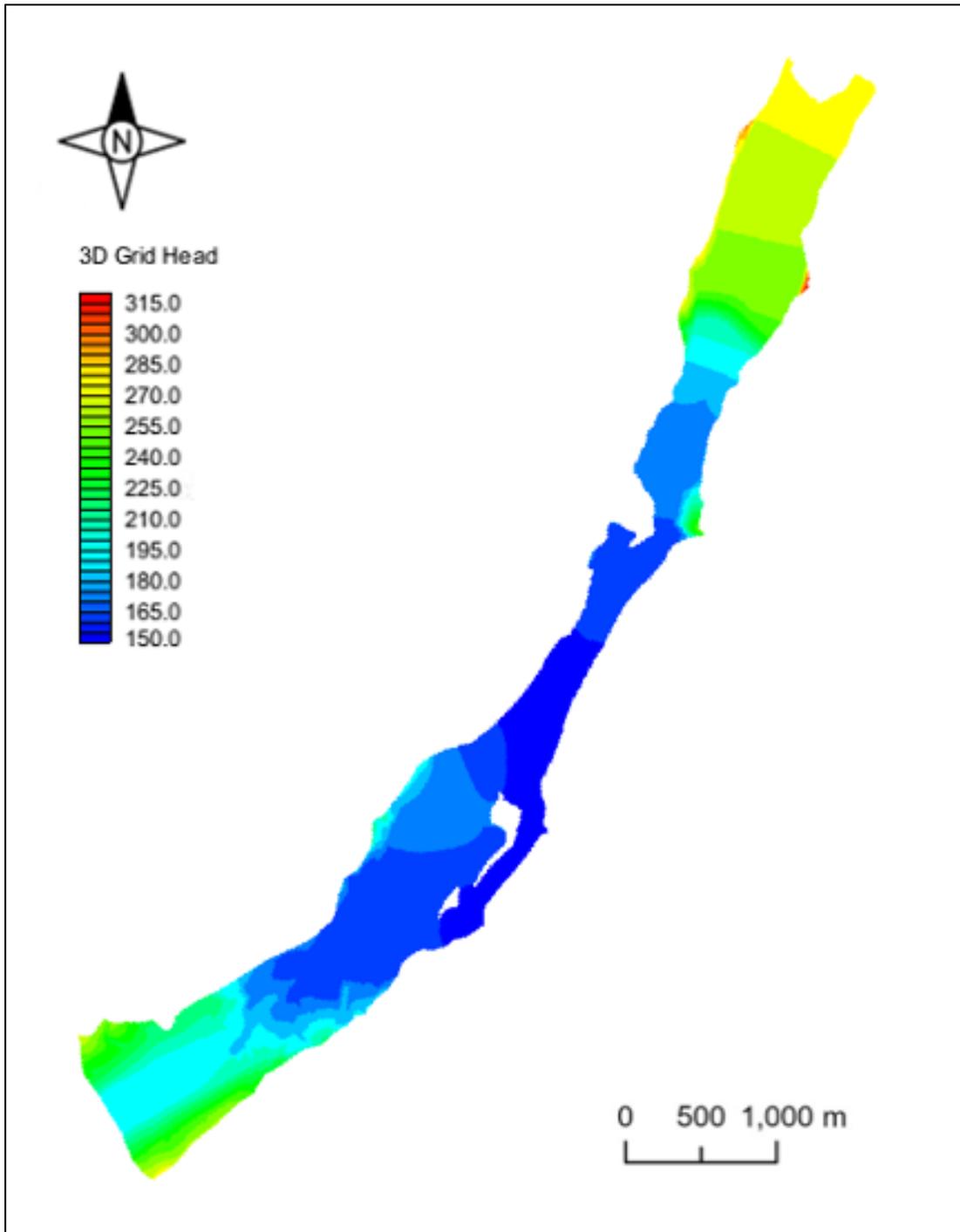


Figura 7-1: Distribuzione di carico idraulico nel dominio per la simulazione di calibrazione allo stato stazionario.

BILANCIO DI MASSA		
Contributi	Q _{IN} (m ³ /d)	Q _{OUT} (m ³ /d)
CHD_Lago_Morto	586664.75	0.00
GHB	368907.25	174719.27
RECHARGE	3723.54	0.00
WELLS	0.00	9539.52
DRAINS	0.00	775037.00
TOT	959295.56	959295.75
IN-OUT	-0.19	
% DISCREPANCY	0.00%	

Tabella 7-1: Bilancio di massa per la simulazione di calibrazione allo stato stazionario.

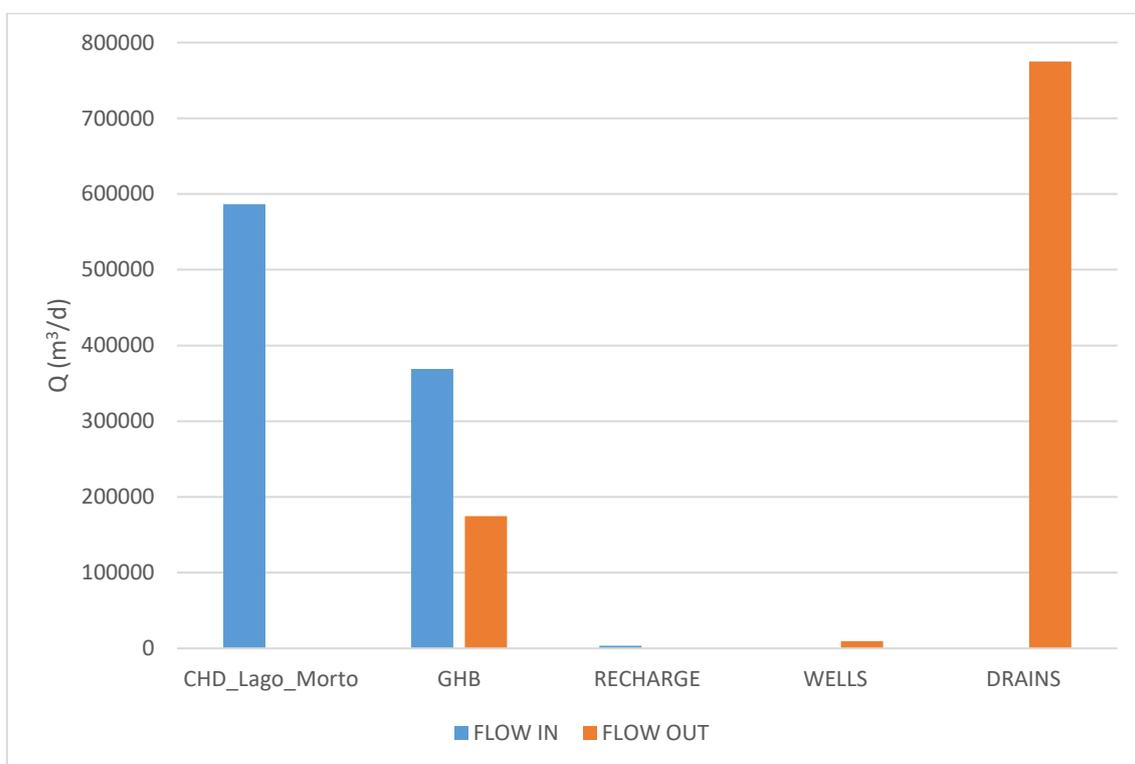


Figura 7-2: Istogramma dei contributi del bilancio di massa.

7.1.2 Simulazione di calibrazione allo stato transitorio

Anche la simulazione di calibrazione allo stato transitorio ha prodotto dei buoni risultati, che sono in grado di riprodurre in maniera soddisfacente i valori di carico idraulico e flusso osservati durante i 13 mesi di monitoraggio (Par. 3).

La distribuzione di carico idraulico calcolata al termine dell'ultimo *stress period* (maggio 2024) è mostrata in Figura 7-3. I valori calcolati rispecchiano la distribuzione ottenuta con la

simulazione allo stato stazionario (Par. 7.1.1), confermando la bontà dei dati e dei parametri inseriti nel modello.

Per quanto riguarda il bilancio di massa cumulativo, riportato in Tabella 7-2, la discrepanza percentuale che ne risulta è del -0.08%, un valore ampiamente accettabile. L'istogramma in Figura 7-4 mostra i contributi al bilancio, fra cui, trattandosi di una simulazione allo stato transitorio, è presente anche flusso legato alle variazioni di immagazzinamento nell'acquifero durante il tempo di simulazione (*storage*), che però contribuisce solo per lo 0.23% in entrata e per lo 0.18% in uscita. Per il resto, le percentuali non variano significativamente rispetto allo stato stazionario: la voce principale per i flussi in entrata rimane il Lago Morto (61.05%), seguito dai GHB (38.40%) e dalla ricarica (0.33%); per i flussi in uscita prevalgono i dreni (80.54%), seguiti dai GHB (18.29%) e dai pozzi (0.99%).

In Figura 7-5 sono riportati i grafici che raffigurano il confronto fra l'andamento del carico idraulico calcolato e l'andamento del carico osservato nei 6 piezometri di fondovalle usati per la calibrazione (Par. 6.6). Si osserva come i risultati che meglio rappresentano i dati reali siano stati ottenuti in PzBP. Gli andamenti del carico sono ben rappresentati anche in PzL, Pz1 e Pz2, anche se con differenze maggiori fra carico osservato e calcolato. In generale, i valori di carico idraulico calcolato risultano sempre minori di quelli osservati. Si può notare inoltre come in PzL, Pz1, Pz2 e PzBP, piezometri vicini fra loro, l'andamento del carico segua un pattern molto simile. Nel mese di febbraio 2024 si può osservare un brusco calo del carico e una ripresa nei mesi successivi. Ciò può essere correlato al fatto che nello stesso periodo il livello del Lago Morto è stato mantenuto per 10 giorni al minimo di circa 271.5 m s.l.m. (Par. 3.1).

In Figura 7-6 sono riportati infine i grafici che confrontano l'andamento dei flussi calcolati e osservati nei dreni di Belvedere e San Floriano, anch'essi usati per la calibrazione. La rappresentazione dei dati reali è buona, anche se i flussi calcolati non riescono ad evidenziare le grandi differenze di portata osservate fra i mesi di maggio e giugno 2023 (in positivo) e gennaio e febbraio 2024 (in negativo). Le due captazioni, essendo poste a pochi metri di distanza l'una dall'altra, presentano degli andamenti pressoché identici, anche se la galleria Belvedere presenta portate di un ordine di grandezza superiore a quelle della sorgente San Floriano. Il calo delle portate drenate nel mese di febbraio 2024 è analogo alla diminuzione di carico osservata nei piezometri e può essere sempre correlato al livello minimo a cui è stato tenuto il Lago Morto.

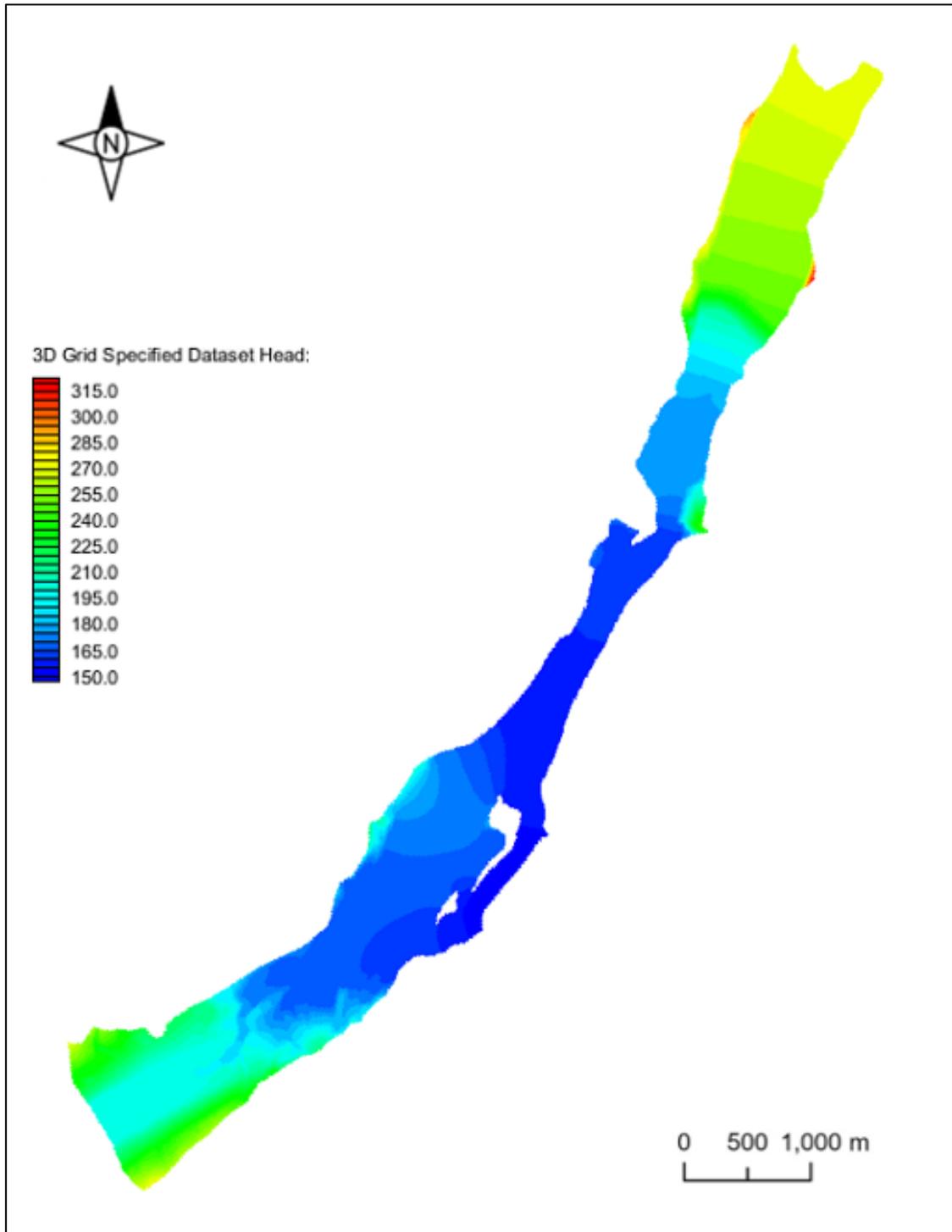


Figura 7-3: Distribuzione di carico idraulico al termine dell'ultimo stress period della simulazione di calibrazione allo stato transitorio.

BILANCIO DI MASSA		
Contributi	Q _{IN} (m ³ /d)	Q _{OUT} (m ³ /d)
STORAGE	879213.69	670975.88
CHD_Lago_Morto	232866704.00	158.63
GHB	146453824.00	69813704.00
RECHARGE	1239770.50	0.00
WELLS	0.00	3787577.00
DRAINS	0.00	307464640.00
TOT	381439520.00	381737056.00
IN-OUT	-297536.00	
% DISCREPANCY	-0.08%	

Tabella 7-2: Bilancio di massa cumulativo per la simulazione di calibrazione allo stato transitorio.

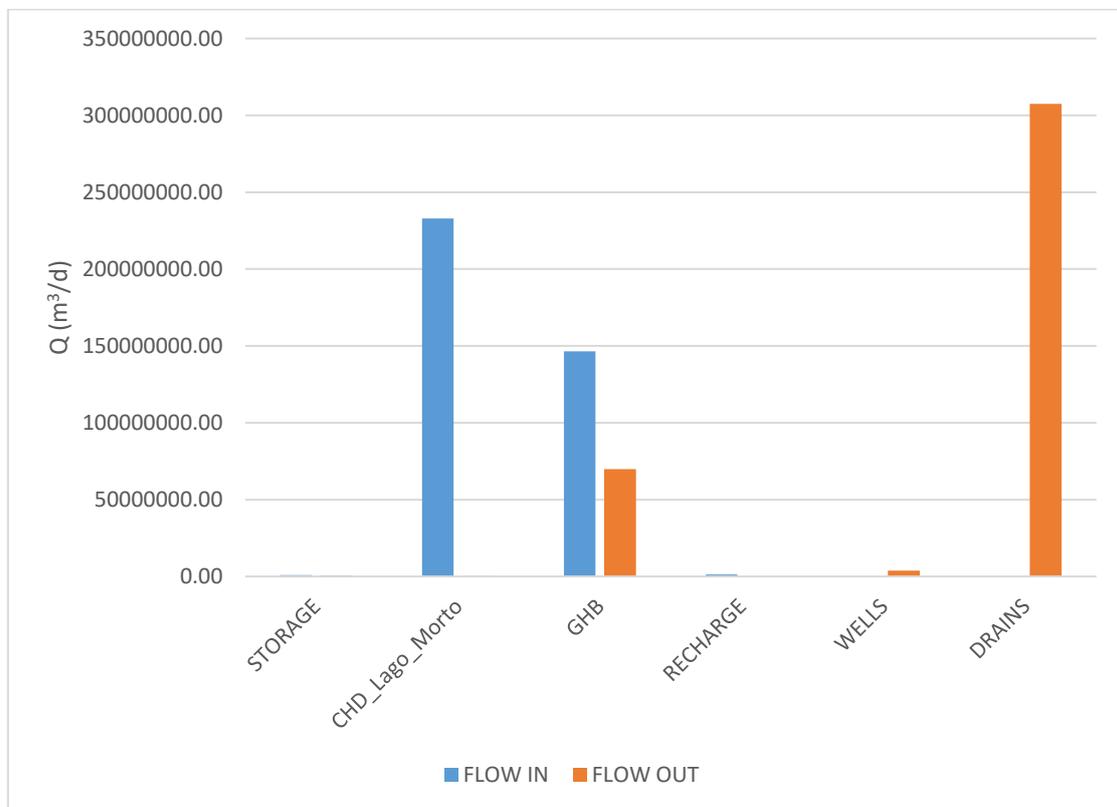


Figura 7-4: Istogramma dei contributi del bilancio di massa.

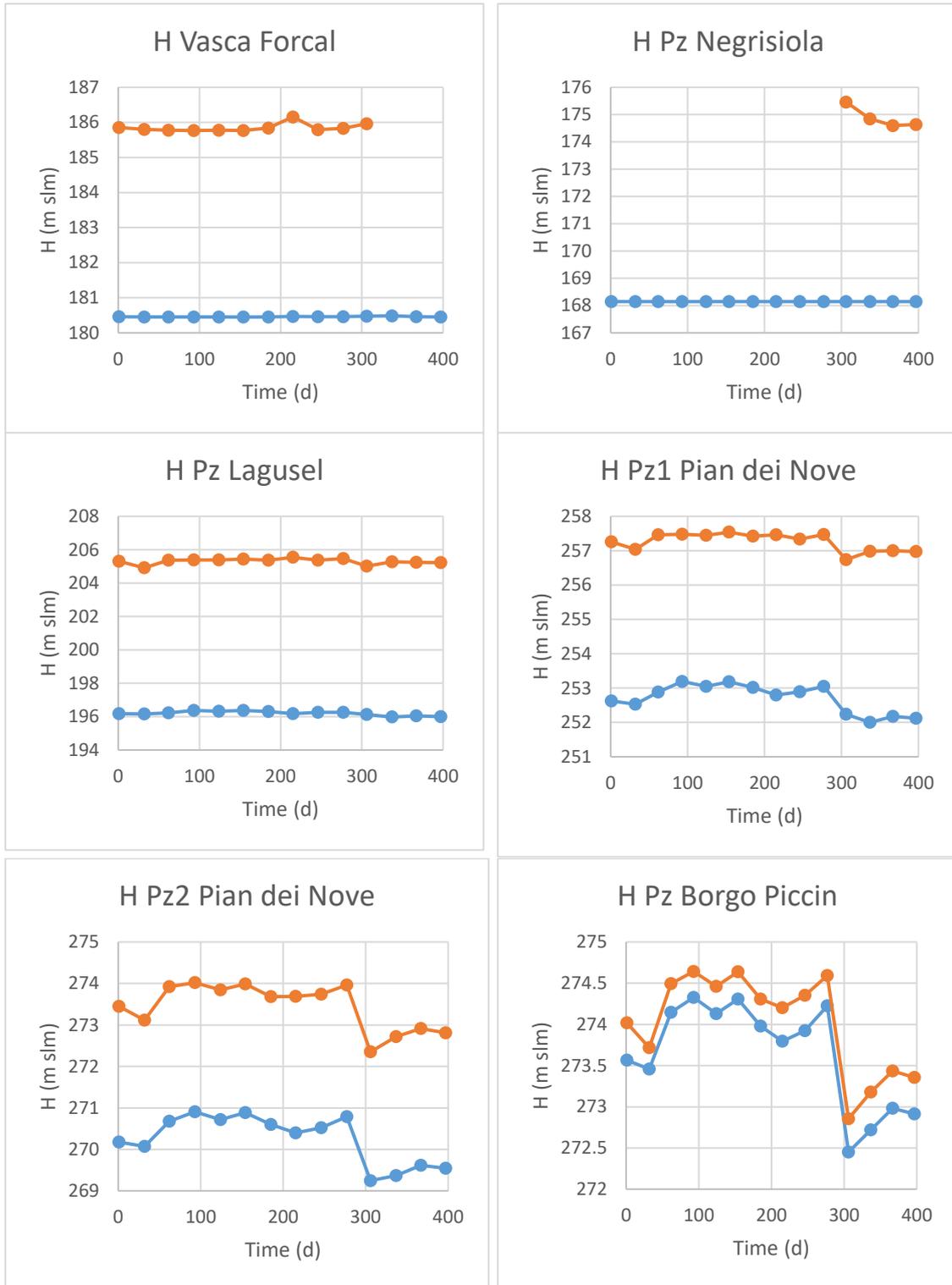


Figura 7-5: Grafici relativi all'andamento del carico idraulico calcolato (in blu) e osservato (in arancione) nei 6 piezometri di fondovalle.

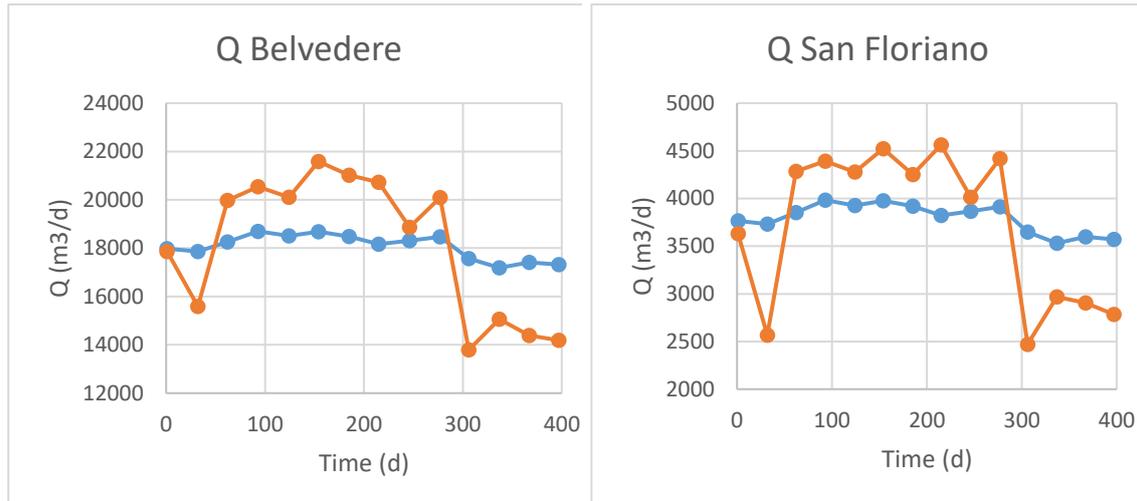


Figura 7-6: Grafici relativi all'andamento della portata in uscita dal dominio calcolata (in blu) e osservata (in arancione) nei dreni di Belvedere e San Floriano.

7.2 Risultati della simulazione di trasporto advettivo

Come descritto nel Par. 6.7, gli obiettivi della simulazione di trasporto advettivo, basata sui risultati della simulazione di calibrazione allo stato stazionario (Par. 7.1.1), sono stati quelli di delimitare le zone di rispetto dei pozzi e delle captazioni con le isocrone a 60 e 180 giorni (secondo la normativa di riferimento vigente) e di stimare il tempo di arrivo delle particelle di sostanze inquinanti dal Lago Morto.

Il tempo di trasporto per advezione (*travel time*) delle particelle è stato calcolato inserendo lungo le *pathlines* le frecce di direzione (*direction arrows*). Esse indicano la direzione in cui le particelle si muoveranno all'interno del dominio, in questo caso dal Lago Morto (ipotizzando un possibile sversamento di sostanze inquinanti) verso i pozzi e le captazioni ad uso idropotabile. La distanza fra due frecce successive è proporzionale alla velocità dell'acqua nel mezzo poroso. Le frecce possono essere inserite con uno specifico intervallo temporale; quindi, mettendole a intervalli della durata di 1 giorno si possono calcolare i giorni che le particelle impiegano per spostarsi da un punto all'altro del dominio. Si tratta di una stima estremamente conservativa, in quanto si ipotizza che non vi sia interazione tra le particelle di contaminante e la matrice solida dell'acquifero. È stato stimato quindi che le particelle impiegherebbero circa 4 giorni per arrivare ai pozzi di Borgo Piccin, fra i 73 e i 75 giorni per arrivare alle captazioni di Belvedere e San Floriano e fra i 74 e i 77 giorni per arrivare ai pozzi di Lagusel.

Le zone di rispetto sono state ricavate calcolando le aree di cattura individuate dal codice MODPATH in modalità *backward* a partire dai campi pozzi e dalle opere di captazione. Le zone di rispetto a 60 giorni per il campo pozzi di Lagusel e per le captazioni Belvedere e San

Floriano sono illustrate rispettivamente in Figura 7-7 e in Figura 7-8, mentre le zone di rispetto a 180 giorni per le stesse opere di presa sono mostrate in Figura 7-9 e in Figura 7-10. Queste ultime arrivano fino al Lago Morto. Per quanto riguarda il campo pozzi di Borgo Piccin, la zona di rispetto è una sola, data la vicinanza al lago, ed è mostrata in Figura 7-11. In Tabella 7-3 sono riportati, per ciascuna zona di rispetto, i valori di area, larghezza massima e lunghezza massima. Queste ultime due sono stime approssimate.

Zona di rispetto	Area (m ²)	Larghezza max (m)	Lunghezza max (m)
Lagusel_60 d	76940.75	61	1547
Lagusel_180 d	91444.27	61	1840
Captazioni_60 d	63082.75	52	1325
Captazioni_180 d	74546.88	52	1566
Borgo Piccin	2441.68	47	63

Tabella 7-3: Riepilogo dei valori di area, larghezza massima e lunghezza massima di ciascuna zona di rispetto.



Figura 7-7: Zona di rispetto a 60 giorni per il campo pozzi di Lagusel.



Figura 7-8: Zona di rispetto a 60 giorni per le captazioni Belvedere e San Floriano.

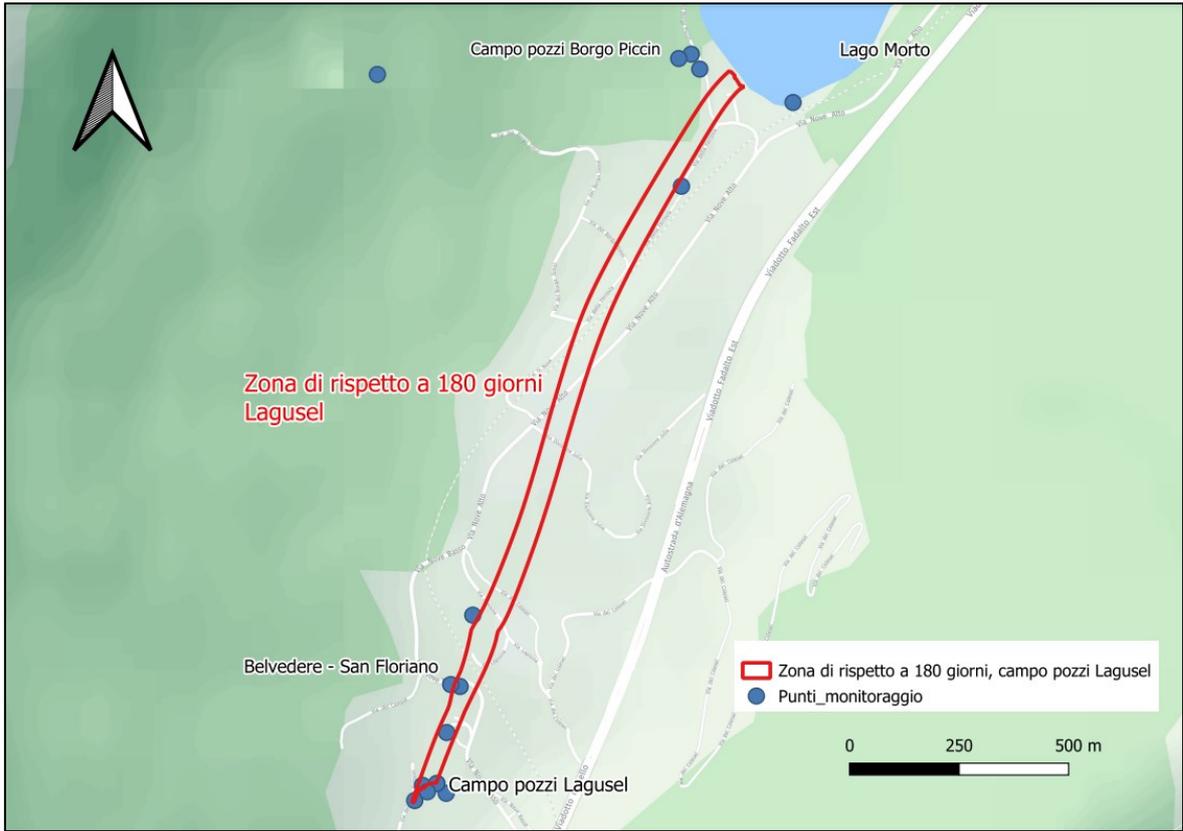


Figura 7-9: Zona di rispetto a 180 giorni per il campo pozzi di Lagusel.



Figura 7-10: Zona di rispetto a 180 giorni per le captazioni Belvedere e San Floriano.



Figura 7-11: Zona di rispetto per il campo pozzi di Borgo Piccin.

7.3 Risultati della simulazione predittiva allo stato transitorio

Come anticipato nel Par. 6.1, a seguito della calibrazione del modello allo stato transitorio è stata implementata una simulazione di tipo predittivo per prevedere le possibili conseguenze di uno scenario estremo. È stato ipotizzato infatti che, nei 365 giorni successivi al termine del monitoraggio, dal 01/06/2024 al 31/05/2025, il Lago Morto fosse mantenuto al livello minimo registrato di 271.5 m s.l.m., ben inferiore al valore medio (Par. 3.1).

Per far questo, sono stati aggiunti 12 *stress periods* corrispondenti ai mesi dell'anno di previsione, per un totale di 26 *stress periods*. Negli *stress periods* aggiuntivi i parametri delle *boundaries* sono mantenuti costanti. Sono stati inseriti i valori medi per i livelli del Lago del Restello e del Lago di Negrisiola (Par. 3.1), per le portate emunte dai pozzi di Borgo Piccin (Par. 3.3.1) e per la ricarica (Par. 4.3). Sono stati inoltre attivati i pacchetti WEL per i tre pozzi di Lagusel, a cui è stato assegnato un valore di portata emunta pari a 1,586.3 m³/d, ottenuto come descritto nel Par. 6.7.

I risultati del bilancio di massa (Tabella 7-4 e Figura 7-13) confermano la ripartizione dei contributi ai flussi in entrata e in uscita al dominio individuata nella simulazione di calibrazione in transitorio (Par. 0). In questo caso, però, il contributo in alimentazione fornito

dal Lago Morto aumenta del 21.38%, passando dal 61.05% all'82.43%, mentre quello dei GHB diminuisce fino al 16.91%.

I risultati più interessanti ed evidenti riguardano però la distribuzione del carico idraulico nel dominio, osservabile in Figura 7-12. Il range di valori calcolati non cambia, andando sempre da un minimo di circa 150 m s.l.m. a un massimo di 317 m s.l.m., ma quello che si può notare è che nella porzione centrale del dominio, corrispondente alla parte più bassa della valle, appena a nord della Stretta di Serravalle e nel centro di Vittorio Veneto, si verifica un forte abbassamento del carico idraulico, dell'ordine dei 20-30 m. Questa zona è ben visibile, data la sua colorazione blu scuro, che rappresenta le celle coi valori di carico più bassi, compresi fra 150 e 155 m s.l.m.

In Figura 7-14 sono visualizzati i grafici relativi all'andamento del carico idraulico nei 6 piezometri di fondovalle durante i 12 *stress periods* aggiuntivi. Il valore di partenza è il valore medio in stazionario. Si può notare come ognuno di essi si attesti su un valore di carico costante nei 12 mesi aggiuntivi. In particolare, in VsF e PzN questo valore è pari al valore medio inserito nello *stress period 1* (rispettivamente 165.90 e 163.54 m s.l.m.), mentre in PzL, Pz1, Pz2 e PzBP esso è inferiore alla media (rispettivamente 196.01, 252.13; 269.55 e 272.91 m s.l.m.). Quest'ultima evidenza può essere verosimilmente correlata al livello idrometrico minimo del Lago Morto. Infatti, la dipendenza del carico misurato in questi 4 piezometri dal livello del lago era emersa chiaramente anche da quanto descritto nei paragrafi precedenti.

Infine, in Figura 7-15 sono mostrati gli andamenti delle portate drenate dalle captazioni Belvedere e San Floriano. Si può osservare come esse si assestino su valori anche in questo caso inferiori alla media, pari rispettivamente a 17,338.54 e 3,575.77 m³/d.

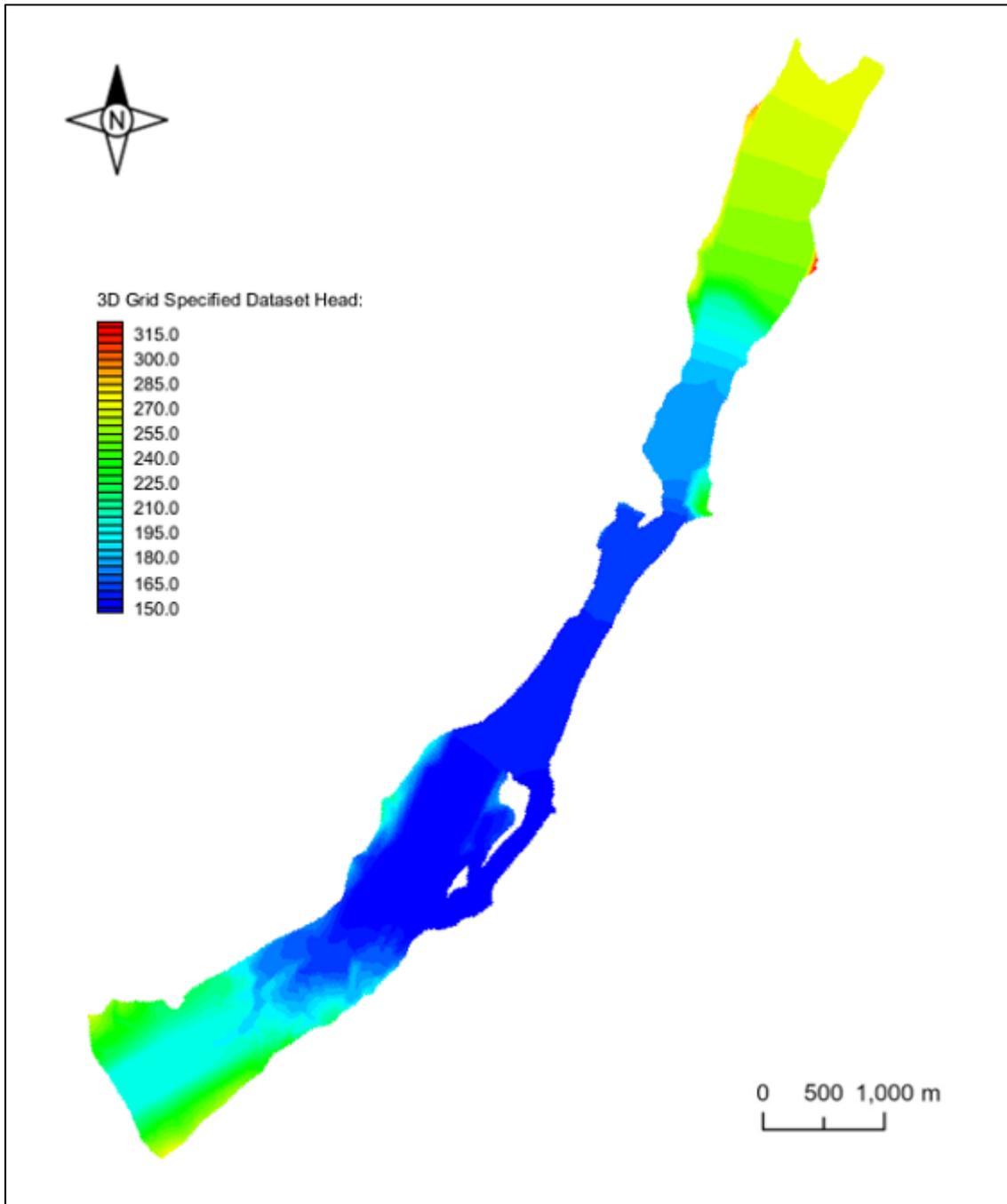


Figura 7-12: Distribuzione del carico idraulico all'interno del dominio per la simulazione predittiva.

BILANCIO DI MASSA		
Contributi	Q _{IN} (m ³ /d)	Q _{OUT} (m ³ /d)
CHD_Lago_Morto	444627424.00	158.63
WELLS	0.00	7119676.00
DRAINS	0.00	416901504.00
GHB	91194888.00	114757648.00
RECHARGE	2598864.50	0.00
STORAGE	991957.81	812217.56
TOT	539413120.00	539591232.00
IN-OUT	-178112.00	
% DISCREPANCY	-0.03%	

Tabella 7-4: Bilancio di massa cumulativo per la simulazione predittiva.

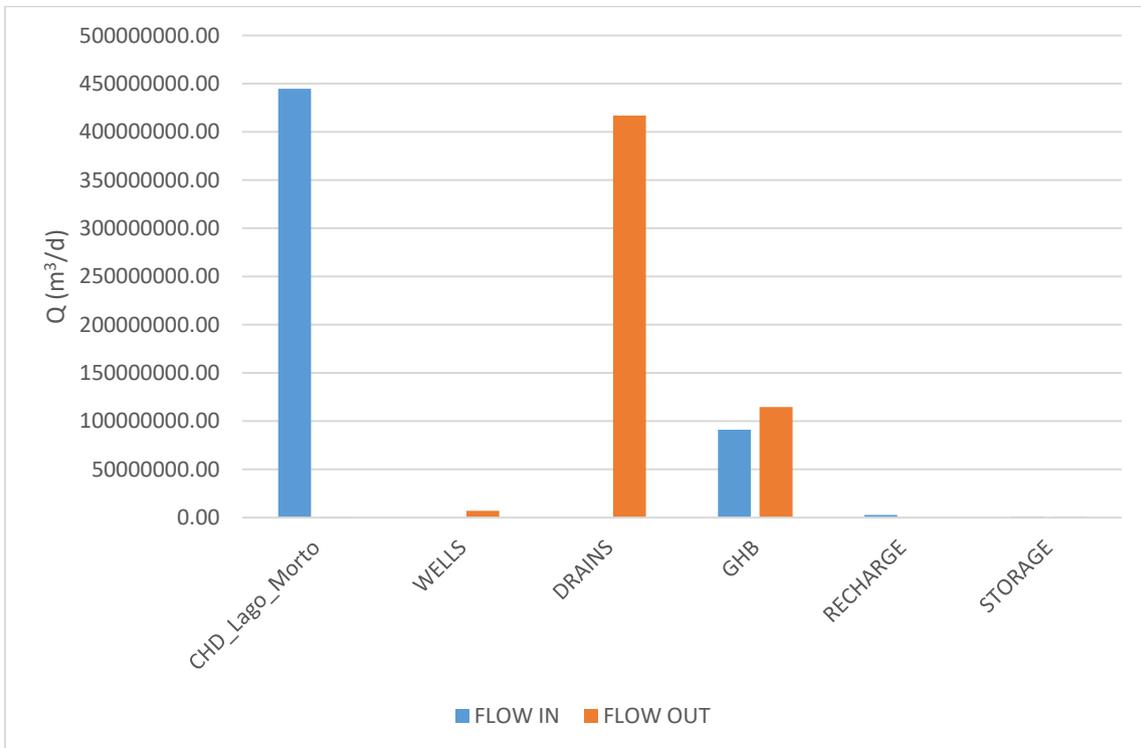


Figura 7-13: Istogramma dei contributi al bilancio di massa.

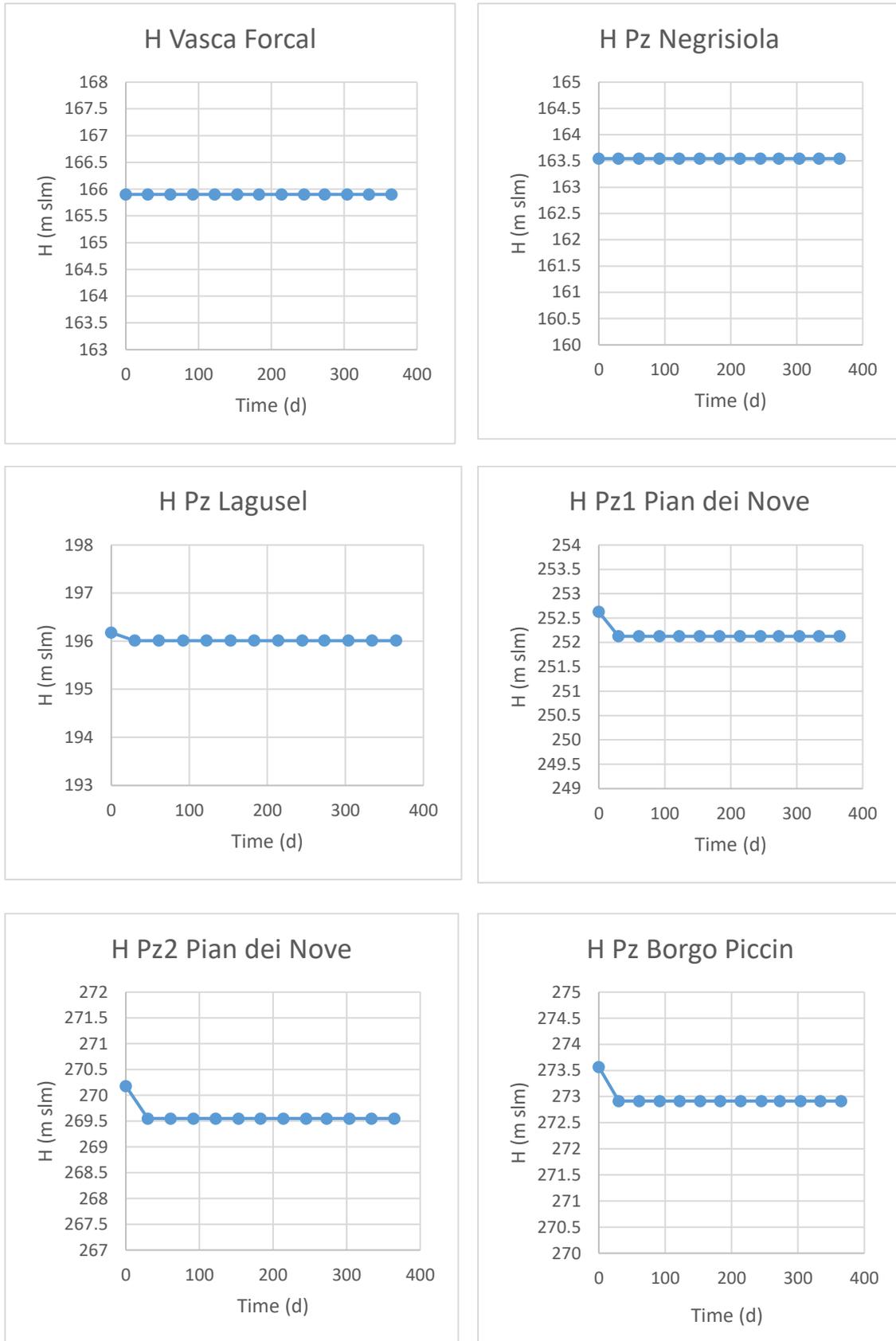


Figura 7-14: Grafici dell'andamento del carico idraulico nei piezometri di fondovalle durante gli stress periods previsionali.

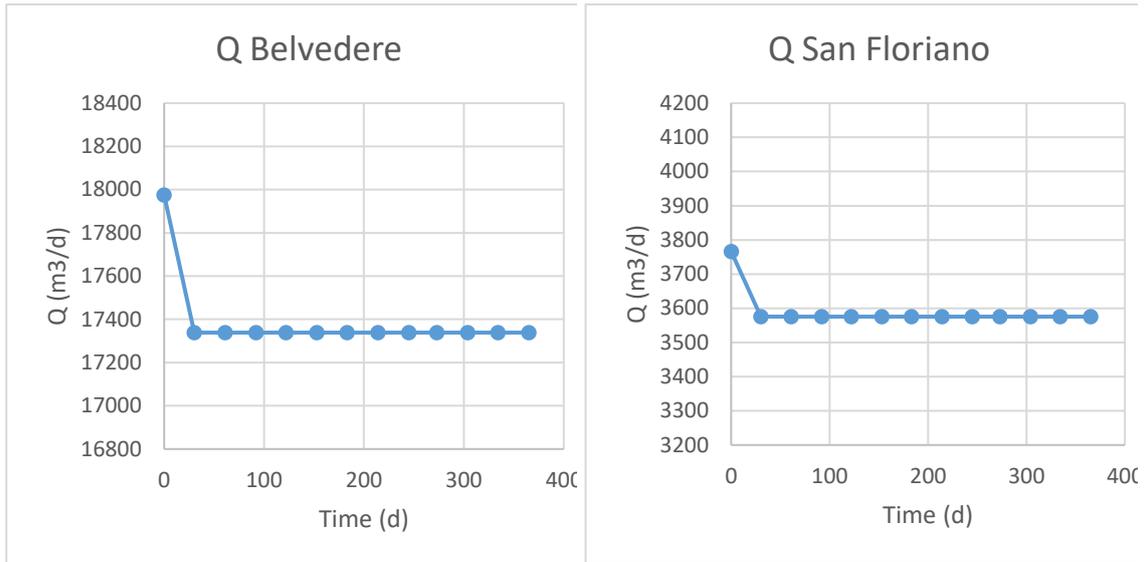


Figura 7-15: Grafici dell'andamento delle portate drenate dalle captazioni Belvedere e San Floriano negli stress periods previsionali.

8 Conclusioni

La protezione e la salvaguardia della risorsa idrica negli ultimi tempi è diventata di primaria necessità, ancora di più con la consapevolezza dei cambiamenti climatici in atto. L'attenzione rivolta ad un utilizzo quanto più consapevole della risorsa da parte degli enti gestori e la volontà di riuscire a conoscere sempre meglio il funzionamento dei sistemi idrici utilizzati per l'approvvigionamento idropotabile sono encomiabili anche se non privi di difficoltà, dovute principalmente all'intrinseca complessità della circolazione delle acque sotterranee che non rende facile e totalmente esaustiva la loro modellazione numerica. Di conseguenza, si rendono fondamentali le conoscenze preliminari di tipo geologico ed idrogeologico in nostro possesso riguardo l'area da indagare. In quest'ottica è risultato di primaria importanza il monitoraggio idrogeologico di pozzi e sorgenti, che non solo ha permesso di costruire il dataset di calibrazione del modello numerico, ma ha altresì fornito una conoscenza diretta e prolungata nel tempo delle caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero di interesse.

La ricostruzione dell'assetto stratigrafico della Val Lapisina, al fine di definire il modello idrogeologico concettuale, ha portato alla realizzazione di 23 sezioni geologiche trasversali all'asse della valle e una sezione longitudinale. Nonostante la scarsità di dati diretti riguardanti la profondità del contatto fra i depositi inconsolidati del fondovalle e il substrato roccioso, le sezioni sono risultate indispensabili nel loro scopo di fornire una base geologica per la modellazione. Inoltre, in letteratura non era presente una serie così dettagliata di sezioni geologiche per la Val Lapisina, per cui esse potranno essere riviste e migliorate e potenzialmente utilizzate per lavori futuri.

La calibrazione del modello numerico ha fornito buoni risultati sia allo stato stazionario che transitorio, riproducendo con buona approssimazione statistica i valori di carico idraulico e flusso misurati e confermando come i dati raccolti abbiano consentito di rappresentare bene la realtà mediante il modello idrogeologico concettuale.

Per quanto riguarda i risultati delle simulazioni, si è potuto osservare come il fattore che contribuisce in modo determinante all'alimentazione dell'acquifero freatico sia l'interazione fra acque superficiali e sotterranee. In particolare, l'elaborazione dei dati ha posto in evidenza come il Lago Morto sia l'elemento che più condiziona il sistema, sia in termini di flusso in entrata che distribuzione del carico idraulico.

La simulazione previsionale implementata, in cui è stato ipotizzato uno scenario in cui il livello del Lago Morto è tenuto al livello minimo registrato di 271.5 m s.l.m. per i 365 giorni

successivi alla fine del monitoraggio, ha mostrato come questo scenario estremamente conservativo comporta un abbassamento del carico idraulico nella zona più depressa della valle, dell'ordine dei 20-30 m, andando quindi a creare un potenziale problema per la captazione di acqua ad uso idropotabile e per la gestione dell'intera rete idrica.

Infine, per mezzo della simulazione della componente advettiva del trasporto, sono state individuate le zone di rispetto per i pozzi e le opere di captazione con le isocrone a 60 e a 180 giorni. Esse potrebbero rappresentare la base per un possibile studio futuro volto a valutare il rischio di contaminazione dell'acquifero e a realizzare una carta tematica del rischio di contaminazione.

9 Allegati: sezioni geologiche

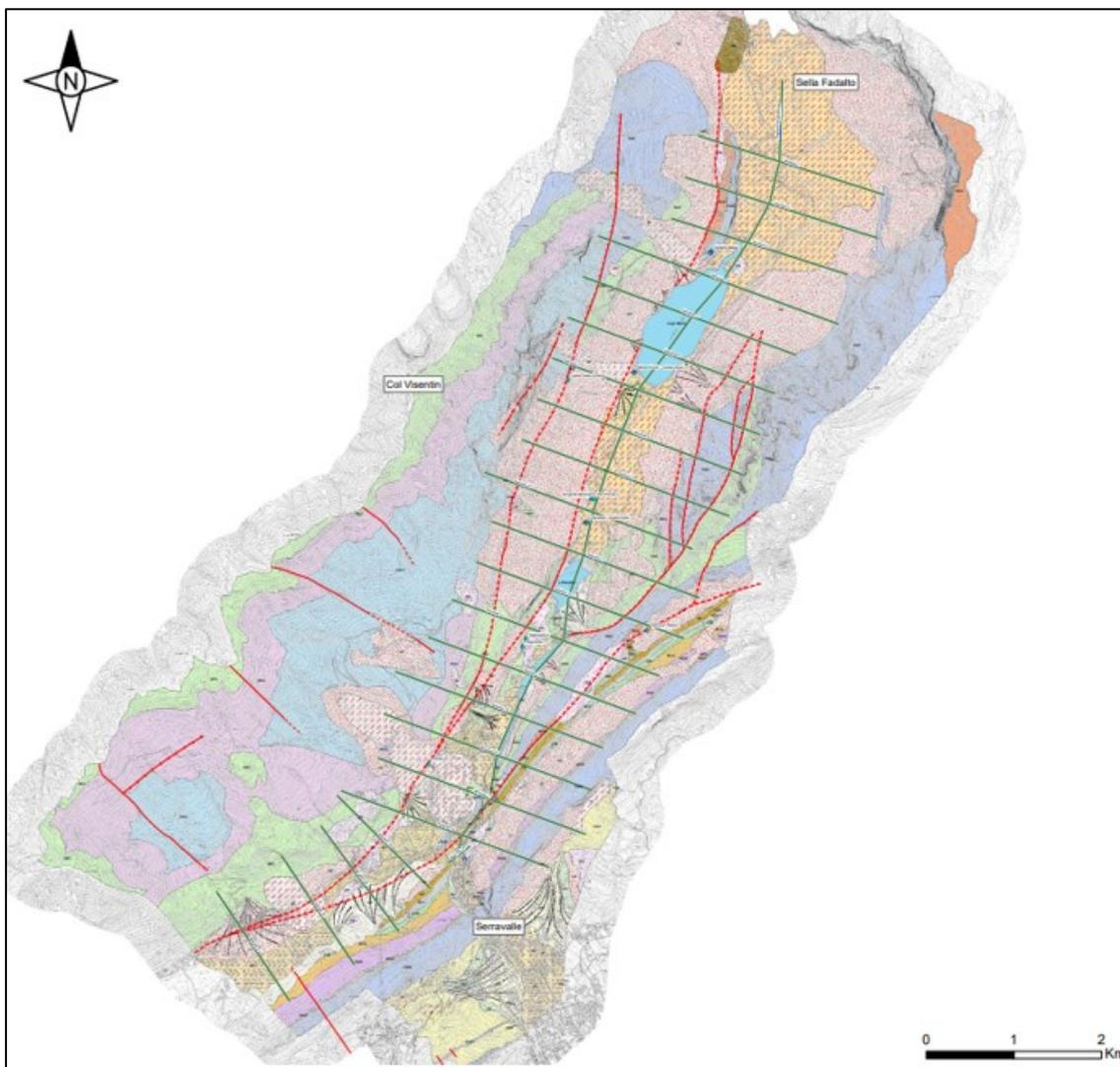


Figura 9-1: Tracce delle sezioni sulla carta geologica realizzata da Nuova AGEPI.

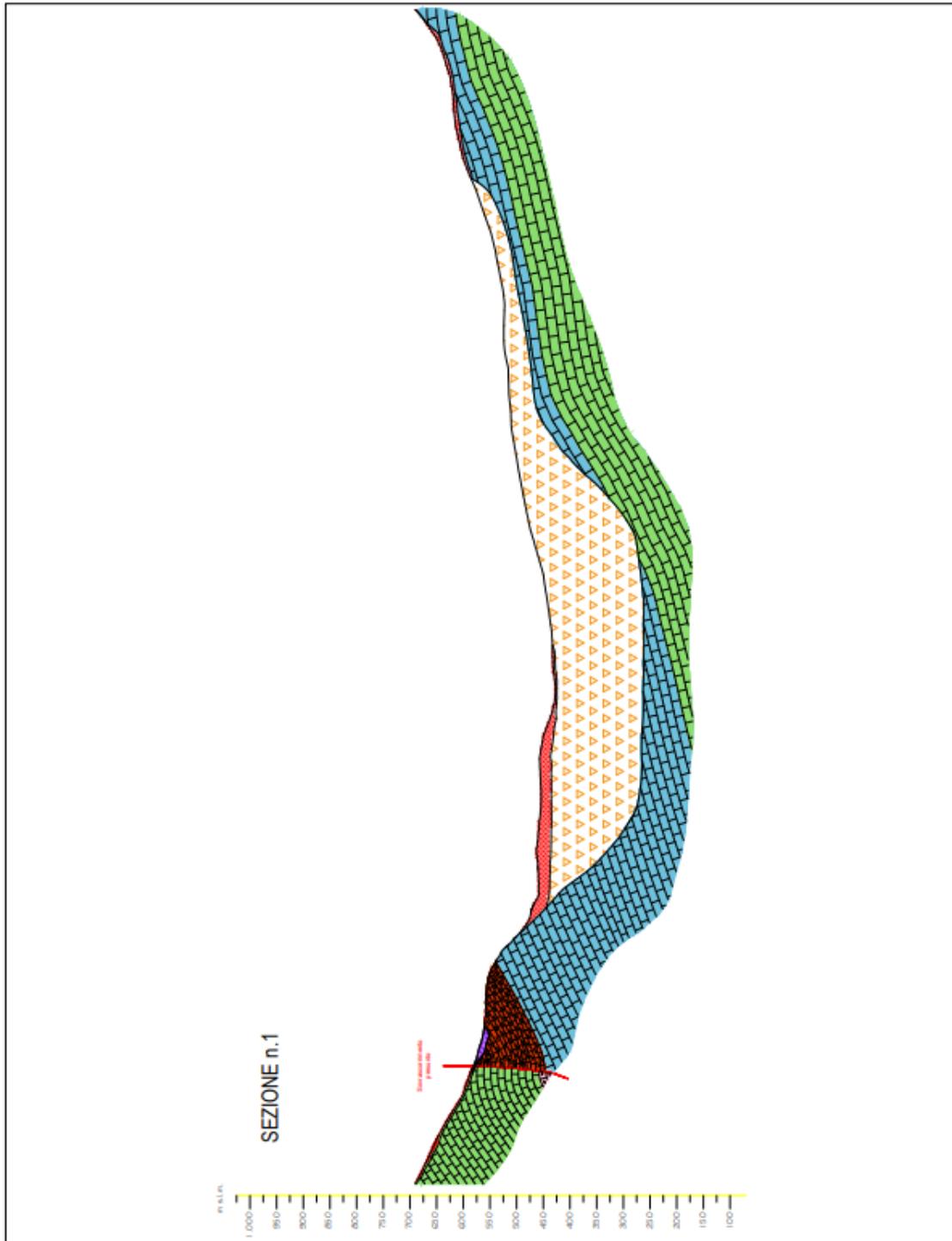


Figura 9-2: Sezione n.1

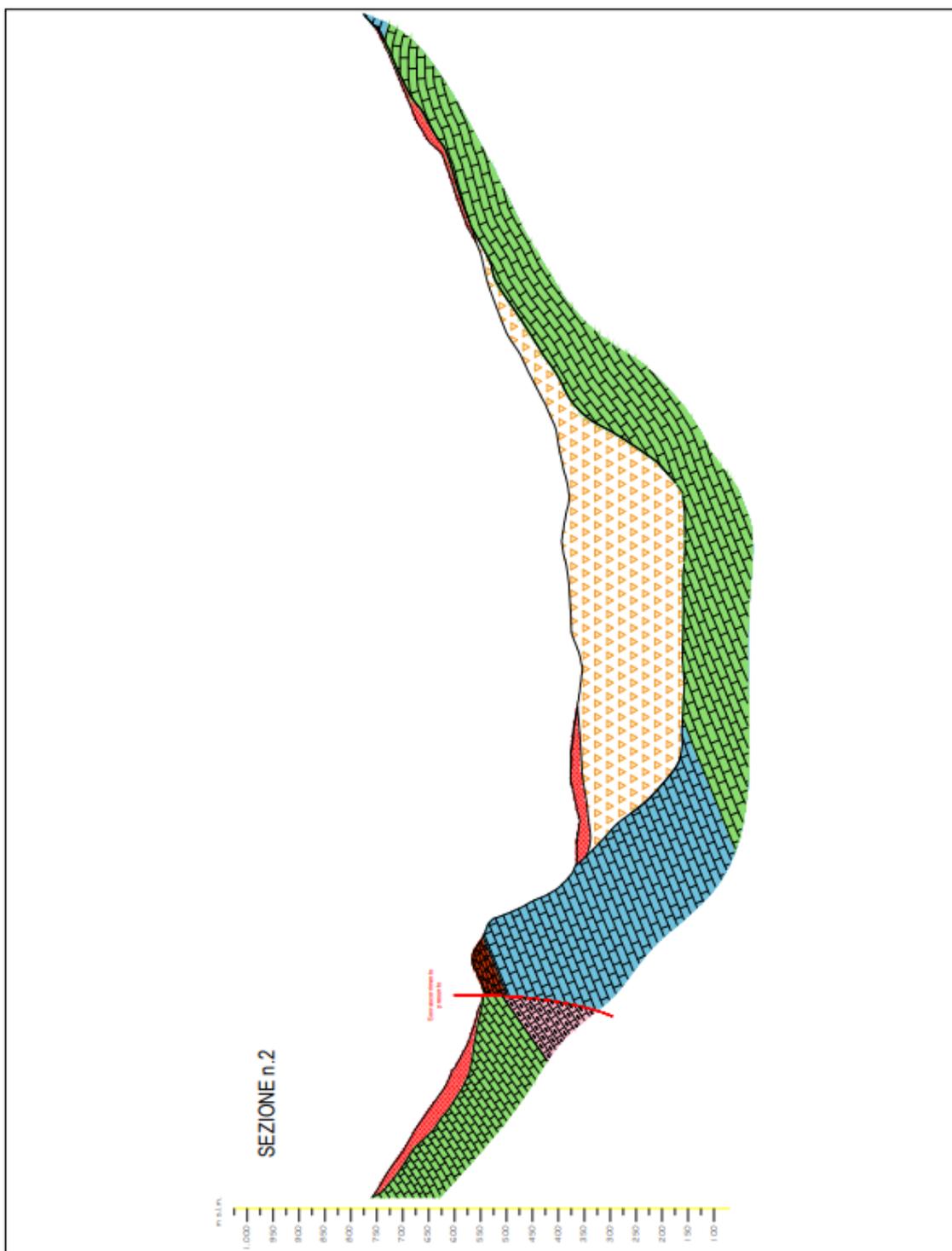


Figura 9-3: Sezione n.2

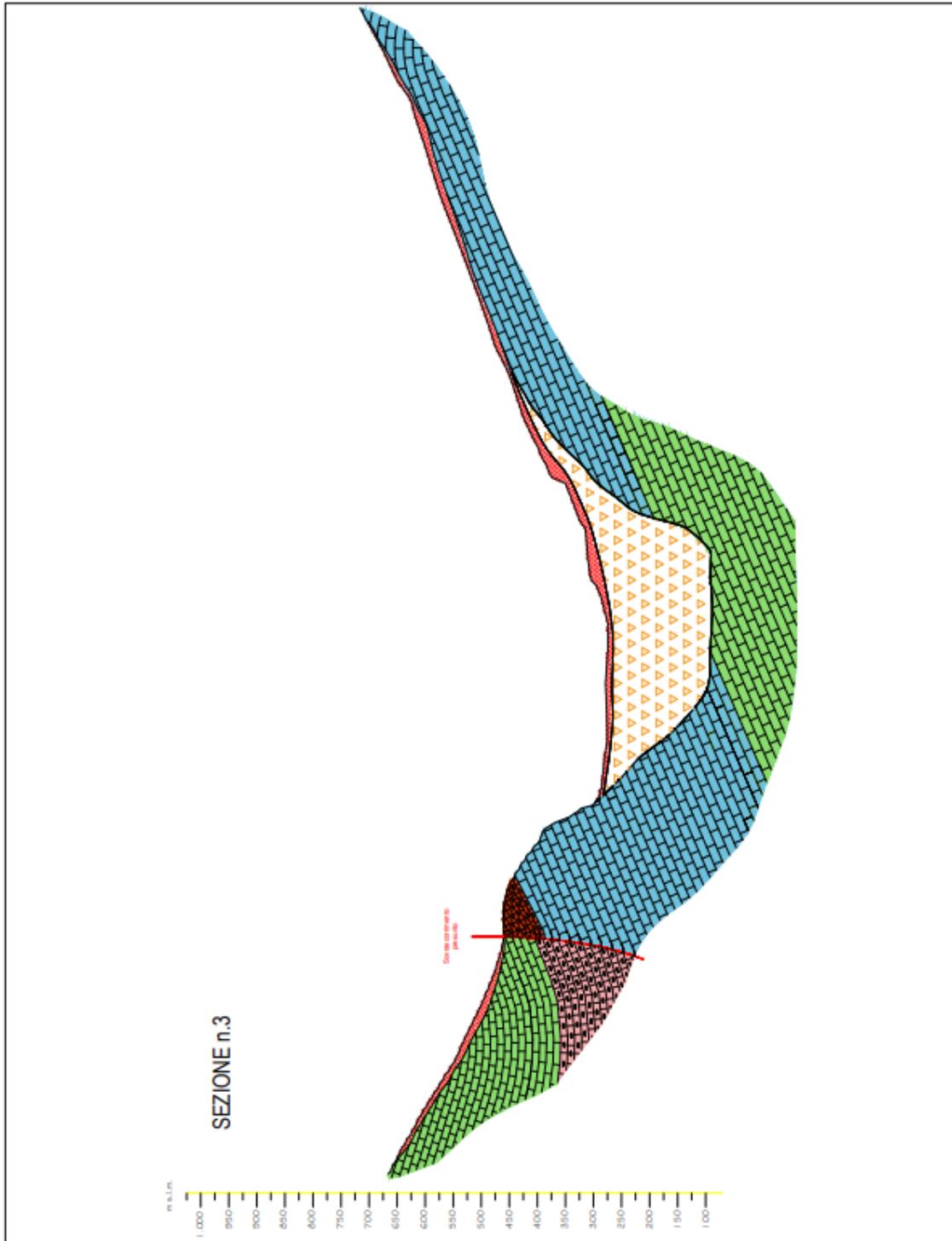


Figura 9-4: Sezione n.3

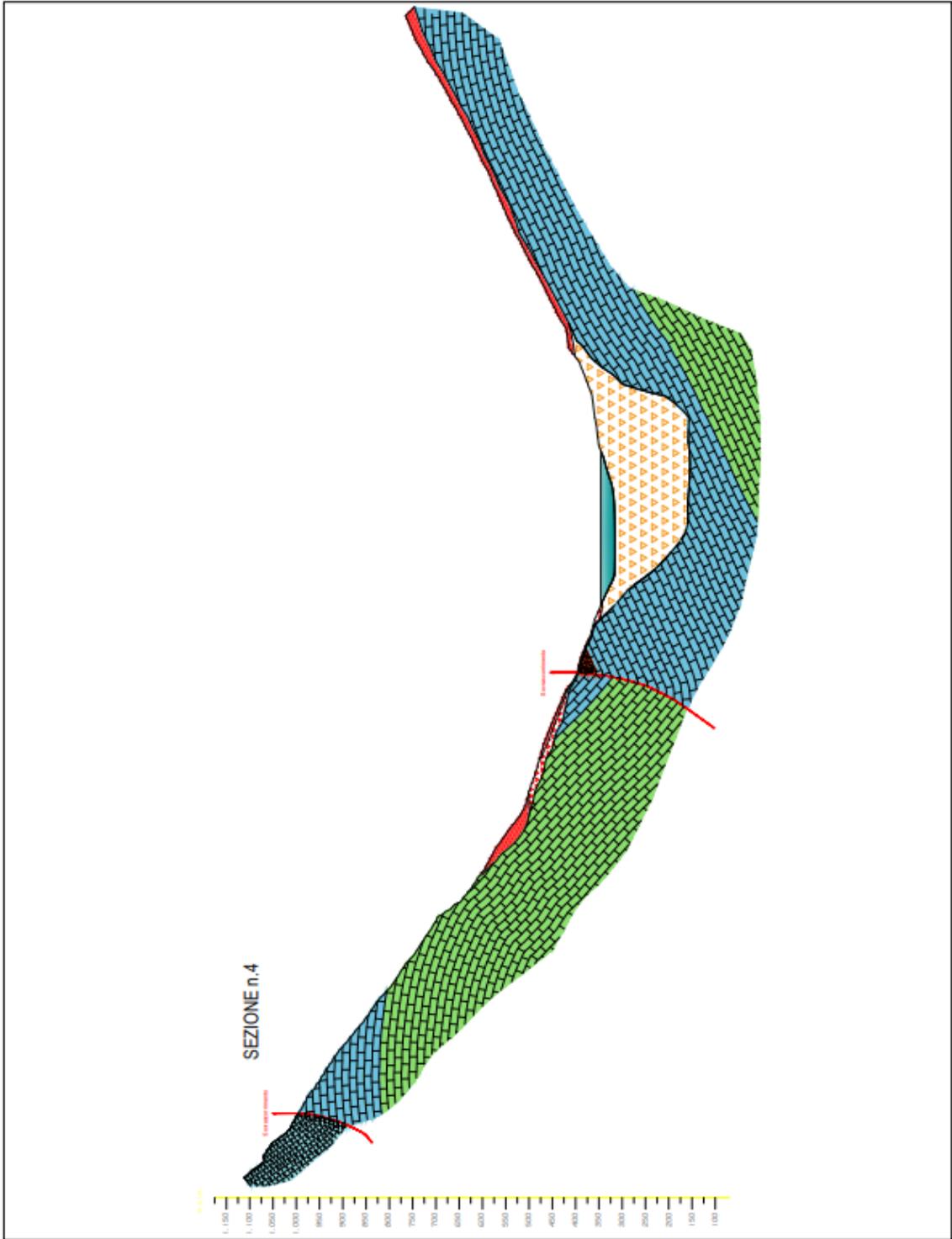


Figura 9-5: Sezione n.4

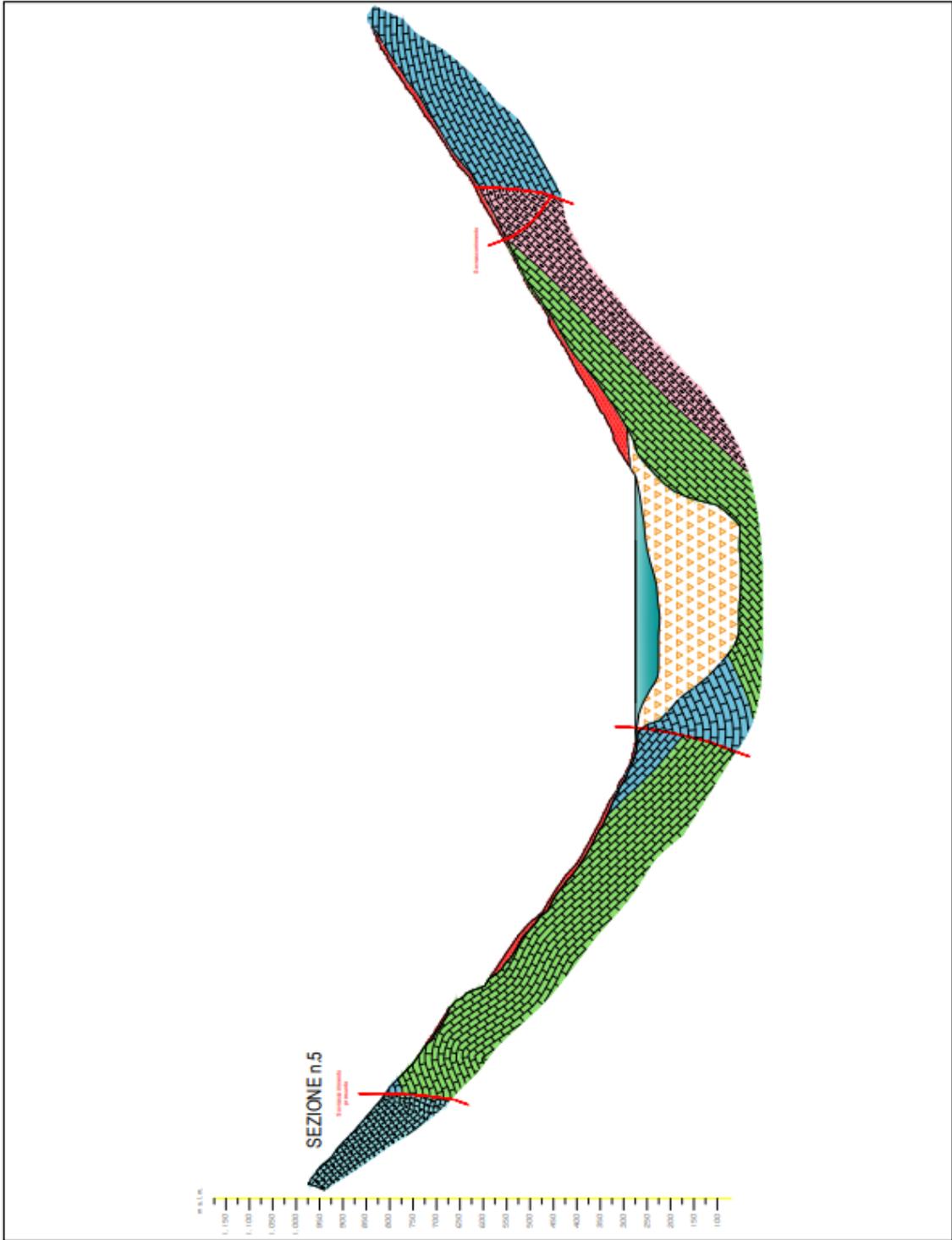


Figura 9-6: Sezione n.5

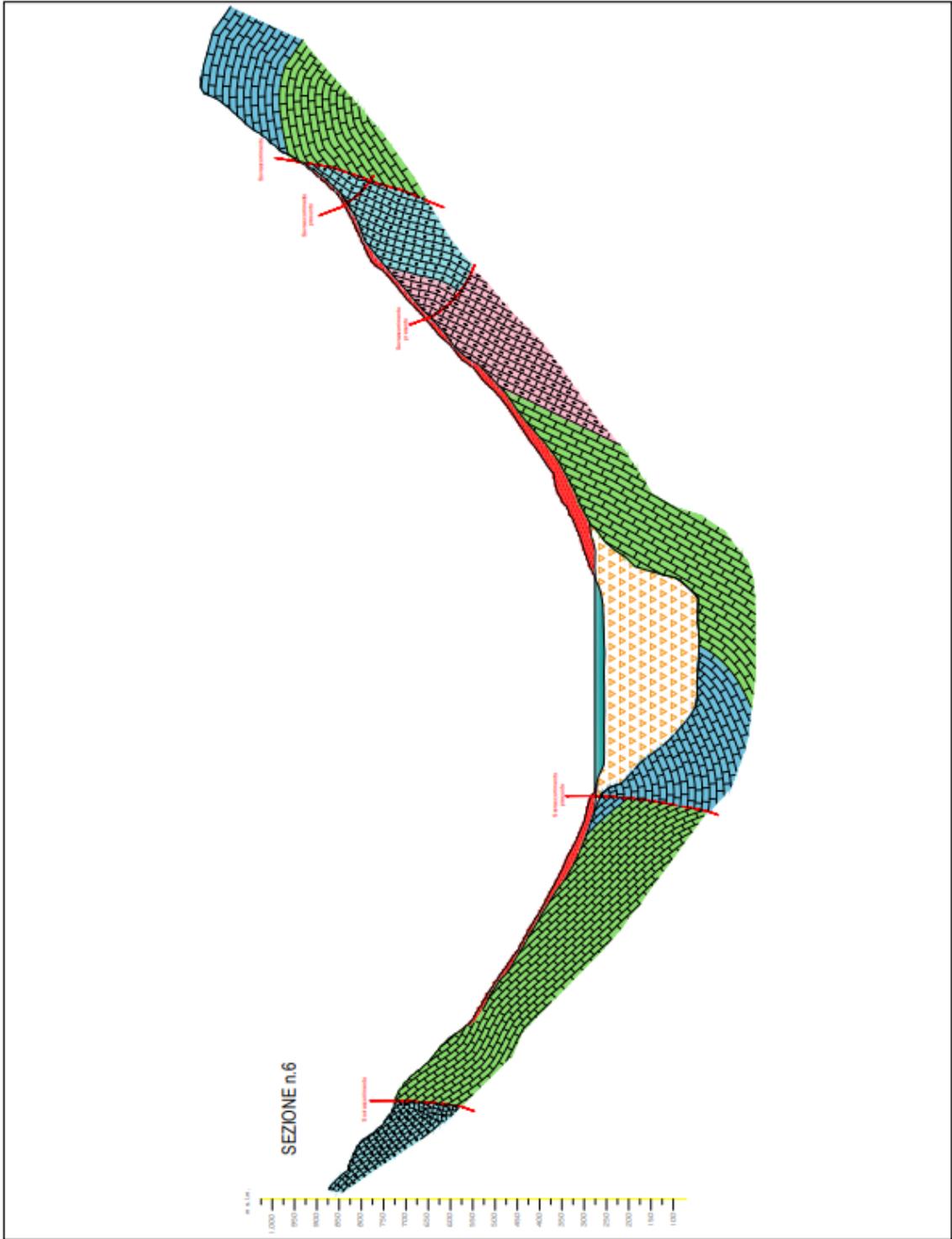


Figura 9-7: Sezione n.6

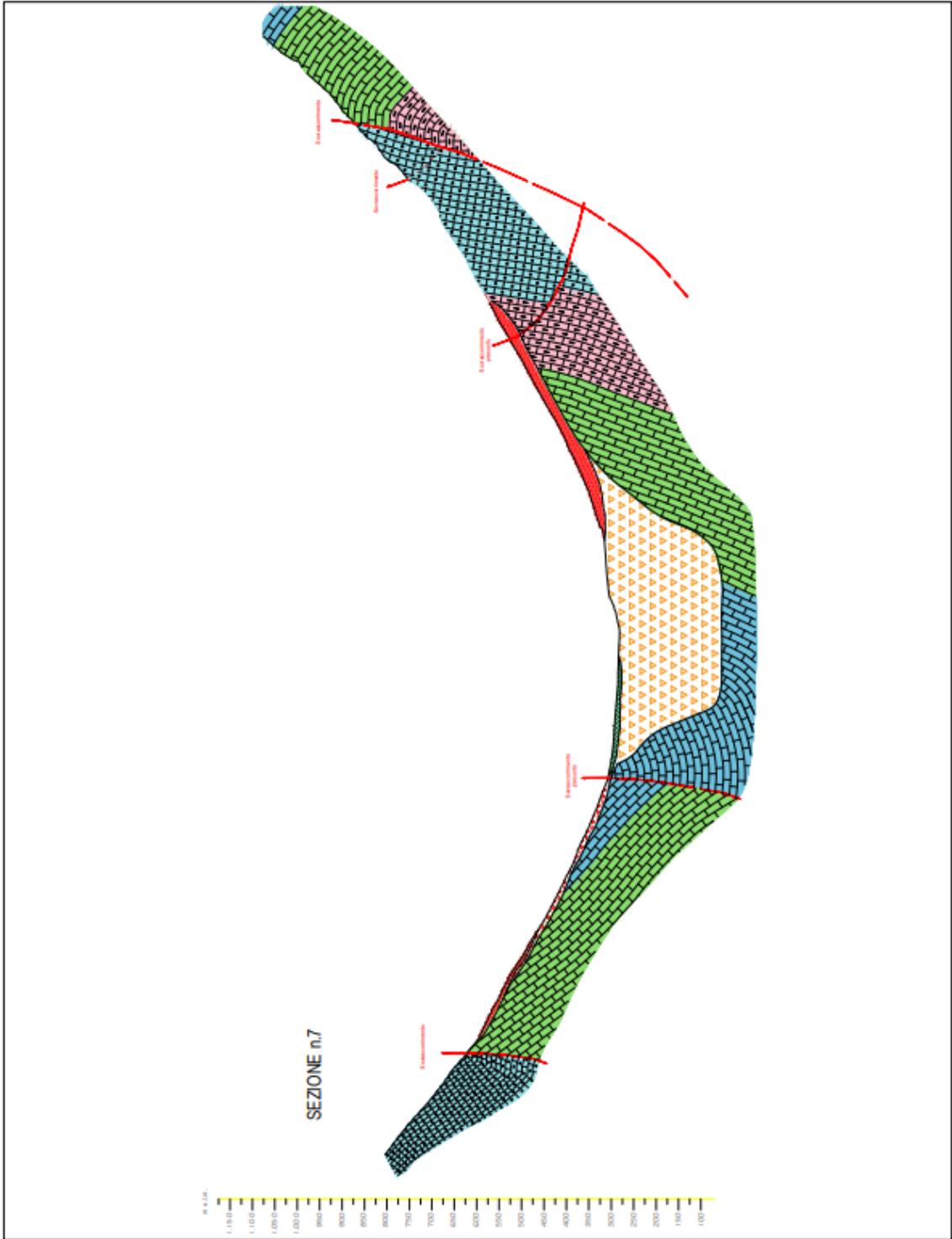


Figura 9-8: Sezione n.7

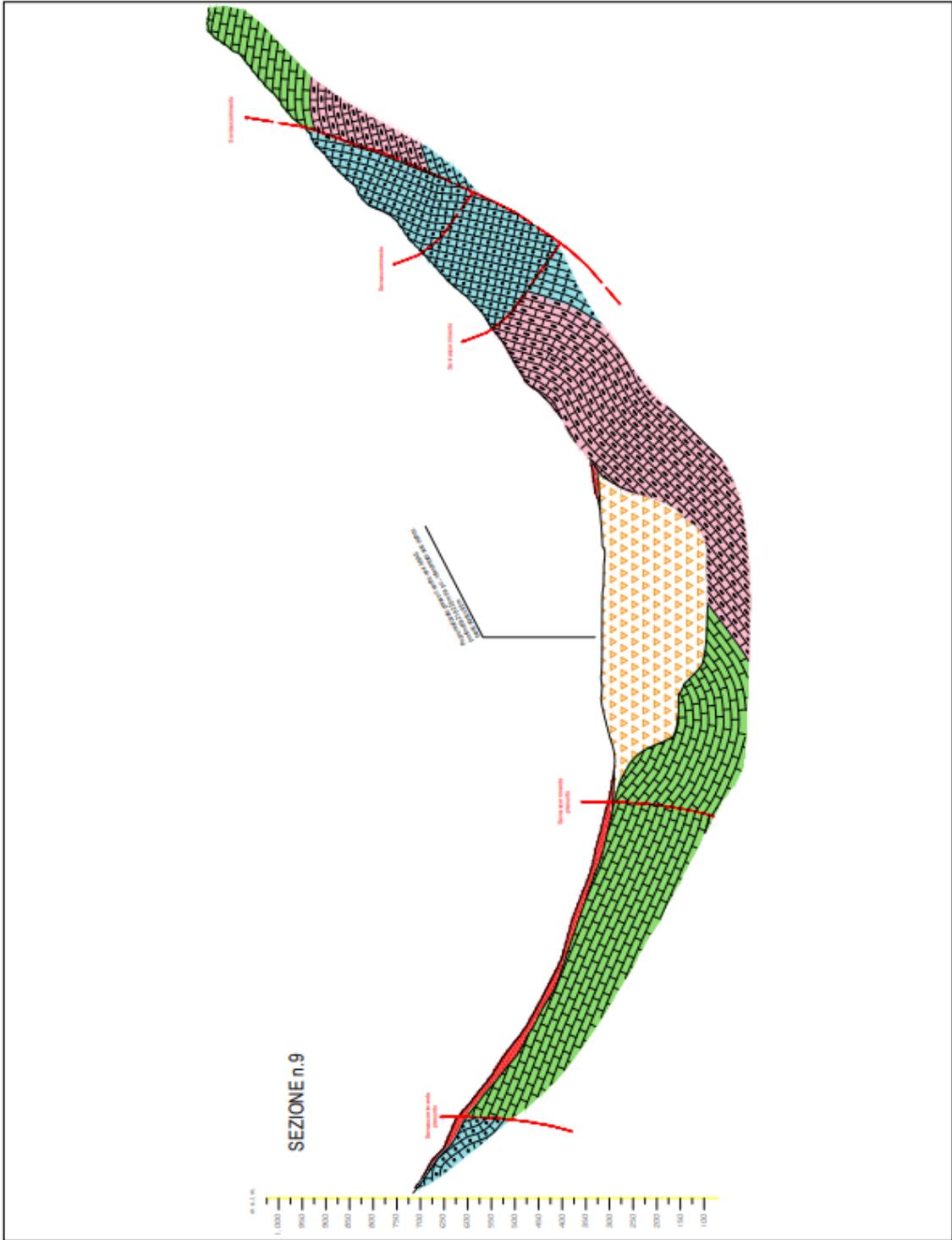


Figura 9-10: Sezione n.9

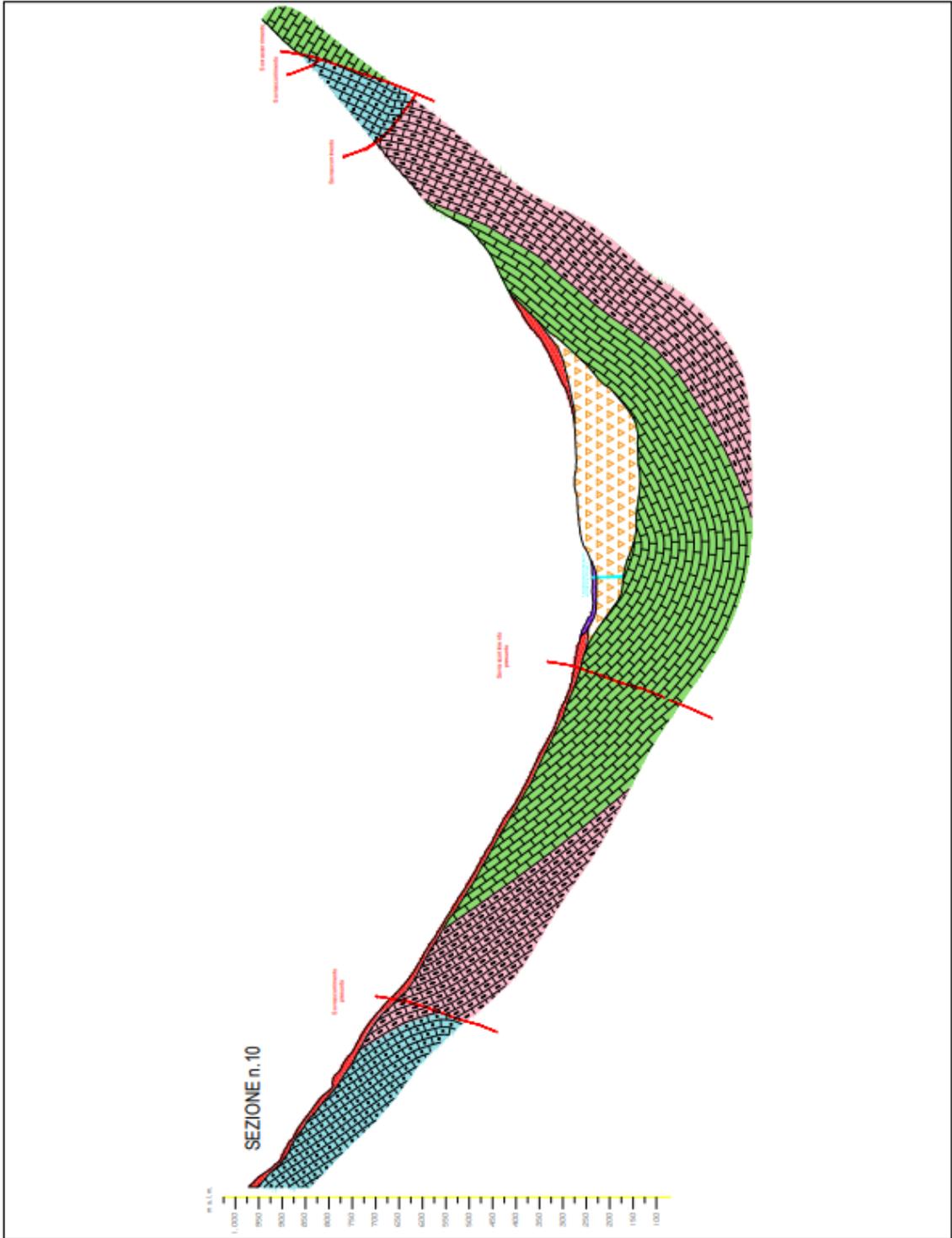


Figura 9-11: Sezione n.10

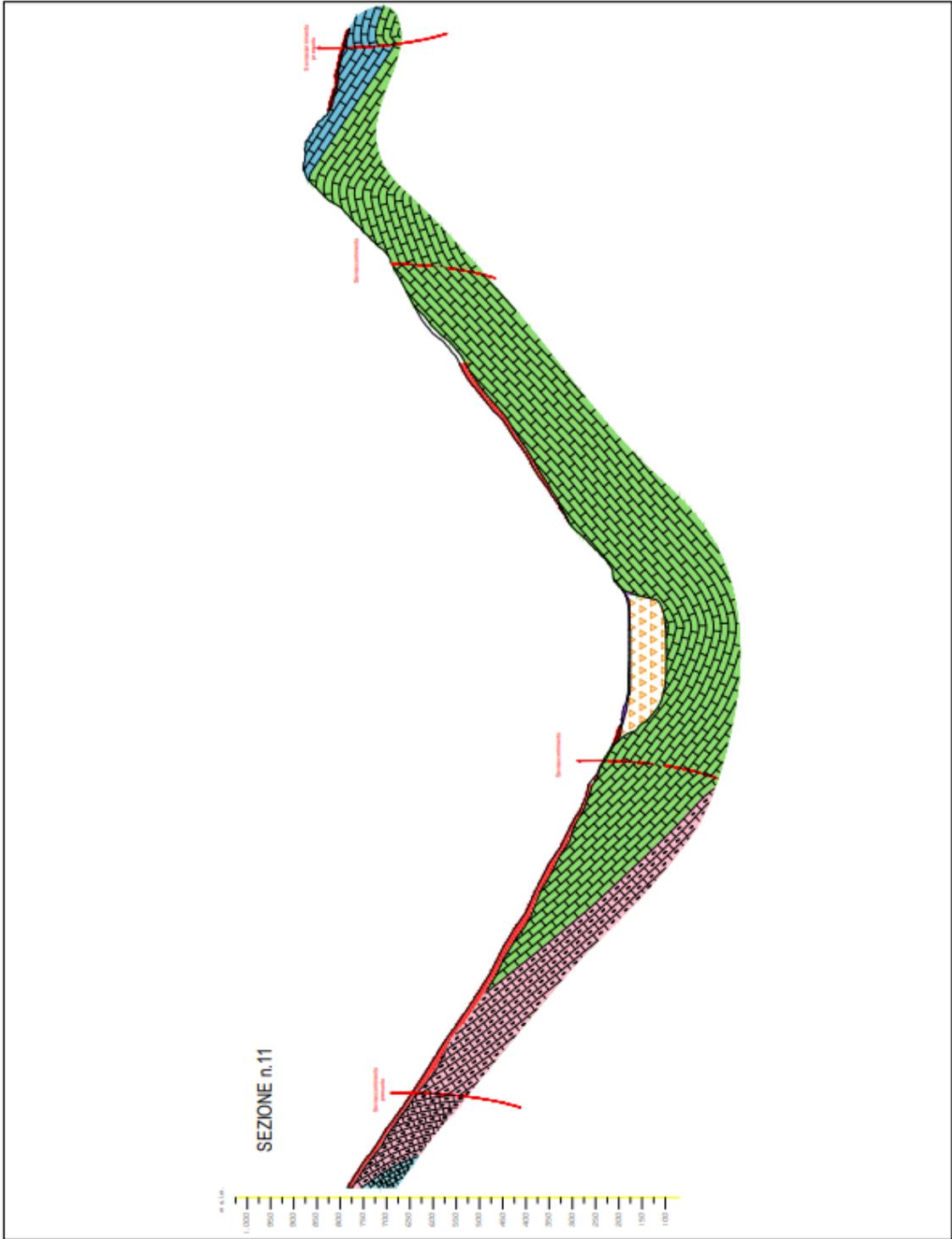


Figura 9-12: Sezione n.11

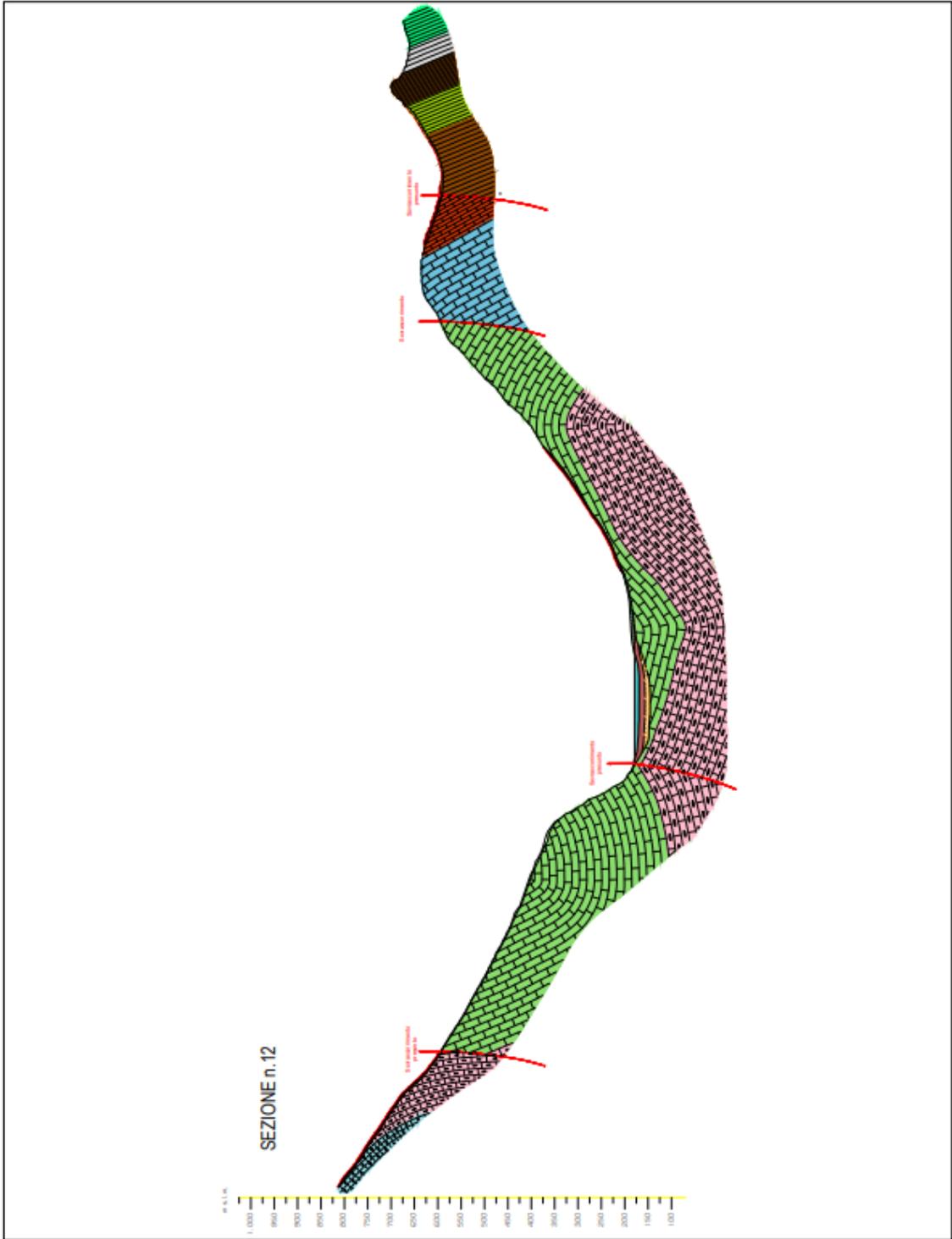


Figura 9-13: Sezione n.12

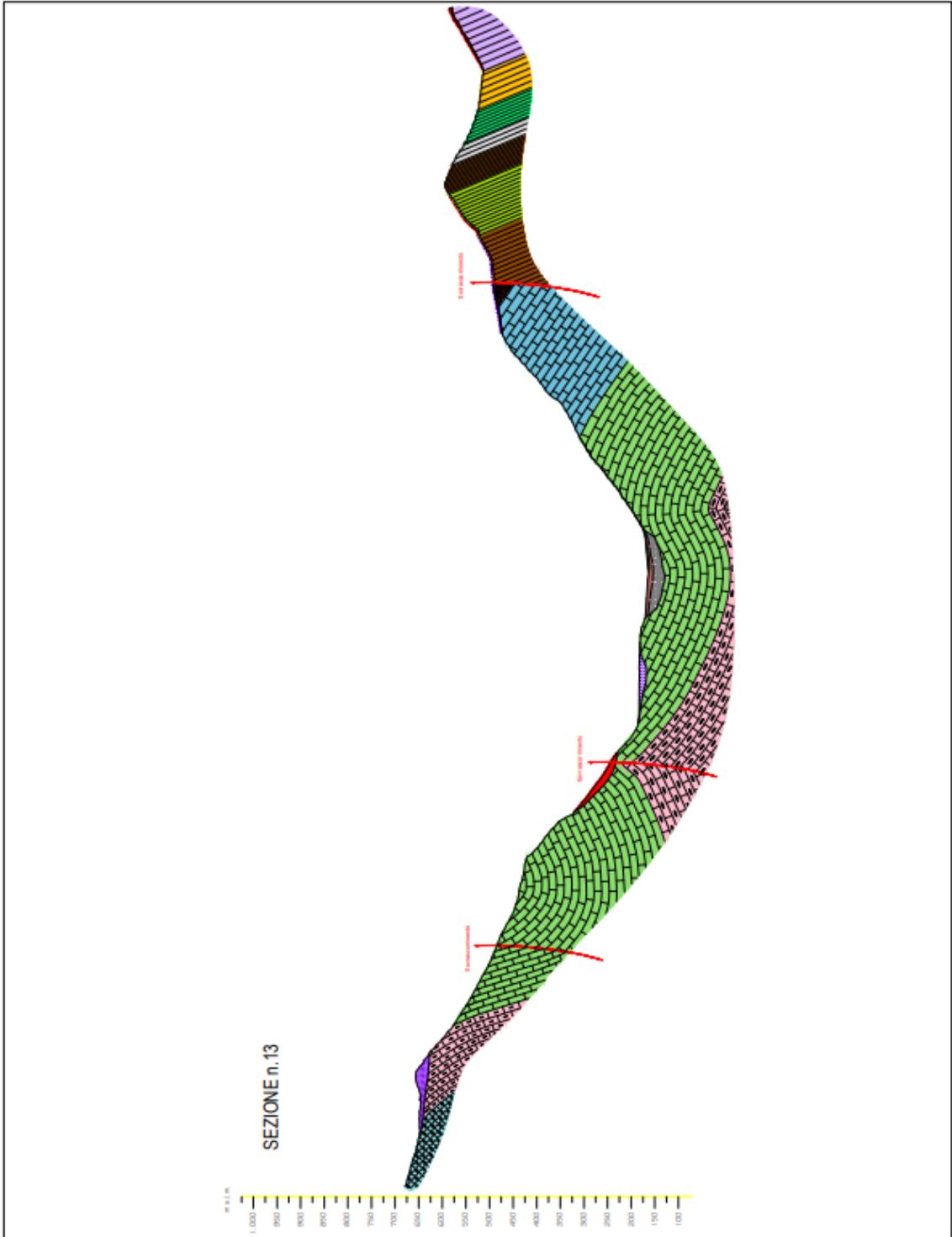


Figura 9-14: Sezione n.13

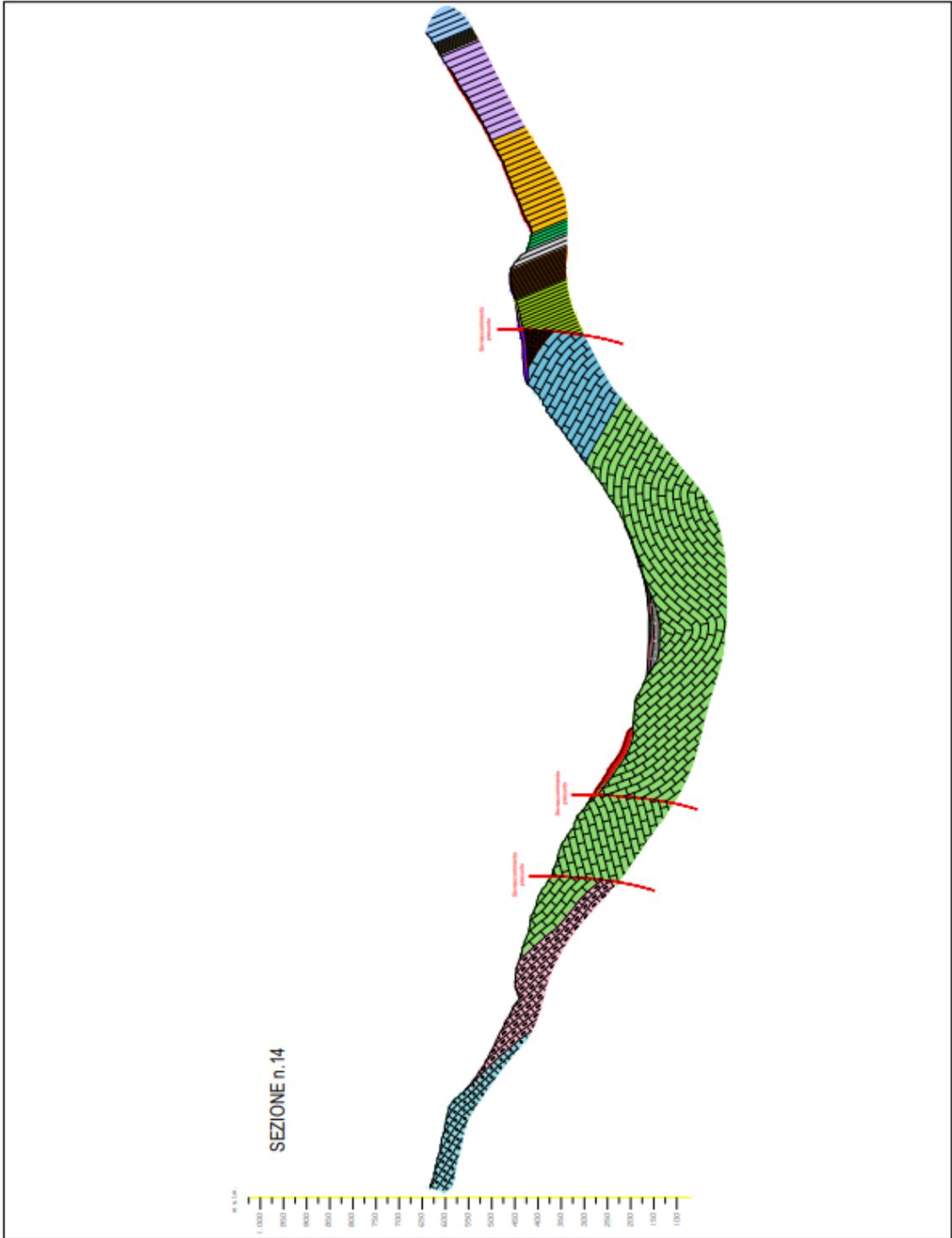


Figura 9-15: Sezione n.14

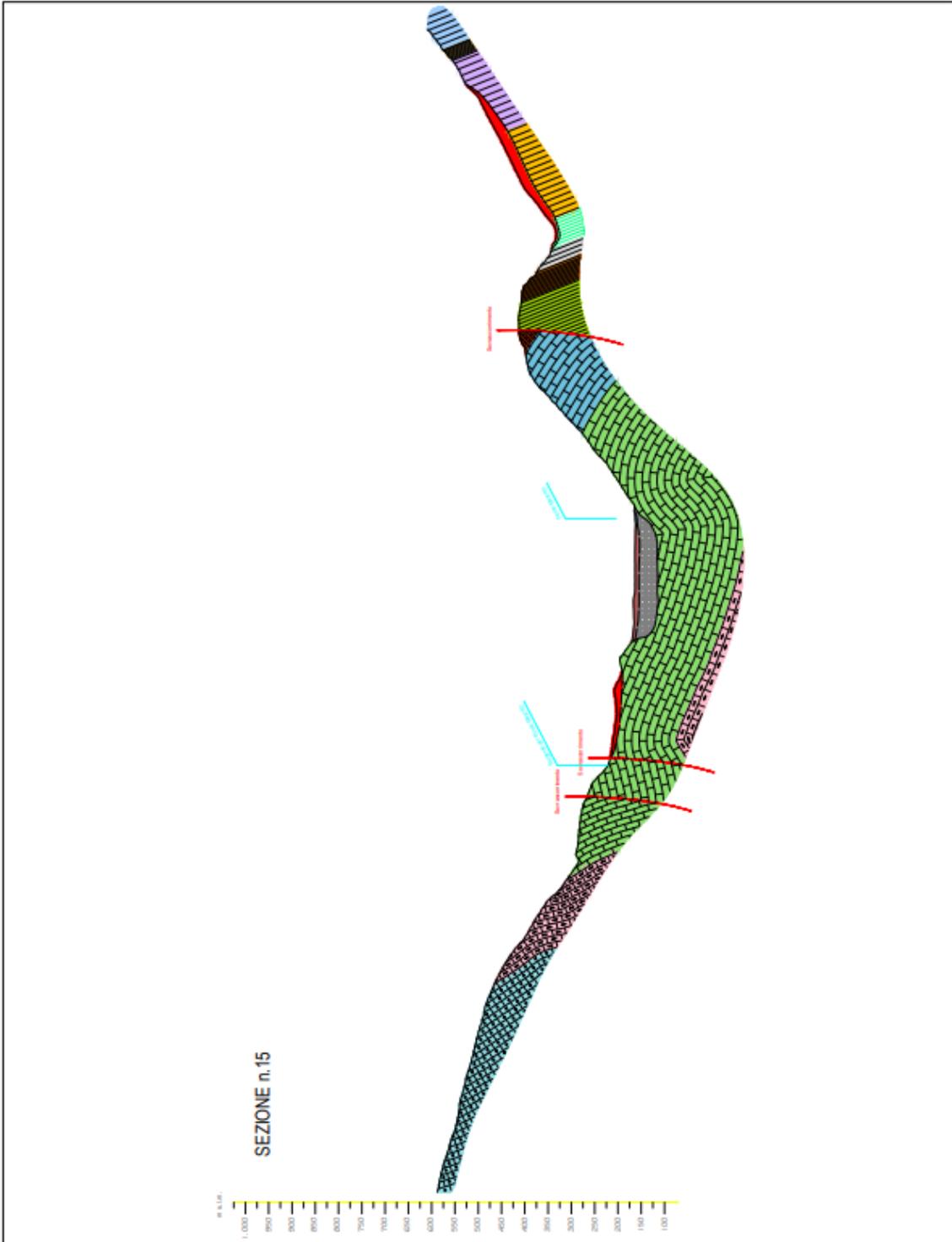


Figura 9-16: Sezione n.15

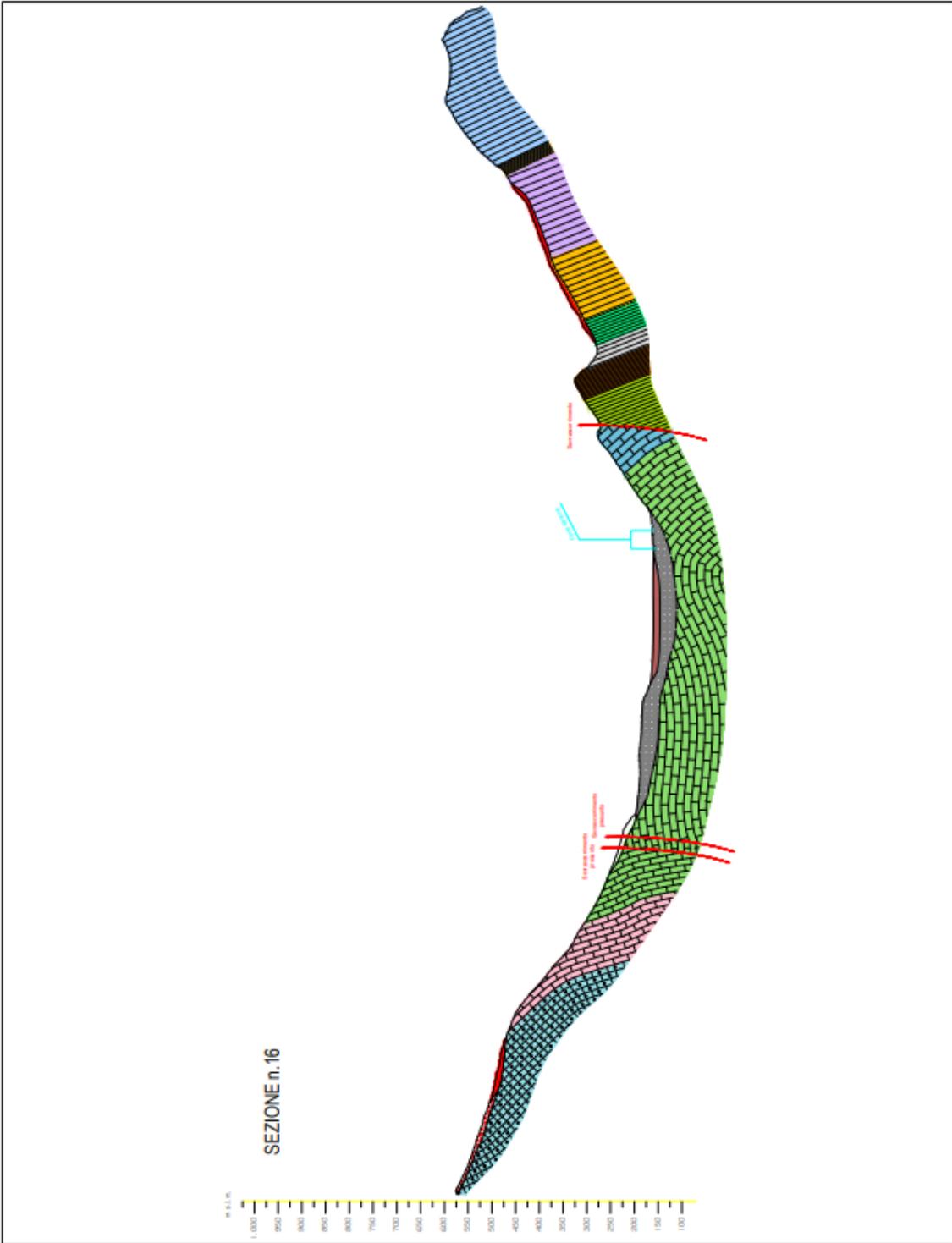


Figura 9-17: Sezione n.16

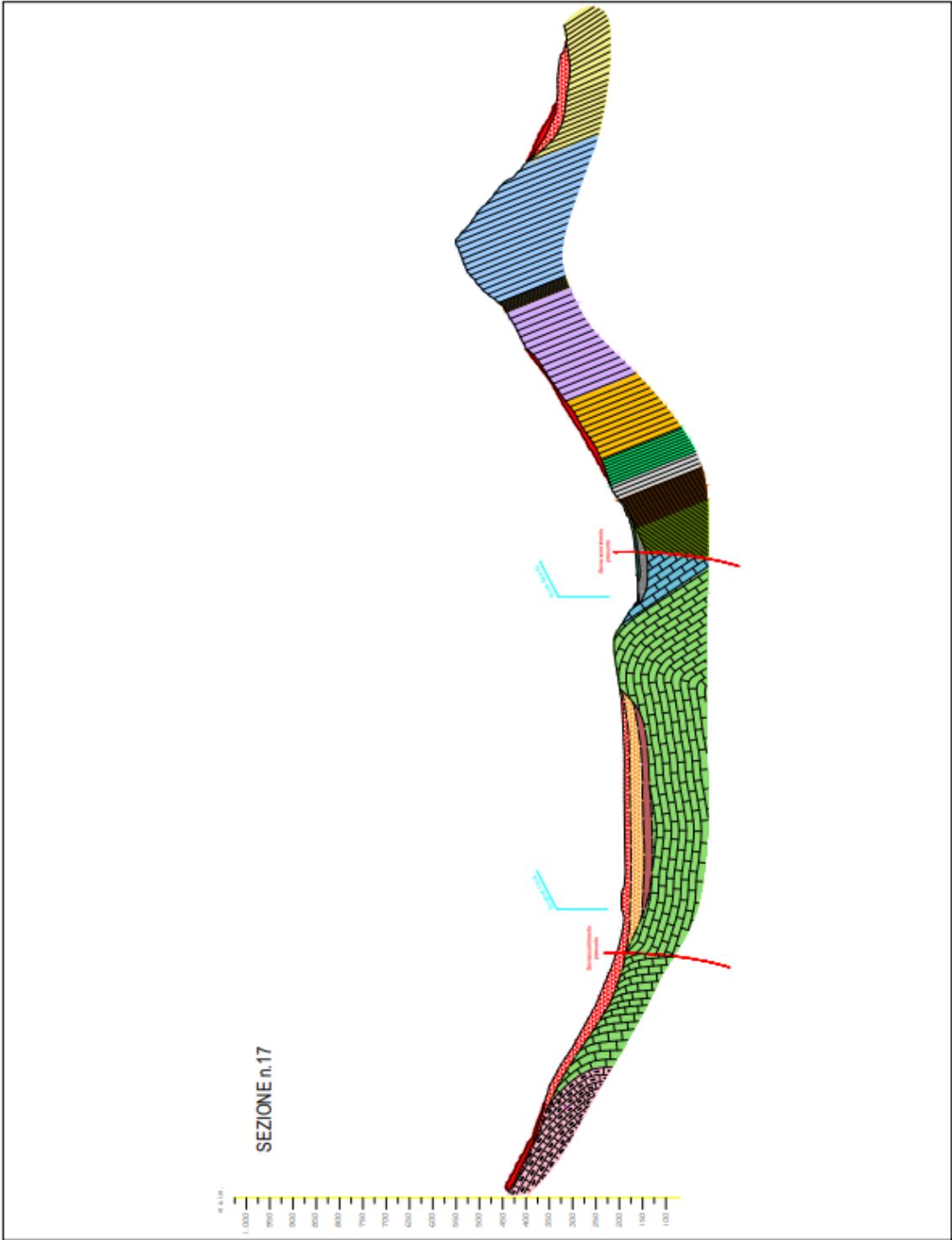


Figura 9-18: Sezione n.17

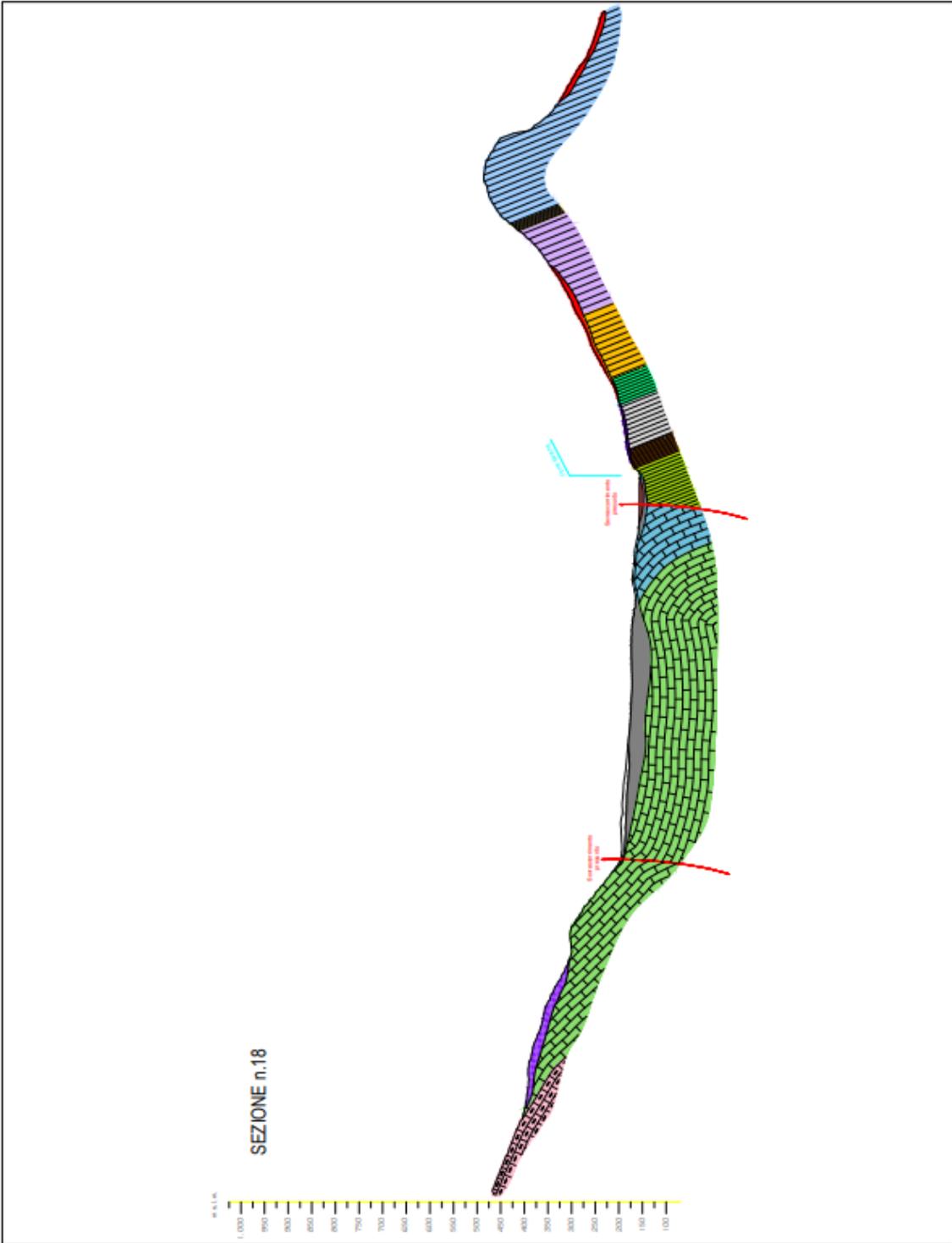


Figura 9-19: Sezione n.18

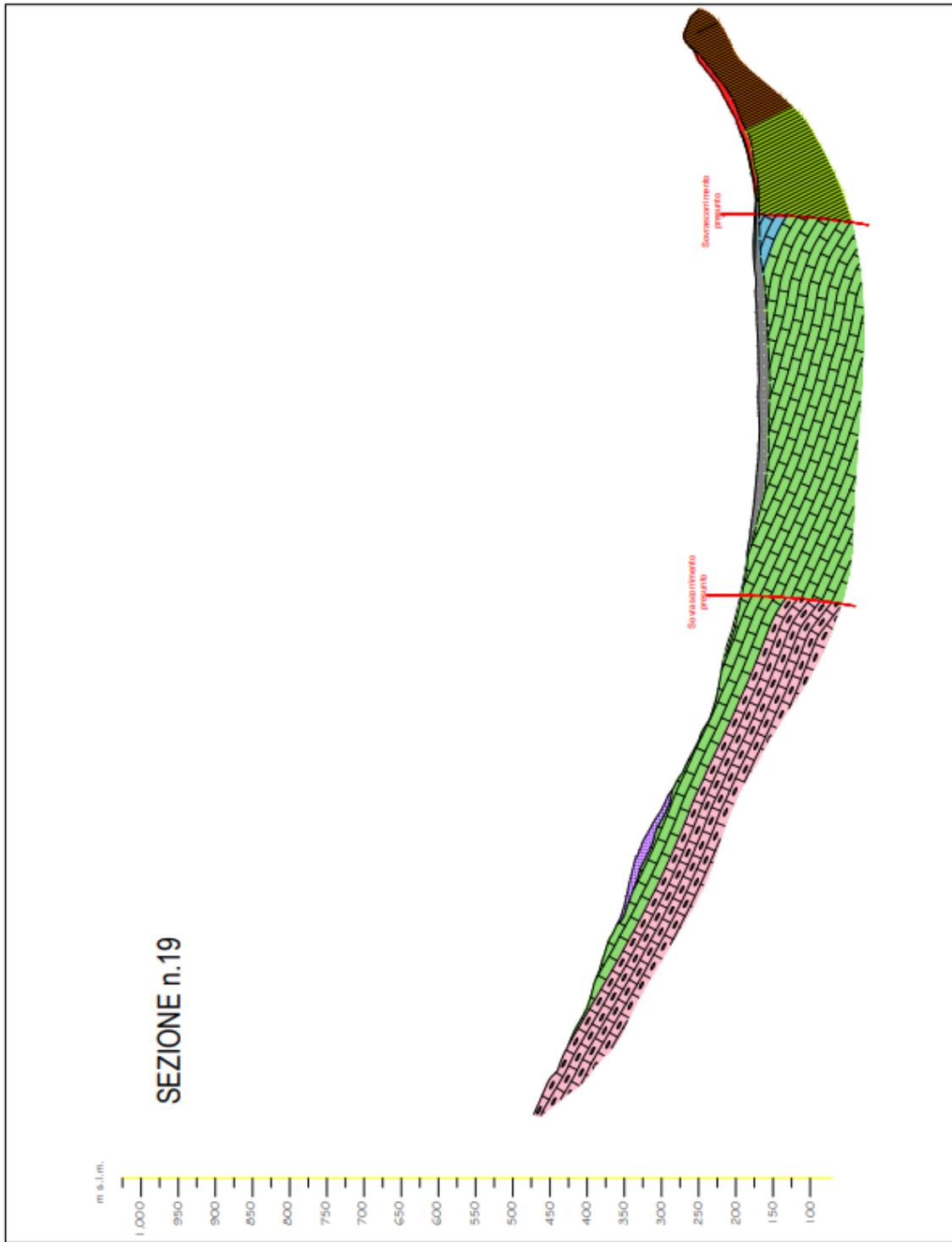


Figura 9-20: Sezione n.19

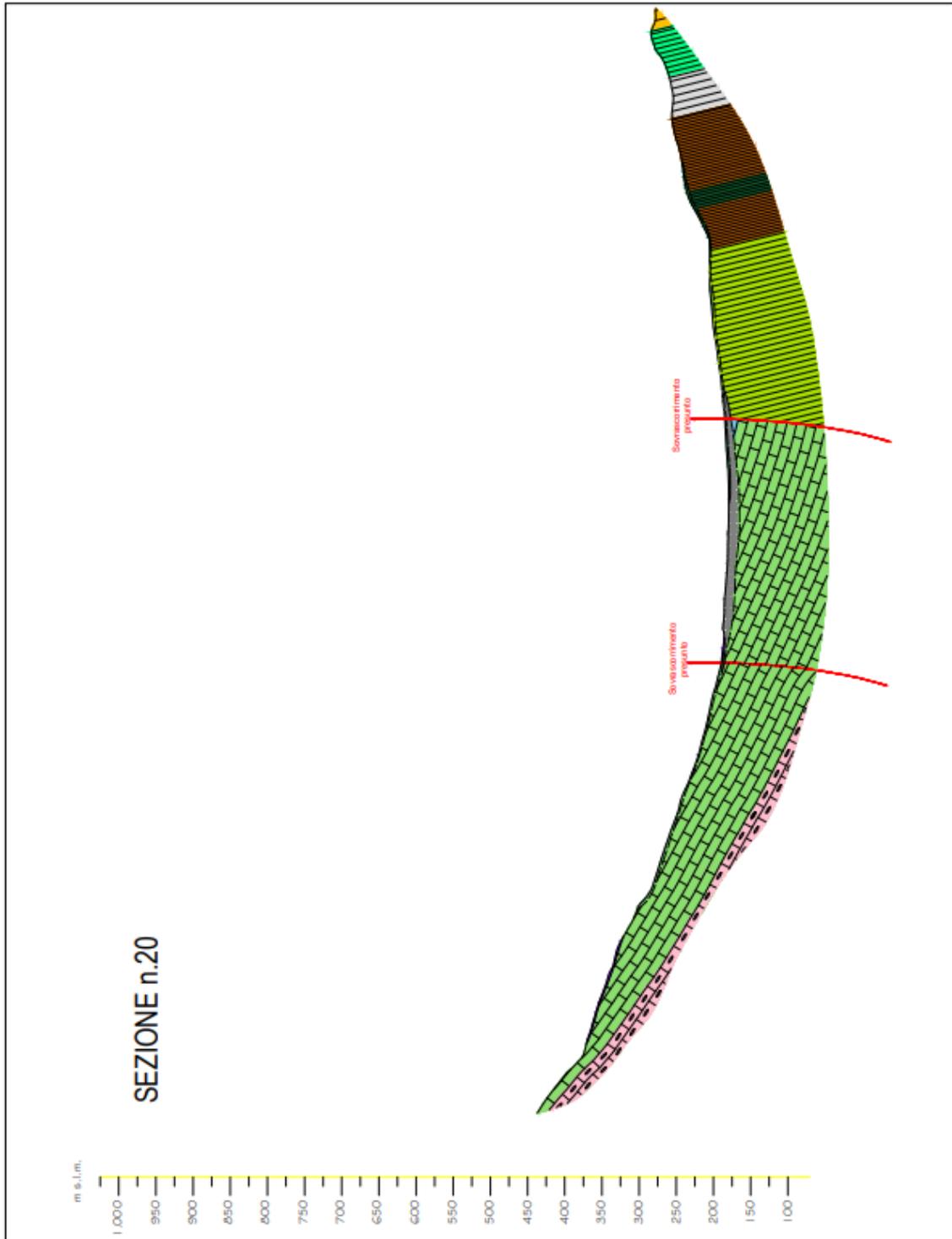


Figura 9-21: Sezione n.20

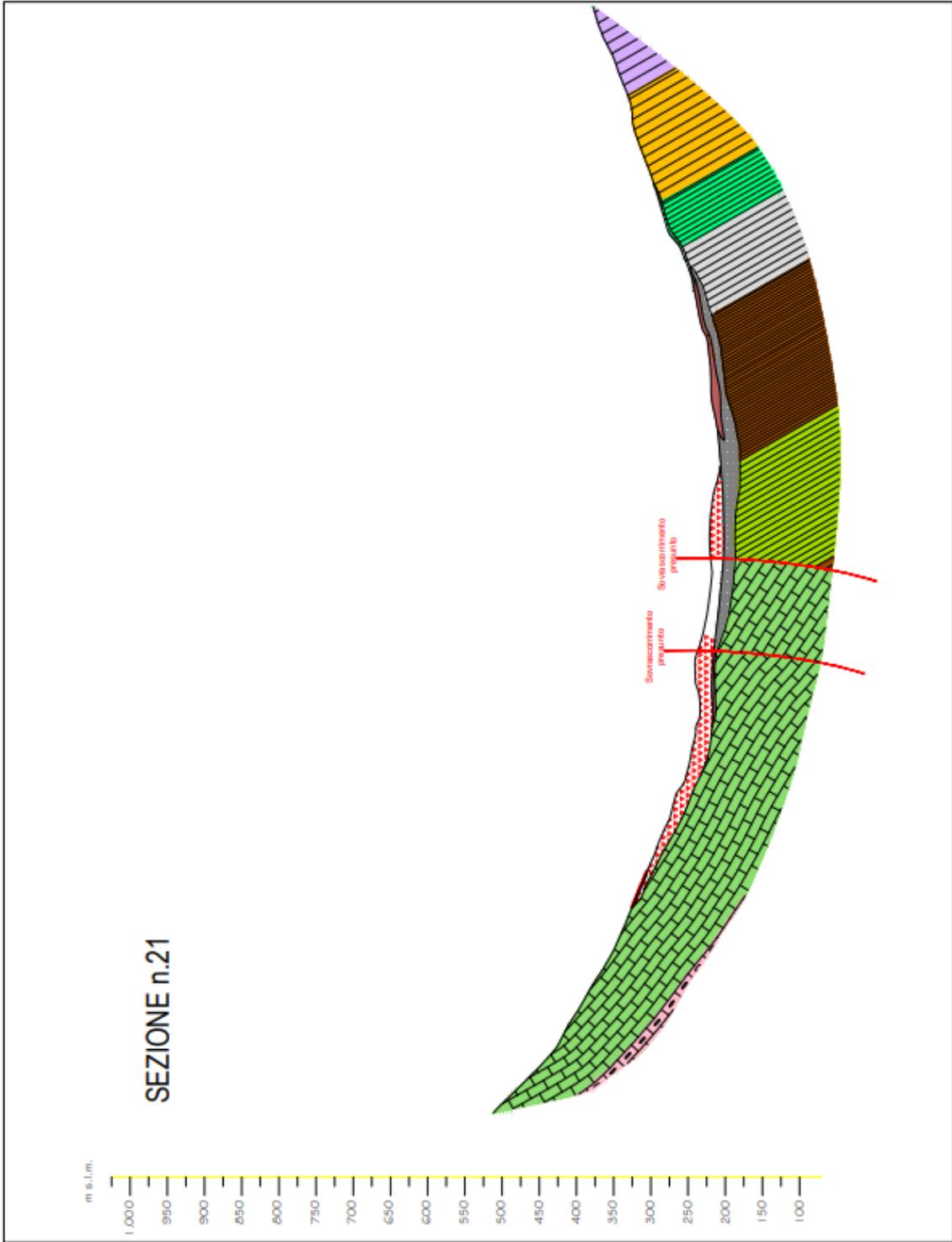


Figura 9-22: Sezione n.21

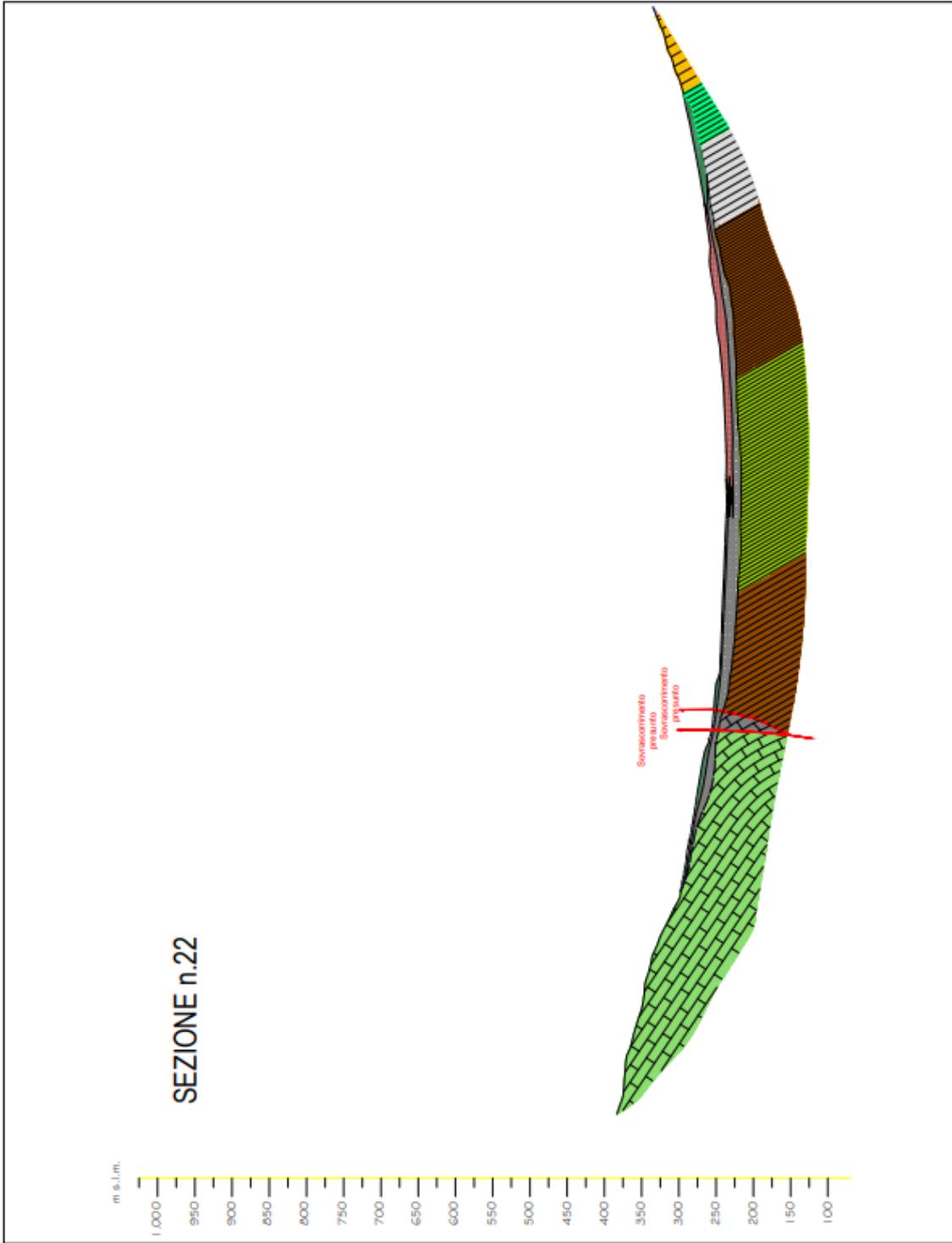


Figura 9-23: Sezione n.22

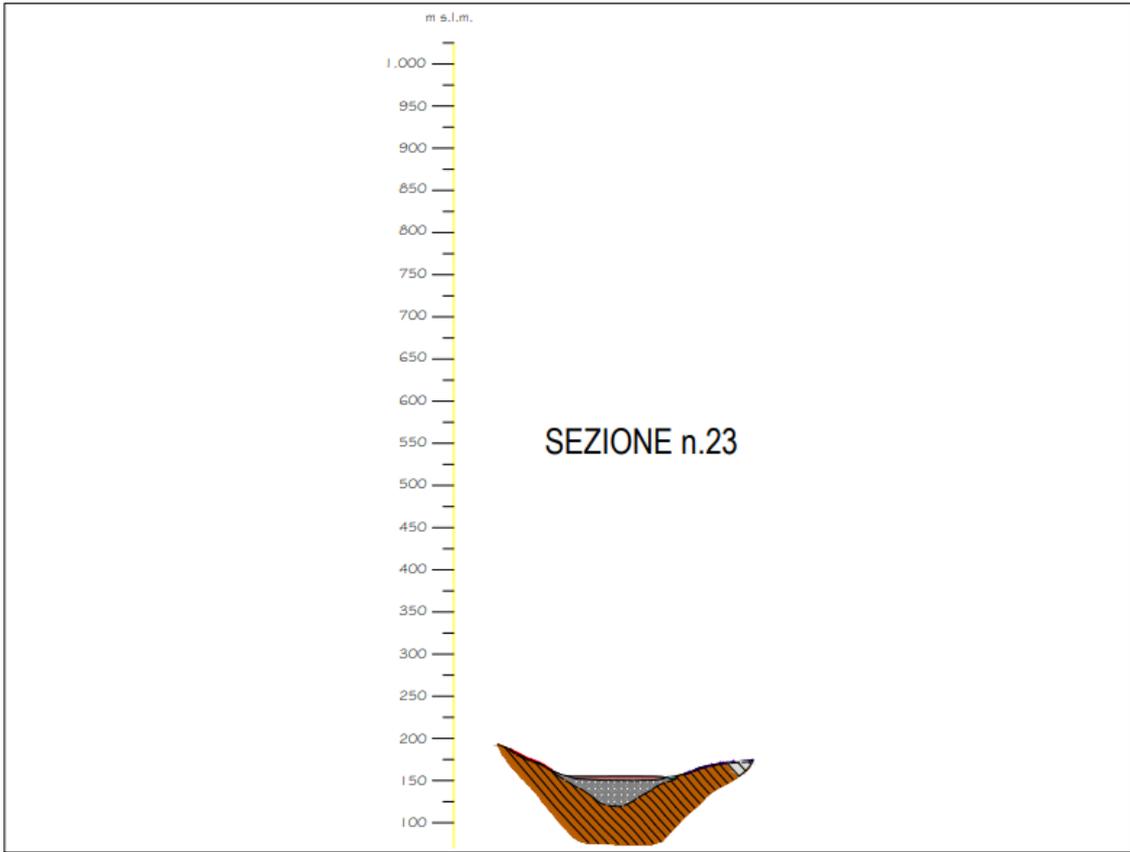


Figura 9-24: Sezione n.23

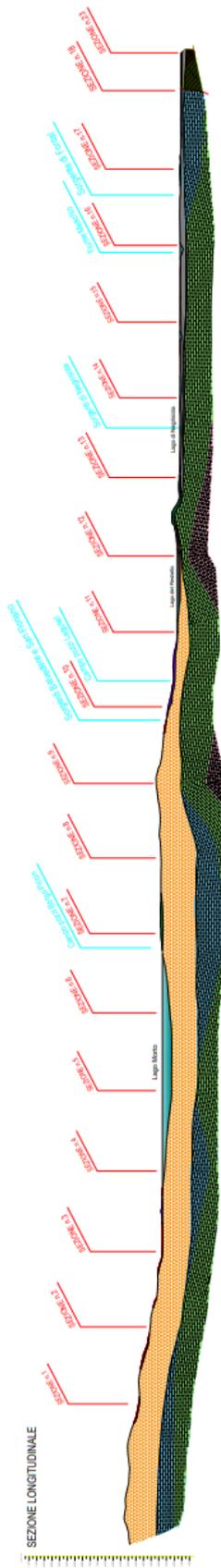
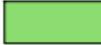


Figura 9-25: Sezione longitudinale

+

LITOLOGIE

	Formazione del Monte Baldo		Scaglia rossa e Scaglia grigia
	Marna di Monfumo		Calcare di Fadalto
	Arenaria di San Gregorio		Maiolica
	Marna di Bolago		Formazione di Fonzaso e Rosso Ammonitico
	Arenaria di Libano		Calcare di Vajont
	Siltite dei Casoni		
	Calcarenite di Castelcucco		
	Arenarie Glauconitiche di Belluno e Siltite di Bastia		
	Flysch di Belluno		

FORME E DEPOSITI QUATERNARI

	Deposito di frana antico		Deposito eluvio-colluviale
	Deposito di frana recente		Deposito glaciale
	Corpi idrici		Deposito di contatto glaciale
	Deposito colluviale a prevalente tessitura ghiaiosa		Detrito di versante
	Deposito colluviale a prevalente tessitura limoso-argillosa		Terrapieno
	Deposito di fondovalle a prevalente tessitura ghiaiosa		
	Deposito di fondovalle a prevalente tessitura limoso-argillosa		

Figura 9-26: Legenda delle litologie e delle forme e depositi quaternari.

10 Bibliografia

Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport* (2. ed.). Academic press, London. ISBN: 978-0-12-058103-0.

Carlson, R.E., Foley, T.A. (1992). Interpolation of track data with radial basis methods. *Computers & Mathematics with Applications*, 24(12): 27-34, [https://doi.org/10.1016/0898-1221\(92\)90169-I](https://doi.org/10.1016/0898-1221(92)90169-I)

Costa, V., Doglioni, C., Grandesso, P., Masetti, D., Pellegrini, G.B., & Tracanella, E. (1992). Note illustrative del F° 063 Belluno. *Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000*, San Donato Milanese, pp. 17-19, 27-47.

Barazzuoli, P., & Salleolini M. (1993). L'acqua: risorsa, rischio e pianificazione. In: "La storia naturale della Toscana meridionale", a cura di: Giusti F., Amilcare Pizzi Editore, Cinisello Balsamo (MI). ISBN: 978-88-366-0440-1.

Bondesan, A., Busoni, S. & Preto, N. (2009). *Carta geologica della provincia di Treviso. Sezioni n.063120 "Nevegal", 064090 "Fadalto", 063160 "San Floriano" e 084040 "Vittorio Veneto"*, scala 1:10000.

Bozzolan, M. (1992). *Geologia e Geomorfologia della Valle Lapisina dalla Sella di Fadalto a Serravalle (TV)*. Tesi di laurea in Scienze Geologiche, Università di Padova, pp. 14- 86.

Busoni, S., & Bondesan, A. (2019). I segni del passato geologico. *Viaggio tra i geositi della provincia di Treviso*. Antiga Edizioni, Crocetta del Montello, Treviso, pp. 32-38, 43-44, 99, 116-119.

Dal Prà, A., & Della Libera, A. (1993). *Studio Idrogeologico dell'inquinamento da Terbutilazina nella falda della valle di Fadalto*. Relazione inedita per il Consorzio Acquedotto Sinistra Piave, Conegliano, Treviso.

Della Libera, A. (2004). *Il linguaggio delle pietre*. Dario De Bastiani Editore, Godega di Sant'Urbano, Treviso, pp.17-103.

Doherty, J. (2015) *Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models*. Watermark Numerical Computing, Brisbane, Australia. ISBN: 978-0-9943786-0-6.

Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C., & McDonald, M. G. (2000). *Modflow-2000, the u. S. Geological survey modular ground-water model-user guide to modularization concepts and the ground-water flow process*.

Herschy, R.W. (2009). *Streamflow Measurement*. Third Edition, CRC Press, <https://doi.org/10.1201/9781482265880>.

Kresic, N., & Mikszewski, A. (2012). *Hydrogeological conceptual site models: data analysis and visualization*. CRC press.

Lucchetta, G. (2023). *Relazione Geologica*. P.A.T. Comune di Vittorio Veneto, pp. 9-10.

Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of RTRI*, 30(1), pp. 25-33.

Niswonger, R. G., Panday, S., & Ibaraki, M. (2011). MODFLOW-NWT, a Newton formulation for MODFLOW-2005. *US Geological Survey Techniques and Methods*, 6(A37), 44 p.

Nuova A.G.E.P.I. S.r.l. (2024). *Studio sulla protezione delle risorse idriche della Val Lapisina*. San Vendemiano, Treviso.

Pellegrini, G.B. (2018). *Geomorfologia del territorio bellunese negli scritti di Giovanni Battista Pellegrini*. Fondazione G. Angelini con Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Grafiche Erredici, Padova.

Pollock, D.W. (2016). *User guide for MODPATH Version 7. A particle-tracking model for MODFLOW*: U.S. Geological Survey Open-File Report 2016-1086, 35 p., <http://dx.doi.org/10.3133/ofr20161086>.

Thornthwaite, C.W., & Mather, J.R. (1957). Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. 10(3), C.W. Thornthwaite Associates, Laboratory of Climatology, Elmer, NJ, USA.

11 Ringraziamenti

Ed eccoci arrivati alla parte più importante... i ringraziamenti! Scherzi a parte, ci sono alcune persone che desidero ringraziare dal più profondo del cuore, che in qualche modo hanno reso possibile il raggiungimento di questo traguardo e reso speciali questi anni di università.

Prof. Leonardo Piccinini, grazie per avermi guidato nel percorso della mia tesi, per la pazienza e la grandissima disponibilità, nonché per tutte le conoscenze e i consigli che mi ha messo a disposizione.

Ai ragazzi di Nuova A.G.E.P.I., Federico, Filippo e Veronica, per avermi ospitato nel mio periodo di tirocinio, momento fondamentale per la mia formazione. Con voi ho imparato un sacco di cose che saranno importantissime per il mio futuro e senza il vostro aiuto non sarebbe stato possibile completare questa tesi.

Ai miei genitori, Alessandra e Stefano. È difficile esprimere a parole quanto voi siate importanti per me e tutta la gratitudine che provo nei vostri confronti. Mi avete sempre fatto sentire la vostra piena fiducia durante il mio percorso universitario, e questo non è scontato. Vi voglio bene!

A mio fratello Francesco, grazie perché so che il tuo sostegno è sempre presente, anche da lontano. La passione per la montagna, motivo primario per cui ho scelto di studiare geologia, ci unirà sempre.

Alla nonna Marisa, per il sostegno e l'amore incondizionato, oltre che per i favolosi pranzi che sono serviti a fornire l'energia necessaria per portare a termine questo lavoro.

A tutti i miei parenti, zii e cugini, perché la famiglia è la cosa più preziosa e il vostro sostegno fondamentale.

Ai miei compagni di corso, in particolare Riccardo, Ettore e Antonio, per tutte le avventure condivise in questi ultimi anni.

Agli scout, che sono un po' la mia seconda famiglia, in particolare la Comunità Capi del Mogliano 2. Grazie a tutti perché se non avessi condiviso questo cammino di vita con voi sarei sicuramente una persona differente.

Agli amici di sempre, grazie davvero perché alla fine voi siete i miei primi sostenitori, quindi questa tesi è anche un po' vostra.

*“Se il punto in cui ti immergi in un fiume è il presente,
allora il passato è l’acqua che ti ha superato,
quella che va verso il basso e dove non c’è più niente per te,
mentre il futuro è l’acqua che scende dall’alto,
portando pericoli e sorprese”*

Paolo Cognetti, *Le Otto Montagne*

Grazie di cuore a tutti,

Daniele





