



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI GEOSCIENZE

Direttore Prof. Nicola Surian

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN

GEOLOGIA AMBIENTALE E DINAMICA DELLA TERRA

**“VALUTAZIONE DELL'INQUINAMENTO DELLE SORGENTI  
SAMPOI (BL) ATTRAVERSO MODELLAZIONE NUMERICA”**

**“EVALUATION OF POLLUTION IN THE SAMPOI SPRINGS (BL) THROUGH  
NUMERICAL MODELING”**

Relatore: Prof. Leonardo Piccinini

Correlatore: Prof.ssa Christine Meyzen

Laureando: Manuel Frasnelli

Matricola n. 2088649

ANNO ACCADEMICO 2023/2024



## **Abstract**

La tesi analizza l'inquinamento delle sorgenti Sampo (BL) tramite modellazione numerica, utilizzando il codice MODFLOW-2005 e l'interfaccia grafica ModelMuse per simulare il flusso delle acque sotterranee e la dispersione degli inquinanti. L'obiettivo è fornire una comprensione approfondita delle dinamiche di contaminazione e per futuri sviluppi di strategie di mitigazione. L'uso di software come ModelMuse permette di rappresentare graficamente i risultati, facilitando l'interpretazione delle complesse interazioni del sistema idrogeologico. I dati di campo sono impiegati per calibrare e validare le simulazioni, garantendo un'accurata corrispondenza con le condizioni reali. Infine, mediante il codice MODPATH, vengono tracciati i percorsi di migrazione delle particelle per identificare l'origine del flusso e valutare l'eventuale contatto con fonti primarie di contaminazione.

# INDICE

1. INTRODUZIONE
2. Error: Reference source not found
3. GEOLOGIA, GEOMORFOLOGIA E IDROGEOLOGIA
  - 3.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO
  - 3.2 INQUADRAMENTO STRUTTURALE
  - 3.3 INQUADRAMENTO STRATIGRAFICO
  - 3.4 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO
4. DATI IDROGEOLOGICI E DELLA CONTAMINAZIONE
  - 4.1 RICOSTRUZIONE SUPERFICI POTENZIOMETRICHE
  - 4.2 CONDUCIBILITÀ IDRAULICA DEL SOTTOSUOLO
  - 4.3 BILANCIO IDRICO DEL SUOLO
    - 4.3.1 PRECIPITAZIONE E TEMPERATURA
    - 4.3.2 EVAPOTRASPIRAZIONE REALE E SURPLUS
    - 4.3.3 INFILTRAZIONE
  - 4.4 DISTRIBUZIONE DEI CONTAMINANTI
    - 4.4.1 DISTRIBUZIONE DEI CONTAMINANTI NELLA RETE PIEZOMETRICA
    - 4.4.2 ANALISI DI CONTAMINAZIONE NELLE SORGENTI SAMPOI
  - 4.5 MODELLO IDROGEOLOGICO CONCETTUALE E DELLA CONTAMINAZIONE
5. METODI
  - 5.1 APPROCCIO METODOLOGICO ED OBIETTIVI DELLE SIMULAZIONI
  - 5.2 DOMINIO DI MODELLAZIONE E DISCRETIZZAZIONE GEOMETRICA
  - 5.3 PARAMETRIZZAZIONE DELLE UNITÀ IDROGEOLOGICHE

**5.4 CONDIZIONI AL CONTORNO E DISTRIBUZIONE INIZIALE DEL CARICO IDRAULICO**

**5.5 DISCRETIZZAZIONE TEMPORALE E METODI RISOLUTIVI**

**5.6 STRATEGIA DI CALIBRAZIONE, PUNTI DI CONTROLLO ED ANALISI DEGLI INDICATORI STATISTICI**

**5.7 CALCOLO DEI PERCORSI DI MIGRAZIONE DELLE PARTICELLE**

**6. RISULTATI**

**6.1 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI DI CALIBRAZIONE**

**6.2 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI PREVISIONALI DI TRASPORTO ADVETTIVO**

**7. CONCLUSIONI**

**8. BIBLIOGRAFIA**

**9. ALLEGATI**



## 1. Introduzione

Nel gennaio 2001, durante un monitoraggio effettuato dall'Agenda Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto (ARPAV), Dipartimento di Belluno e dall'Unità Locale Socio-Sanitaria (ULSS) volto a verificare l'idoneità delle sorgenti dell'acquedotto comunale di Sampoi in occasione della richiesta di rinnovo della concessione, è stata rilevata la presenza di solventi organoalogenati, in particolare: Triclorometano (Cloroformio o TCM), Tricloroetilene (o Trielina o TCE), Tetracloroetilene (PCE), Dibromoclorometano, Bromodichlorometano, 1,2-dicloropropano e 1,1,2 Tricloroetano (Tricloruro di Vinile). Le analisi successive hanno confermato tale contaminazione, evidenziando concentrazioni superiori ai limiti stabiliti sia per l'acqua potabile (allora DPR 236/88, successivamente modificato dal D.Lgs. 31/01) che per le acque sotterranee (allora DM 471/99, successivamente modificato dal D.Lgs. 152/06).

Nel momento in cui è stato riscontrato l'inquinamento presso le sorgenti Sampoi, l'Amministrazione Comunale di Limana insieme alle pubbliche amministrazioni competenti (ARPAV Belluno, Provincia di Belluno) hanno realizzato una serie di attività di indagine e controllo, per l'individuazione delle possibili sorgenti di contaminazione, comprendenti la ricognizione dei potenziali centri di pericolo presenti su tutto il territorio interessato.

Una prima fase di studio ha avuto luogo tra il 2001 e il 2004 attraverso un Piano di Caratterizzazione di iniziativa pubblica, curato dal Dott. Colleselli ed il Prof. Petitta per il Comune di Limana, che ha comportato la realizzazione di una rete preliminare di monitoraggio idrogeologico e idrochimico. Una seconda fase di indagini, sempre a cura del Dott. Colleselli è stata condotta, tra il 2011 e il 2014. Contestualmente a questa seconda fase, sono state effettuate indagini integrative di carattere isotopico riguardanti sia la molecola d'acqua che i composti organoclorurati più diffusi nelle acque sotterranee (*Colleselli & Petitta, 2015*).

In questo contesto si sviluppa la tesi, che si propone di valutare l'inquinamento da Tetracloroetilene (PCE) e Triclorometano (Cloroformio o TCM) nelle Sorgenti

Sampoi del Comune di Limana. Il PCE, liquido a temperatura ambiente, è classificato come possibile cancerogeno dall'International Agency for Research on Cancer (IARC), mentre il TMC è un liquido trasparente non solubile in acqua considerato anch'esso un possibile cancerogeno. È stata rilevata anche la presenza di Tricloroetilene, ovvero un liquido incolore denso che lo IARC considera un possibile cancerogeno per l'uomo, ed il 1,1,2 Tricloroetano, ovvero un solvente clorurato liquido e volatile a temperatura ambiente riconosciuto come cancerogeno di gruppo 1 (certamente cancerogeno per l'uomo).

Questo studio ha l'obiettivo di sviluppare un modello idrogeologico concettuale che descriva l'evoluzione della contaminazione nell'area a monte delle sorgenti Sampoi, attraverso simulazioni numeriche di flusso delle acque sotterranee e della componente advettiva del trasporto. Il modello concettuale è stato delineato a partire dall'analisi dei dati di tipo geologico e idrogeologico disponibili sull'area. Successivamente, sono stati analizzati i dati meteorologici delle Prealpi Bellunesi per stimare i valori di infiltrazione e surplus idrico nel Comune di Limana. Per definire il grado di contaminazione, sono stati esaminati i dati delle sorgenti e dei campioni d'acqua prelevati dai piezometri di monitoraggio, confrontando i risultati con i limiti stabiliti dal D.Lgs. 152/06 per capire se superassero o meno la concentrazione soglia di contaminazione (CSC). Infine, utilizzando i codici MODFLOW-2005 e MODPATH, sono stati tracciati i percorsi di migrazione delle particelle al fine di individuare l'origine dell'alimentazione delle sorgenti Sampoi. Diversi scenari sono stati simulati variando la porosità efficace dei materiali che costituiscono l'acquifero freatico presente nell'area di studio.

## **2. Inquadramento Geografico**

Il territorio comunale di Limana è ubicato nelle Prealpi Bellunesi ed in particolare nella Valle del Piave.

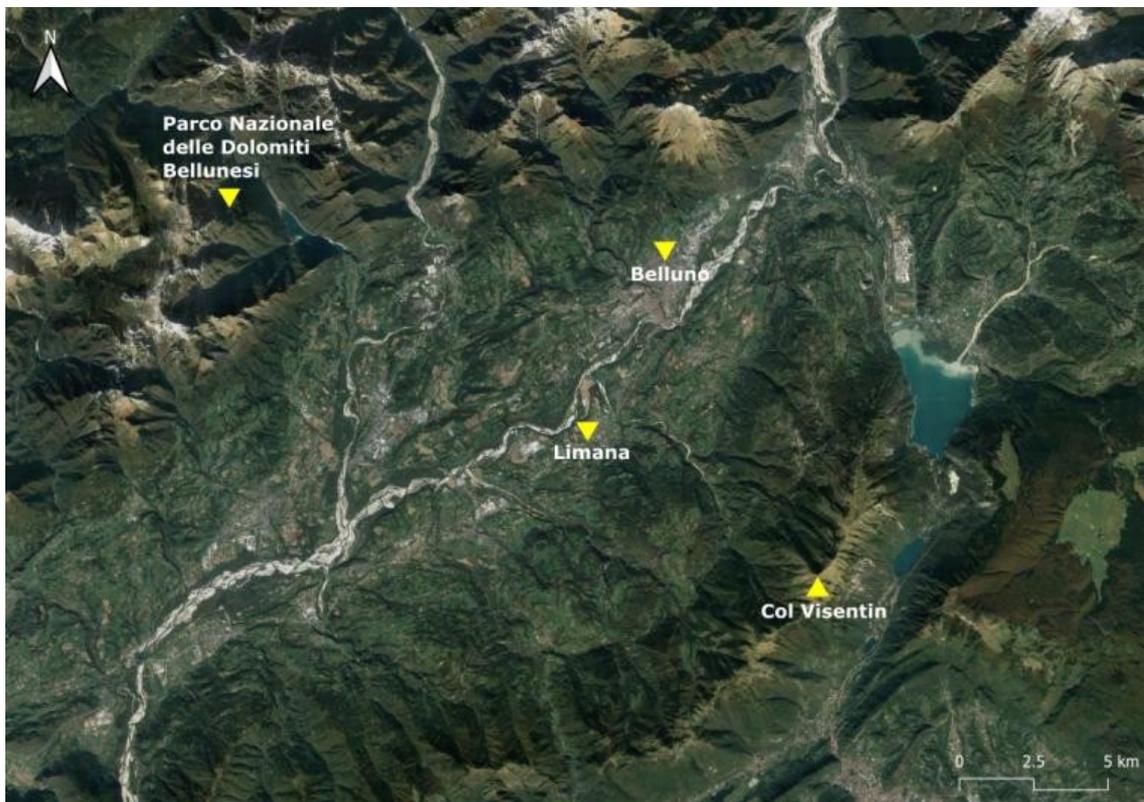
Le Prealpi Bellunesi sono delimitate a nord dalle Dolomiti Bellunesi, a sud dalla Pianura Veneta, a ovest dal Fiume Piave e a est dal bacino del Fiume Livenza. La

regione copre una vasta area che funge da transizione tra le alte cime dolomitiche e le zone collinari prealpine (*Figura 1*).

I massicci più rilevanti delle Prealpi Bellunesi includono il Monte Grappa, il Col Visentin e il Gruppo del Nevegal. Il Monte Grappa (1775 m s.l.m.) è la vetta più alta, mentre altre vette significative sono il Col Visentin (1762 m s.l.m.) e il Monte Serva (2133 m s.l.m.), che domina la Valle del Piave.

La Valle del Piave, situata in Italia nord-orientale, si estende tra le regioni del Veneto e del Friuli-Venezia Giulia. Geograficamente, la valle è caratterizzata da un paesaggio variegato, che passa dalle montagne delle Dolomiti, con cime come il Monte Antelao e il Monte Civetta, a colline e pianure verso sud.

Il Fiume Piave nasce dalle Dolomiti Carniche, al Monte Peralba, attraversa l'estremità occidentale delle Prealpi Bellunesi e scorre verso sud attraversando le province di Belluno, Treviso e Venezia, fino a sfociare nel Mar Adriatico.



*Figura 1 - Immagine satellitare delle Prealpi Bellunesi a sud-ovest e della valle del Piave a nord-est.*

Il Comune di Limana si colloca nella Valle del Piave, tra la sponda sinistra dell'omonimo fiume e il versante settentrionale delle Prealpi Bellunesi. L'altimetria del Comune varia dai 320 m s.l.m. sul greto del Piave ai 1468 m s.l.m. del Monte Pezza.

Il comune, quindi, è attraversato dal Fiume Piave lungo il suo confine settentrionale, dal Torrente Cicogna lungo il margine orientale e dal Torrente Refos lungo il margine occidentale (*Figura 2*). Il Torrente Cicogna ha origine da numerosi ruscelli e rii minori in località Tibolla, alle pendici del Col Visentin. Il Torrente Refos ha origine a Navenze, una frazione di Limana, ridiscende il versante settentrionale della catena ed entra come affluente del Piave nei pressi dell'abitato di Pieve di Limana. Il suo affluente principale è il Torrente Baorche che attraversa e divide in due il centro abitato di Limana per poi unirsi al Torrente Refos più a valle.

Dal punto di vista cartografico il comune di Limana è rappresentato nel Foglio alla scala 1:50000 IGM 063 Belluno e dagli elementi alla scala 1:10000 della Carta Tecnica Regionale (CTR) del Veneto: 063060 Sedico, 063070 Belluno, 063100 Trichiana, 063110 Triches.



Figura 2 - Immagine satellitare di dettaglio del Comune di Limana (BL) con evidenziati il Fiume Piave ed i due suoi affluenti, il Torrente Cicogna ed il Torrente Refos.

### **3. GEOLOGIA, GEOMORFOLOGIA E IDROGEOLOGIA**

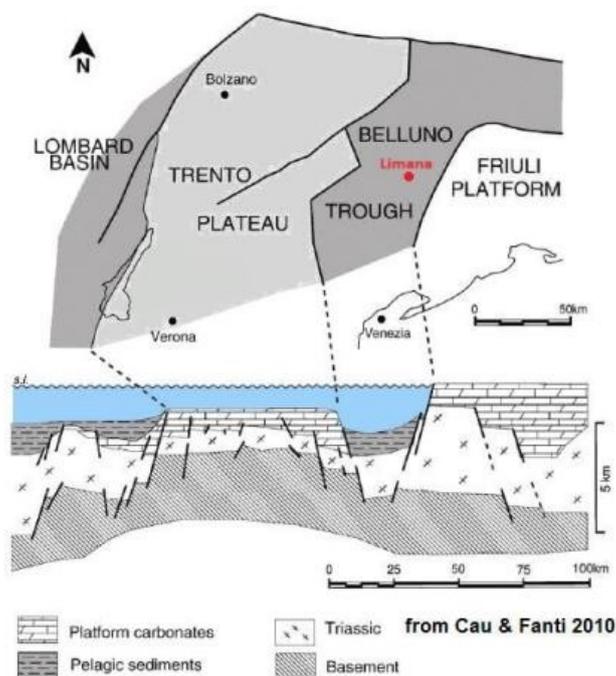
#### **3.1 Inquadramento Geologico e Geomorfologico**

Le Alpi Meridionali sono costituite da una successione sedimentaria complessa, costituita da rocce di età compresa dal Permiano al Neogene, che poggia su un basamento metamorfico ercinico.

In particolare, l'area di studio è collocata nel Bacino di Belluno, nella parte più meridionale delle Alpi Meridionali, che rappresentano il settore sud vergente della catena alpina italiana, separato dal settore nord vergente dalla Linea Insubrica (Lineamento Periadriatico).

Le formazioni sedimentarie del bacino di Belluno sono depositi sin-rift correlati alla tettonica estensionale mesozoica, successivamente deformati da eventi compressionali alpini. Questi sedimenti provengono da due piattaforme carbonatiche

giurassiche vicine. Infatti, verso la fine del Triassico, lo scenario paleogeografico dell'area dolomitica e dell'intero arco alpino meridionale cambiò in modo radicale. La fase di subsidenza differenziale e l'instaurazione di un regime distensivo riconducibile alla formazione del margine passivo, sono caratterizzati da elementi paleogeografici e paleostrutturali allungati in direzione nord-sud, noti in letteratura come Bacino Lombardo, Piattaforma Trentina, Bacino di Belluno e Piattaforma Friulana (*Figura 3; Bosellini & Hsu, 1973*)



*Figura 3 - Rappresentazione schematica della Piattaforma di Trento e del Bacino di Belluno con indicato in rosso la zona di indagine, da Cau & Fanti (2010).*

L'evoluzione stratigrafica del Giurassico in questa regione è caratterizzata da un'iniziale ingressione marina, che comporta una transizione dalla Dolomia Principale a formazioni più recenti come i Calcari Grigi, di colore blu in *Figura 4* e con il numero sedici in *Figura 5*, che si sono depositi in acque basse all'inizio del Giurassico, e una sequenza pelagica condensata definita Rosso Ammonitico. I Calcari Grigi sono suddivisi in tre unità stratigrafiche principali: il membro inferiore è rappresentato dalla Formazione di Monte Zugna, la quale è seguita dal membro intermedio costituito dall'Oolite di Loppio. Il membro superiore è identificato con la Formazione di Rotzo. Queste unità si sono depositate in successione stratigrafica,

riflettendo variazioni nelle condizioni deposizionali e ambientali durante il periodo in cui si sono formati.

Nel Giurassico Medio, le piattaforme carbonatiche subiscono un processo di crescita retrogradante seguite da un rapido annegamento, diventando in questo modo un plateau sommerso. A causa delle forti correnti marine che si vengono a formare alla base di questi plateau, il sedimento non riesce a depositarsi favorendo invece la precipitazione di ossidi ed idrossidi. Queste sono le condizioni favorevoli alle deposizioni pelagiche del Rosso Ammonitico Veronese inferiore, caratterizzate da calcari nodulari rosa e rossi, lamine marnose, bioturbazioni e fossili pelagici.

In particolare, nel Bacino di Belluno si accumula una potente successione che registra la fase di regressione della Piattaforma di Trento. Contemporaneamente ai Calcari Grigi si depositano la Dolomia di Schiara e la Breccia di Pelf, che corrispondono al materiale di collasso da slope della Piattaforma di Trento. Successivamente si deposita la Formazione di Sorvezene, calcari torbiditici che identificano lo sprofondamento definitivo. Il sovrastante intervallo temporale che va dal Thitoniano p.p. al Barremiano, sia nel Bacino Lombardo che sulla Piattaforma di Trento, è rappresentato dalla deposizione della Formazione della Maiolica: calcare micritico biancastro e selcifero di colore verde, in *Figura 4* e con il numero tredici in *Figura 5*. Il suo considerevole spessore (circa 250 m) testimonia una sedimentazione pelagica più continua ed a tasso elevato.

Con l'inizio del Cenozoico la Tetide Alpina entra in una fase compressionale e comincia ad elevarsi la Catena Eoalpina. Vengono identificate due fasi deformative principali: Mesoalpina e Neoalpina. Durante la Fase Mesoalpina l'area veneta è coinvolta in una serie di sovrascorrimenti e pieghe vergenti a ovest-sud ovest (W-SW), che rappresentano il fronte della Catena Dinarica. Il ciclo tettonico Neoalpino invece, è il responsabile del sollevamento definitivo delle catene montuose venete e del suo complesso assetto strutturale. Alcuni di questi sovrascorrimenti, come la Linea della Valsugana e quella di Pieve di Cadore, separano la copertura dal basamento, isolando verso nord l'ampio sinclinorio delle Dolomiti. Più a sud, nelle Prealpi Venete, la copertura sedimentaria è intensamente deformata da pieghe e sovrascorrimenti, per i quali il livello di scollamento rimane ignoto.

Con l'inizio del Paleogene, l'area veneta ritorna a differenziarsi in due settori, separati grosso modo dall'attuale asse del Fiume Brenta. Il settore occidentale è caratterizzato da un diffuso vulcanesimo e da sedimentazione carbonatica epimeritica. Il settore orientale invece, si distingue per la deposizione di potenti sequenze sedimentarie di prevalente tipo clastico in facies di scaglia, di flysch (Paleogene) e poi di molassa (Neogene) e per l'assenza pressoché totale di attività vulcanica. In particolare, nella zona trevigiana-bellunese si registra sedimentazione pelagica con la Formazione della Scaglia Cinerea, la Scaglia Variegata e l'accumulo del Flysch di Belluno con potenze anche metriche.

Lungo il fianco meridionale della media Val Belluna la successione contiene ripetute intercalazioni di breccie bioclastiche in banchi plurimetri. Le correnti di torbida provengono da nord-ovest e da est, con locali apporti da sud-est di breccie bioclastiche. In Alpi e a Belluno il flysch comprende esclusivamente termini eocenici inferiori, mentre nel Feltrino e anche medio-eocenico e a Follina in parte eocenico superiore. Le variazioni di spessore delle unità cronostratigrafiche nel Vallone Bellunese suggeriscono lo spostamento dell'asse deposizionale del flysch da est a ovest in relazione all'avanzamento del fronte compressivo dinarico (De Biasio & Serafini, 2012).

Verso la fine dell'Eocene ci sono bassi tassi di sedimentazione con deposizione dell'Arenaria Glauconitica di Belluno. Si passa da una fase sinorogena flyschoidale ad una fase di quiescenza nel Miocene con la deposizione della Molassa Sudalpina, identificata dal colore giallo in *Figura 4* e con il numero sei in *Figura 5*.

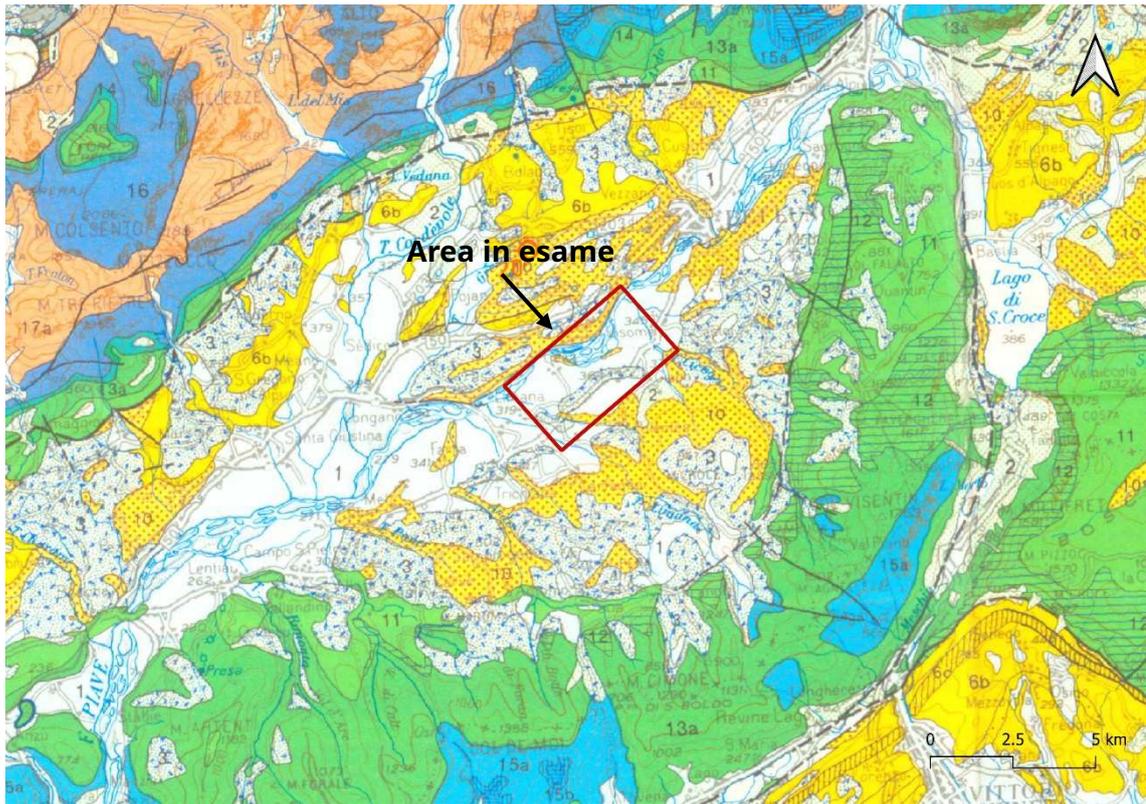
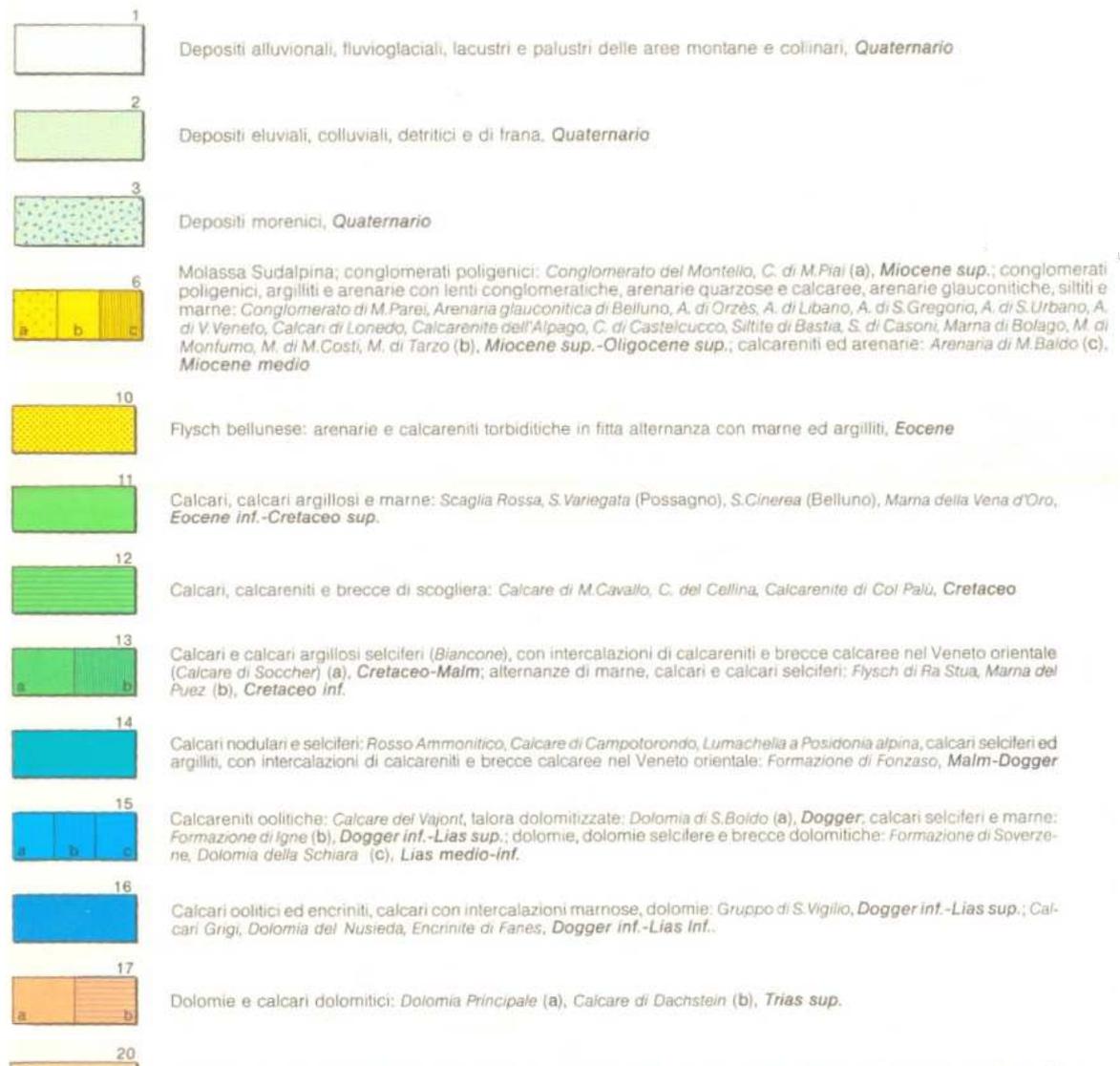


Figura 4 - Estratto Carta Geologica del Veneto alla scala 1: 250000 (Antonelli et al., 1988).



Durante il Quaternario, il Bellunese ha sperimentato diverse fasi glaciali. I ghiacciai hanno lasciato un'impronta indelebile nel paesaggio attraverso la deposizione di vari tipi di sedimenti. In particolare, le Prealpi Venete che si affacciano sul Vallone Bellunese furono interessate dal passaggio del ghiacciaio del Piave, evento testimoniato da depositi e forme lasciati lungo i versanti e nei fondovalle come le morene, gli esker e i kame. Detti depositi sono ascrivibili all'ultima glaciazione würmiana (24000 - 16000 anni fa) e non si rinvencono con assoluta certezza depositi glaciali più antichi.

Durante il massimo würmiano il limite delle nevi nel bellunese è stato posto da Castiglioni (1923) intorno a 1300 - 1350 m s.l.m. (*Figura 6*). Da ciò si deduce che l'intera area in studio si trovava all'interno della zona di ablazione del ghiacciaio. Di conseguenza durante le fasi di ritiro della glaciazione würmiana le ingenti quantità di detrito che si producevano sui versanti soggetti a disfacimento venivano trasportate a valle e abbandonate dalle masse glaciali sottoforma di morene. Il moto di ritiro dei ghiacciai non era uniforme ma avveniva per successivi avanzamenti e soste abbandonando i depositi morenici a quote via via inferiori (De Biasio & Serafini, 2012).



Figura 6 - Il ghiacciaio del Piave durante l'ultima massima espansione (modificato da Castiglioni, 1940).

Lungo tutto il versante in studio, ovvero sui fianchi della Val Belluna, si rinvencono quindi cordoni morenici laterali o di sponda e il fondovalle è riempito dalle morene di fondo. Detti depositi nel post-glaciale hanno subito fenomeni di rimaneggiamento e risedimentazione. Nell'area studio è stata inoltre evidenziata la presenza di terrazzi di kame ovvero sedimenti glaciali e fluvioglaciali derivanti da corsi d'acqua e acque di fusione a contatto con il ghiacciaio. Essi formano terrazzi sospesi lungo il versante, talora allineati alle morene laterali. Presentano, inoltre, una selezione granulometrica dei materiali e talora cementazione.

Infine, nell'Olocene (11700 anni fa), con il ritiro dei ghiacciai, ampie vallate e pianure si sono liberate dai ghiacci, favorendo la deposizione di sedimenti fluviali e lacustri.

Il Quaternario, in particolare nella Valle del Piave, è caratterizzato da forme geomorfologiche di tipo fluviale e gravitativo.

Rispetto alla Valle del Piave, i rilievi principali sorgono a SE e digradano verso NW. Qui i torrenti hanno deposto le loro conoidi detritiche che conferiscono al fondovalle, unitamente alle superfici terrazzate e gli accumuli e cordoni morenici, in un aspetto articolato.

I tributari di sinistra del Piave incidono la superficie del terreno formando orli di scarpata di erosione di altezze variabili a seconda della competenza dei materiali attraversati unitamente all'energia del rilievo. Talora approfondiscono il loro alveo sino a raggiungere il substrato lapideo soprattutto in corrispondenza dei tratti medio-alti dell'asta.

I principali corpi di frana sono presenti a nord dell'abitato di Giaon Villa Nuova e a nord dell'abitato di Coi Navasa, identificati come poligoni gialli per fenomeni di scivolamento e poligoni rossi come fenomeni di crollo o ribaltamento in *Figura 7*. Essi non sono di grande entità e sono nella maggior parte dei casi attivi e recenti. La frana di maggiori dimensioni che si trova nel Comune di Limana interessa parte del versante settentrionale del Monte San Pietro in Tuba. È una frana di crollo, sviluppata su un potente bancone bioclastico con giacitura a franapoggio presente nella parte superiore del Flysch di Belluno. Il corpo di frana si trova nella zona nord del centro abitato di Limana dove si presenta come un'enorme colata di grandi massi calcarenitici di dimensioni più ridotte e con caratteristiche di frana da scorrimento rotazionale.

Le valli del Torrente Cicogna, del Torrente Limana e del Torrente Ardo incidono profondamente, nel loro tratto mediano, il Flysch sovrastato dai depositi morenici del ghiacciaio del Piave. L'azione erosiva ha favorito il verificarsi di numerosi franamenti sia all'interno dei depositi glaciali o flyschoidi con caratteristiche di scorrimento rotazionale, sia sviluppati interamente nel Flysch di Belluno per erosione al piede del versante in sinistra idrografica del Torrente Cicogna (De Biasio & Serafini, 2012).

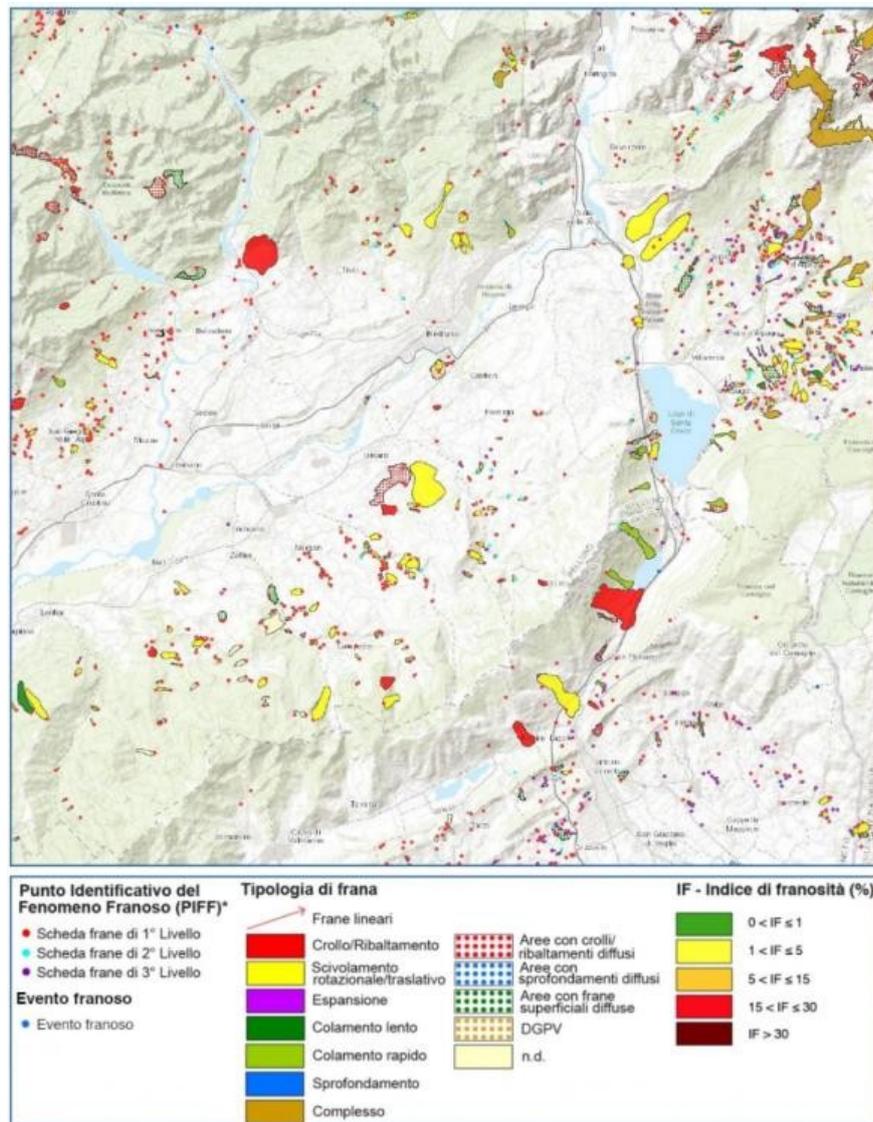


Figura 7 - Stralcio della Carta Inventario dei Fenomeni Franosi dell'Istituto Superiore Protezione e Ricerca Ambientale (ISPRA, 2024).

### 3.2 Inquadramento Strutturale

Le Alpi Meridionali sono notoriamente un margine passivo mesozoico collisionato in età alpina (Figura 8). Questa evoluzione strutturale è registrata molto bene anche nel Foglio Belluno, localizzato in gran parte proprio all'interno dell'omonimo Bacino di Belluno (Bosellini et al., 1981), ovvero una struttura interposta tra la Piattaforma Trentina a NW e la Piattaforma Friulana ad E, con elementi strutturali a direzione meridiana attivi durante le fasi tensionali mesozoiche (Figura 9).

Le strutture distensive mesozoiche hanno lasciato una forte impronta ereditata dalla successiva collisione Alpina tra il Promontorio Africano e l'Europa. Questa collisione ha deformato e trasposto verso sud il margine continentale passivo, un processo particolarmente evidente nell'angolo sud-est del Foglio Belluno, dove le faglie inverse Revine-Fadalto-Cadola, con direzione variabile da 60° a 0°, costituiscono la rampa obliqua del sovrascorrimento di Bassano-Vittorio Veneto, che si sviluppa a sud-ovest fuori del foglio. Tale transpressione si manifesta al margine tra il Bacino di Belluno (nelle aree del Visentin e del Nevegal) e la Piattaforma Friulana (area del Cansiglio), visibile in Figura 9. La geometria attualmente osservabile è quindi il risultato dell'interazione tra l'architettura mesozoica, con faglie distensive orientate circa N-S nella zona del Fadalto e corpi carbonatici della Piattaforma Friulana che progradano verso ovest sui sedimenti bacinali, e la compressione alpina, caratterizzata da una traiettoria di stress massimo neogenico orientata a 25° W (Doglioni, 1988).

L'analisi tettonico-strutturale delle Prealpi Venete rivela una storia geologica complessa, dominata da intensa attività tettonica legata alla collisione tra placche. A sud del Foglio Belluno, questa attività si interrompe bruscamente in corrispondenza della piega a ginocchio, espressione superficiale del grande sovrascorrimento Schio-Valdobbiadene, che si estende per quasi 100 km dall'alta Valle del Chiampo fino a Vittorio Veneto. Il settore occidentale del Veneto è meno coinvolto nella tettonica neogenica a causa dello svincolo dalla Linea di Schio, che determina la brusca terminazione verso est dei Lessini, dei Berici e degli Euganei. Al contrario, il Monte Baldo e la porzione occidentale dei Lessini sono influenzati dalla tettonica giudicariense (Miocene superiore), con strutture deformative che tendono verso sud-est. L'ultima fase tettonica neogenica, attiva nel Pliocene e ancora oggi, è testimoniata dalla sismicità di alcuni settori dell'area veneta.

Infine, si osserva una stretta corrispondenza tra strutture lineari e assetto idrografico locale, per esempio l'anticlinale San Boldo – Col Visentin costituisce uno sbarramento tettonico per l'idrografia locale ma anche per il Fiume Piave (De Biasio & Serafini, 2012).

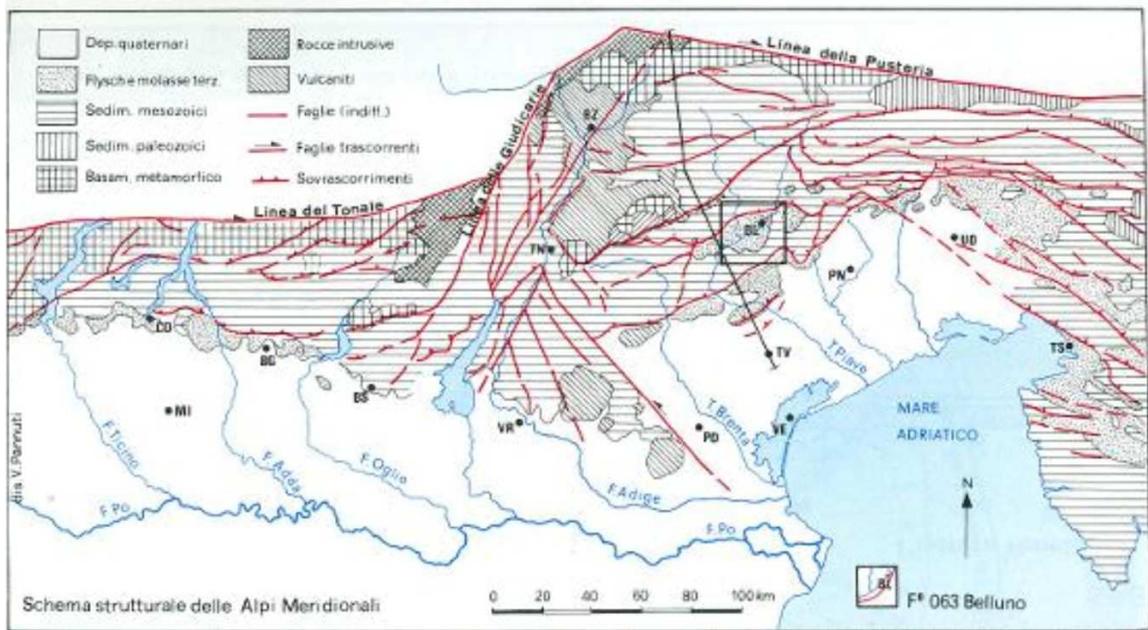


Figura 8 - Schema dei lineamenti tettonici principali delle Alpi Meridionali e localizzazione del Foglio Belluno alla scala 1:50000 (da Castellarin, 1981).

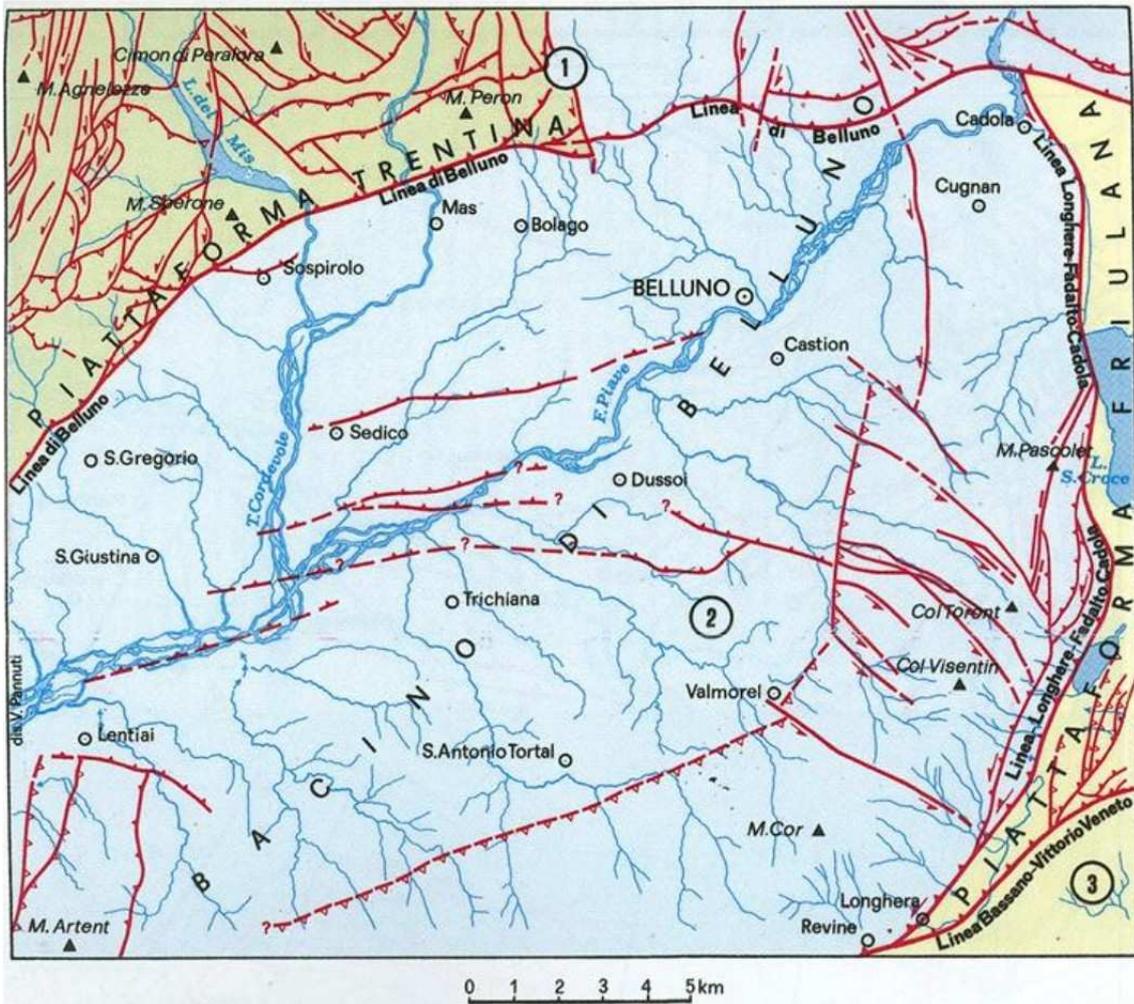


Figura 9 - Principali ambienti paleostrutturali e paleogeografici mesozoici caratterizzanti la zona di Belluno (Castellarin, 1981).

### 3.3 Inquadramento Stratigrafico

L'area oggetto di studio ricade all'interno del Foglio Geologico 063 – Belluno, in scala 1:50000, che comprende il Vallone Bellunese, parte delle Prealpi e delle Alpi Orientali (Costa et al., 1992). Ricade interamente anche nel Foglio 23 – Belluno in scala 1:100000 (Ufficio Idrografico-Magistrato alle acque di Venezia, 1941). Oltre alle sopramenzionate cartografie, l'area studio è presente anche nella Carta Geologica del Veneto, in scala 1:250000 (Antonelli et al., 1988).

Un ulteriore fonte è quella disponibile in De Biasio e Serafini (2012) con la Carta Geolitologica dei Comuni di Limana e Trichiana alla scala 1:15000 (*Allegato 1, Allegato 2*), la quale fornisce informazioni sulle litologie generali sul substrato e sulle coperture quaternarie. Infine, l'area è stata cartografata anche da Colleselli e Padovan (2015), che hanno prodotto la Carta Geologica del Comune di Limana alla scala 1:10000, commissionata per la realizzazione del Piano di Caratterizzazione (PdC) per i siti contaminati da solventi clorurati nelle località di Sampo e Baorche.

Tra le fonti disponibili come riferimento per ricostruire l'assetto litostratigrafico dell'area di studio, quelle di Costa et al. (1992) ed Antonelli et al. (1988) risultano quelle di maggior dettaglio, in quanto presentano una dettagliata descrizione delle litologie nelle note illustrative e legende. Inoltre, per la caratterizzazione delle coperture superficiali quaternarie, sono stati usati i sondaggi svolti tra il 2003 ed il 2013 per il Piano di Caratterizzazione in Comune di Limana (esempio di colonna stratigrafica e campioni del sondaggio S.12 in *Allegato 3, Allegato 4 e Allegato 5*).

Di seguito una descrizione in ordine cronologico delle formazioni nel territorio del Comune di Limana, partendo dalle più antiche alle più recenti:

1. Calcarea del Vajont (Dogger), calcari selciferi e marne (*Masetti & Bianchin, 1987*) calcareniti oolitiche nocciola, massicce o stratificate in grossi banchi, con intercalazioni di straterelli decimetrici di micriti bacinali brune (Costa et al., 1992). Piatto deposito di base di scarpata con potenze di centinaia di metri che diminuiscono da est verso ovest e da sud verso nord. Affiora a sud del territorio comunale di Limana nella parte settentrionale delle Prealipi Bellunesi.
2. Formazione di Fonzaso (Malm p.p. – Dogger p.p.), micriti fortemente selcifere, brune in basso e rosse, in strati decimetrici separati nella porzione superiore dell'unità da interstrati argillitici verdi (*Casati e Tomai, 1969*). Marne e calcari marnosi lastriformi generalmente rossastri contenenti aptici presenti in associazione con la facies classica del Rosso Ammonitico (*Costa et al., 1992*). Lo spessore è compreso tra 100 e 200 m e si riduce da sud verso nord. La formazione affiora a nord del territorio comunale di Limana alle pendici delle Dolomiti Bellunesi.

3. Rosso Ammonitico (Malm p.p. – Dogger p.p), micriti nodulari ad ammoniti, rossastre, talora verdi o grigie, spesso con selce rossa (*Costa et al., 1992*); tessitura micritica a peloidi la cui microbiofacies è caratterizzata da Saccocoma e Globochaete alpina (*Masetti & Bianchin, 1987*). Nel settore nordoccidentale il Rosso Ammonitico è presente nella sua più tipica facies rossastra, priva di selce con spessori di 6-9 m (*Casati & Tomai, 1969*). Trovandosi, in successione stratigrafica, al di sopra della Formazione di Fozaso; il Rosso Ammonitico affiora anch'esso a nord del territorio comunale di Limana alle pendici delle Dolomiti Bellunesi.
4. Maiolica (Cretaceo p.p. – Malm p.p.), micriti selcifere bianche e grigie a foraminiferi planctonici (globulotruncanidi, rotalipore, tcinelle, hedbergelle) nella parte alta e calcionellidi nella parte bassa, sottilmente stratificati, con sporadiche intercalazioni di biocalcareni e calciruditi gradate più abbondanti in prossimità della Piattaforma Friulana (*Costa et al., 1992*). Affiora a sud del territorio comunale di Limana ricoprendo gran parte delle Prealpi Bellunesi settentrionali.
5. Calcari del Fadalto (Cretaceo sup. p.p. – Albiano), calcareniti e calciruditi bioclastiche bianche e nocciola, in strati tabulari, talora amalgamati, di spessore da decimetrico a metrico. La frazione granulare è quasi esclusivamente costituita da frammenti scheletrici di rudiste ed altri lamellibrichi, gasteropodi ed alghe.
6. Formazione di Cugnan e Scaglia Rossa (Eocene inf. p.p. – Cretaceo sup. p.p.), il passaggio tra il Biancone e la Scaglia Rossa appare molto graduale con aumento progressivo della frazione argillosa, accompagnato dalla comparsa di colorazioni rossastre che si intercalano a quelle biancastre e grigie; anche la selce da grigio scura diviene rossastra (*Grandesso, 1976*). Verso il tetto la Scaglia Rossa diventa più marnosa per passare alla Formazione di Cugnan, ovvero un'alternanza di biocalcareni grigio chiari in banchi o strati decimetrici e di calcilutiti e marne rosse e grigie (*De Biasio & Serafini, 2012*). È tra le prime litologie affioranti a sud del territorio comunale di Limana dopo i depositi quaternari.

7. Marna della Vena d'Oro e Scaglia Cinerea (Eocene inf. p.p. – Paleocene p.p.), marne argillose fogliettate rosse e grigio-verdastre a globorotalidi e truncarotaloidi. Marne e marne argillose cinerine a globorotalidi passanti inferiormente a calcari marnosi grigi fittamente stratificati con rare intercalazioni di calcari bioclastici (*Costa et al., 1992*). Affiora in concomitanza della Scaglia Rossa a sud del territorio comunale di Limana.
8. Flysch di Belluno (Eocene p.p.), alternanza di marne argillose, calcareniti e arenarie con stratificazione piano-parallela in strati da centimetrici a pluridecimetrici e strutture sedimentarie tipiche delle successioni torbiditiche. La frazione pelitica è preponderante, mentre nella frazione arenitico-ruditica prevale la componente carbonatica su quella silicoclastica. La frequente presenza di emipelagiti testimonia periodi di sottoalimentazione del bacino. Le numerose strutture direzionali indicano paleocorrenti provenienti prevalentemente dai settori nord-occidentali (*Gnaccolini, 1968; Stefani & Grandesso, 1991*). Affiora in tutta la valle del Piave dove non è coperto dai depositi quaternari.
9. Conglomerati della Valle del Piave e valli secondarie (Pleistocene), antichi depositi glaciali di fondo costituiti da banchi di sabbia e ghiaia ricchi di limo con potenze di pochi metri. Sulla base della loro posizione stratigrafica, questi depositi sono ascrivibili ad una fase glaciale pre-würmiana.

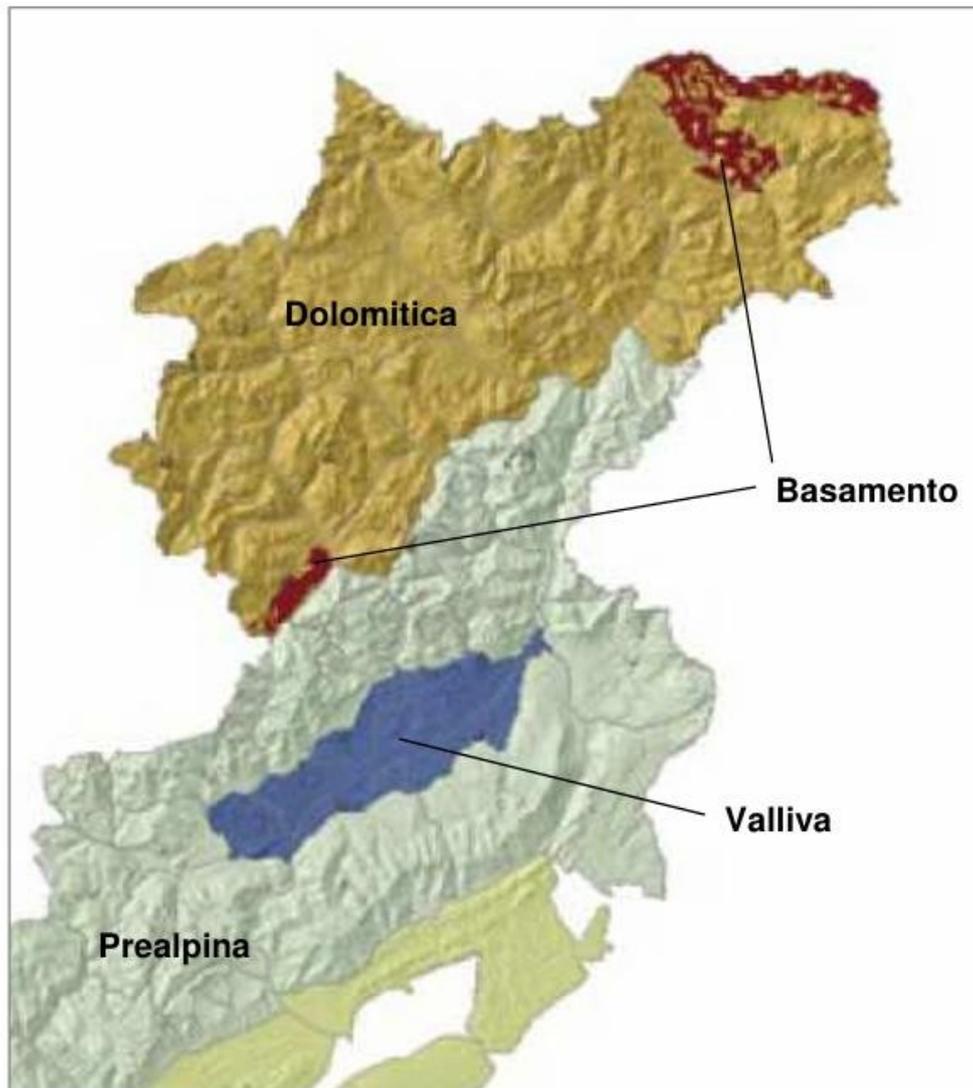
Nella zona in esame le coperture sub-superficiali sono costituite da:

1. depositi di origine lacustre, sono principalmente torbosi, costituiti da argilla limosa debolmente sabbiosa di colore nocciola-ocra.
2. depositi alluvionali recenti e attuali del Fiume Piave, sono costituiti da materiali sciolti, in prevalenza ghiaie, ciottoli e qualche blocco, arrotondati, con sabbie limose e lenti o livelli limoso-sabbiosi in alternanze irregolari.
3. depositi di origine fluvioglaciale, costituiti da strati sottili di ghiaia e sabbia limosa ad argillosa, ed elementi grossolani come ciottoli e blocchi, più o meno arrotondati, con diametro inferiore ai venti centimetri. I ciottoli sono costituiti in prevalenza da calcari e dolomie (*Costa et al., 1992*).
4. depositi glaciali, costituiti da limi sabbiosi più o meno argillosi con ghiaie, ciottoli e qualche blocco, spigolosi o poco arrotondati.

In particolare, da una prima caratterizzazione dei depositi tramite i sondaggi a carotaggio continuo, l'area studio è stata divisa in due orizzonti (o layer). Quello più superficiale caratterizzato da depositi fluvioglaciali, quindi ghiaie e ciottoli con sabbie limose ed argillose e uno stato più profondo a contatto con il bedrock, caratterizzato da depositi glaciali, ovvero limi sabbiosi poco argillosi con ghiaie e ciottoli subarrotondati.

### **3.4 Inquadramento Idrogeologico**

L'ARPAV, nella "Relazione Annuale Sul Monitoraggio della qualità delle acque sotterranee in Provincia di Belluno" del 2012, ha scelto di suddividere il territorio in domini idrogeologici con caratteristiche geologiche/idrogeologiche omogenee. Questi domini, coincidono con i principali acquiferi della provincia, hanno la finalità di attenuare la complessità geologica del territorio e di facilitare l'individuazione delle aree di ricarica. Il territorio bellunese è compreso nelle province dolomitica, prealpina, valliva e del basamento, le quali vengono di seguito descritte e illustrate in Error: Reference source not found **Error: Reference source not found** (ARPAV, 2012).



*Figura 10 - Province idrogeologiche del Bellunese; in particolare in rosso la provincia del basamento, in giallo ocra la provincia dolomitica, in blu la provincia valliva ed in grigio la provincia prealpina.*

L'area d'indagine rientra nella provincia Valliva dove vi è la presenza di acquifero freatico di fondovalle alimentato dal Fiume Piave e dagli affluenti, con le varie sorgenti sul fianco destro e sinistro della valle.

Nell'area di studio l'acquifero libero, con soggiacenza media di circa 10 metri dal piano campagna (m p.c.), variabile fino a 20 m p.c. nelle zone di maggior accumulo di materiale glaciale. L'acquifero interessato da deflusso idrico sotterraneo è rappresentato dai livelli sabbio – limosi con ghiaie visibili in Figura 4. I moti di filtrazione, sia verticali che orizzontali, sono condizionati dalle differenze di

conducibilità idraulica dei depositi di origine alluvionale, fluvioglaciale e morenica e quindi della formazione marnosa del Flysch, che non si può considerare impermeabile, in quanto come ammasso roccioso è caratterizzata da discontinuità e fratturazioni. Le sorgenti che scaturiscono da questi depositi si trovano in aree con forti spessori di sedimenti grossolani in corrispondenza ad incisioni vallive locali, che favoriscono l'emergenza delle acque. Tutte queste sorgenti sono subordinate alle precipitazioni; risentono quindi delle variazioni pluviometriche stagionali ed hanno portate molto variabili (*Costa et al., 1992*). In particolare, per le Sorgenti Sampoï, sono stati misurati i dati di portata dal 2004 al 2014 dal Dipartimento ARPAV della Provincia di Belluno (*Tabella 1*).

Data di misurazione	Portata [l/s]	Portata [m <sup>3</sup> /q]
2004	22	1900.8
2007	13	1123.2
2008	22.7	1961.28
2009	25	2160
2010	24.83	2145.312
2011	24.83	2145.312
2012	23.55	2034.72
2013	23.55	2034.72
2014	27.18	2348.352
MEDIA	22.96	1983.744

*Tabella 1 - Valori di portata delle Sorgenti Sampoï divisi. Servizio Osservatorio Acque interne (Boscolo & Mion, 2004-2014).*

In conclusione, si può desumere che la circolazione idrica sotterranea nell'area di studio, pur diretta a scala regionale verso nord (Fiume Piave) e quindi verso le sorgenti Sampoï, risulta più articolata di quanto ipotizzato sulla base delle prime indagini, determinando direzioni di deflusso localmente separate dall'alto piezometrico di Limana (*Colleselli & Petitta, 2015*). Questo alto piezometrico si trova all'interno del centro abitato e si presenta come una zona di deposito morenico di origine glaciale a direzione E-W di età würmiana.

## 4 Dati idrogeologici e della contaminazione

### 4.1 Ricostruzione superfici potenziometriche

Una ricostruzione della superficie isopotenziometrica, rappresenta tramite curve di livello (isopieze) la distribuzione del carico idraulico in un determinato periodo di tempo. Essendo basata su misure discrete, la sua attendibilità dipende da numerosi fattori, tra cui il numero delle misure, la distribuzione spaziale e l'eterogeneità dell'acquifero che si vuole rappresentare (Fileccia, 2011).

In questo caso studio non è stato possibile fare riferimento alla bibliografia esistente, come la Carta Idrogeologica dell'Alta Pianura Veneta (Dal Prà, 1983), poiché tali cartografie si concentrano esclusivamente sulla porzione di pianura ubicata a sud delle Prealpi.

Quindi, per la costruzione della carta potenziometrica dell'area di studio, sono stati utilizzati i dati provenienti da 30 piezometri, realizzati a profondità variabile e distribuiti in modo disomogeneo sul territorio del Comune di Limana. Tali piezometri sono stati realizzati durante l'elaborazione del Piano di Caratterizzazione (PdC; Colleselli & Petitta, 2015), al fine di raccogliere i dati di soggiacenza ed effettuare i campionamenti per le analisi chimiche ed isotopiche. Nella relazione relativa alle indagini del PdC (Colleselli & Petitta, 2015) per ogni piezometro sono disponibili informazioni riguardanti: l'identificativo del piezometro (ID), le coordinate, la data del rilievo e il valore di soggiacenza rispetto al punto di riferimento utilizzato per la misura. I valori di soggiacenza, dopo essere stati trasformati in carico idraulico (H), utilizzando le quote dei punti di riferimento (boccaforo o piano campagna), sono stati digitalizzati ed inseriti in un file di Microsoft Excel. Le coordinate piane, fornite nel sistema di riferimento Gauss-Boaga fuso Est, sono state trasformate, mediante il software ConverRgo (CISIS, Centro Interregionale per i Sistemi Informatici, geografici, statistici), in coordinate piane Gauss-Boaga fuso Ovest. Questa operazione è stata necessaria per poter sovrapporre i piezometri alla cartografia disponibile.

I valori di H derivati dalle misure di soggiacenza in corrispondenza di ogni piezometro sono stati spazializzati attraverso il software Surfer 12 (Golden

Software). Per la spazializzazione è stata utilizzata una funzione radiale di base di tipo multiquadratico, fissando il parametro  $R^2$  pari a 0, in modo che il risultato dell'interpolazione sia dipendente prevalentemente dalla distanza reciproca tra i punti. La Radial Basis Function (funzione radiale di base) è un interpolatore esatto, ovvero che cerca di non alterare il dato iniziale di input creando superfici lisce (*Carlson & Foley, 1991a*). Il parametro  $R^2$  è un fattore di modellamento o lisciatura. Non esiste un metodo universalmente accettato per calcolare il valore ottimale di questo fattore. Un valore di prova ragionevole per il parametro  $R^2$  è compreso tra la distanza media tra i campioni e la metà della distanza media tra i campioni (*Carlson & Foley, 1991b*).

Le campagne di rilievo disponibili, condotte da ARPAV (Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto), sono sei e sono state effettuate nell'ambito del monitoraggio della rete piezometrica. I dati necessari per l'indagine sono stati raccolti attraverso il documento "Prospetto della rete piezometrica di iniziativa pubblica". Le date in cui i rilievi sono stati eseguiti sono le seguenti: 26 novembre 2013 (*Figura 11*), 10 gennaio 2014 (*Figura 12*), 7 febbraio 2014 (*Figura 13*), 14 marzo 2014 (*Figura 14*), 18 aprile 2014 (*Figura 15*) e 15 maggio 2014 (*Figura 16*).

Sono state generate sei mappe, ciascuna riferita a uno dei rilievi disponibili. Ogni mappa rappresenta la superficie isopotenziometrica dell'area di studio, corrispondente alle diverse date di campionamento dei valori di soggiacenza, raccolti da ARPAV. Inoltre, mediando i valori di carico idraulico ottenuti per ciascun punto di misura, è stata elaborata una settima mappa che rappresenta la superficie isopotenziometrica media relativa al periodo compreso tra il 2013 e il 2014 (*Figura 17*).

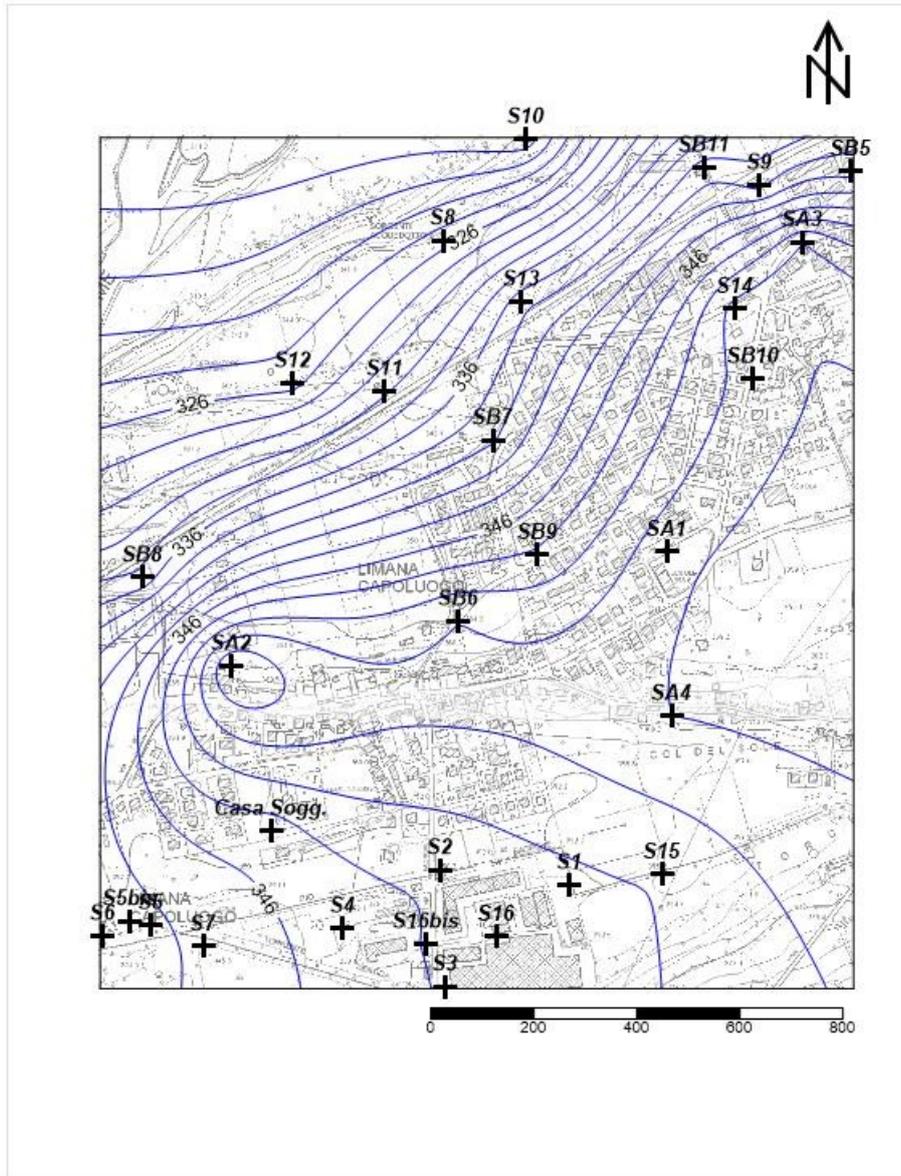


Figura 11 - Superficie potenziometrica generata tramite i dati di soggiacenza raccolti in data 26/11/2013 ed ubicazione dei piezometri all'interno dell'abitato di Limana.

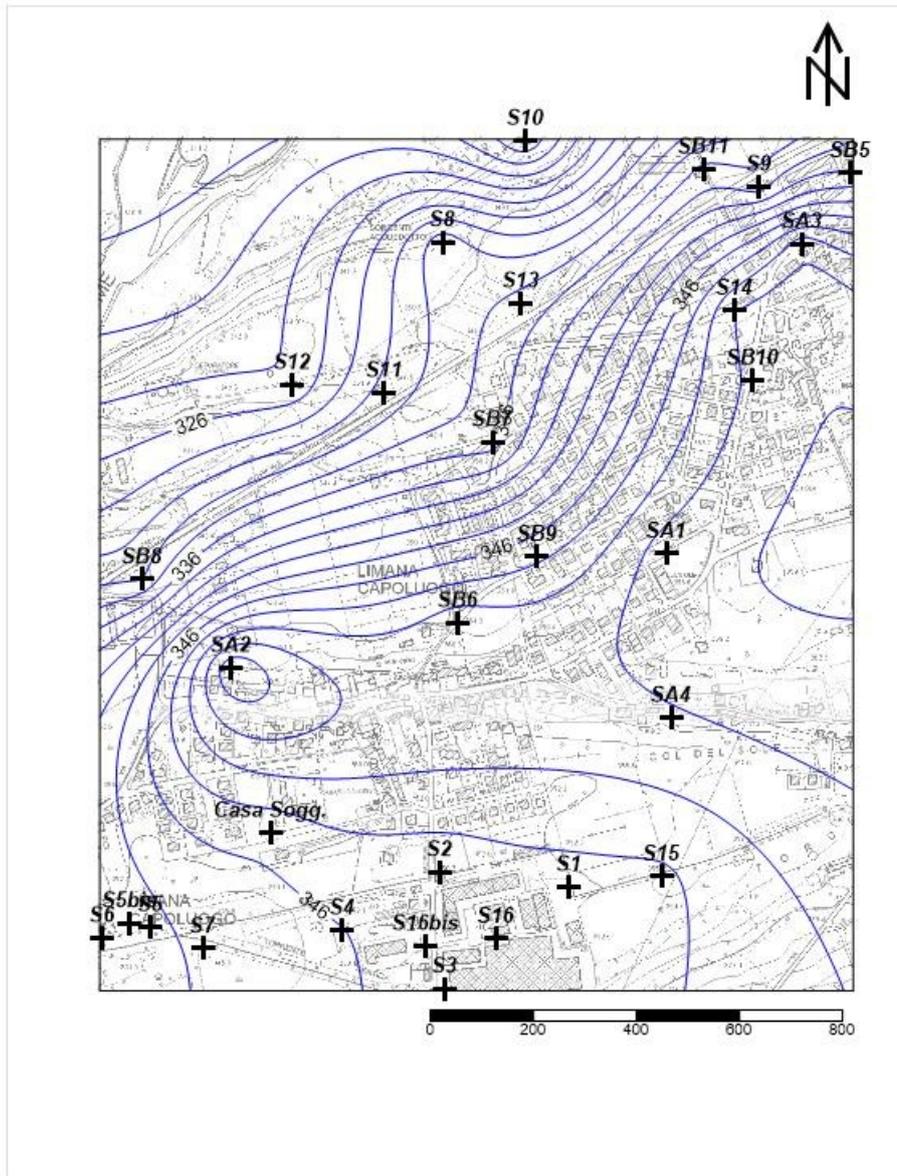


Figura 12 - Superficie potenziometrica generata tramite i dati di soggiacenza raccolti in data 10/01/2014 ed ubicazione dei piezometri all'interno dell'abitato di Limana.

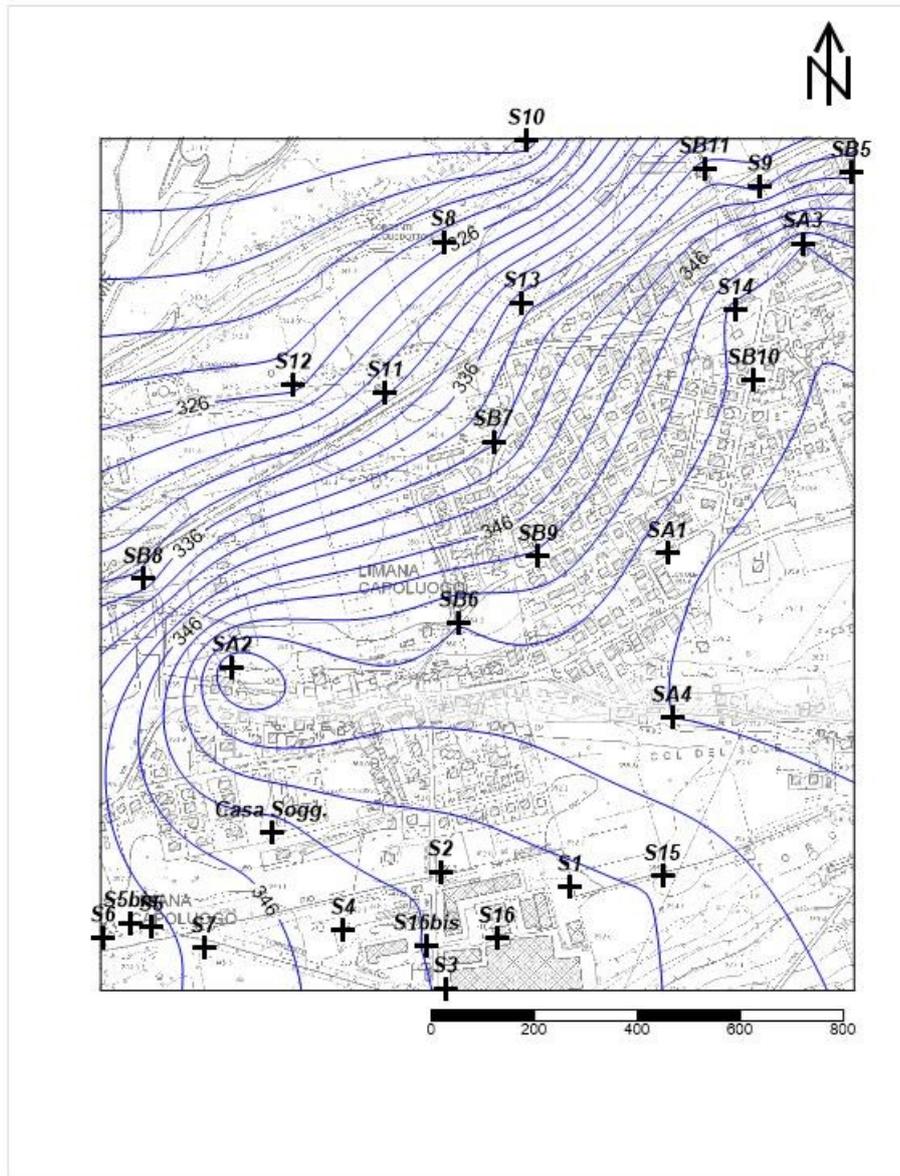


Figura 13 - Superficie potenziometrica generata tramite i dati di soggiacenza raccolti in data 07/02/2014 ed ubicazione dei piezometri all'interno dell'abitato di Limana.



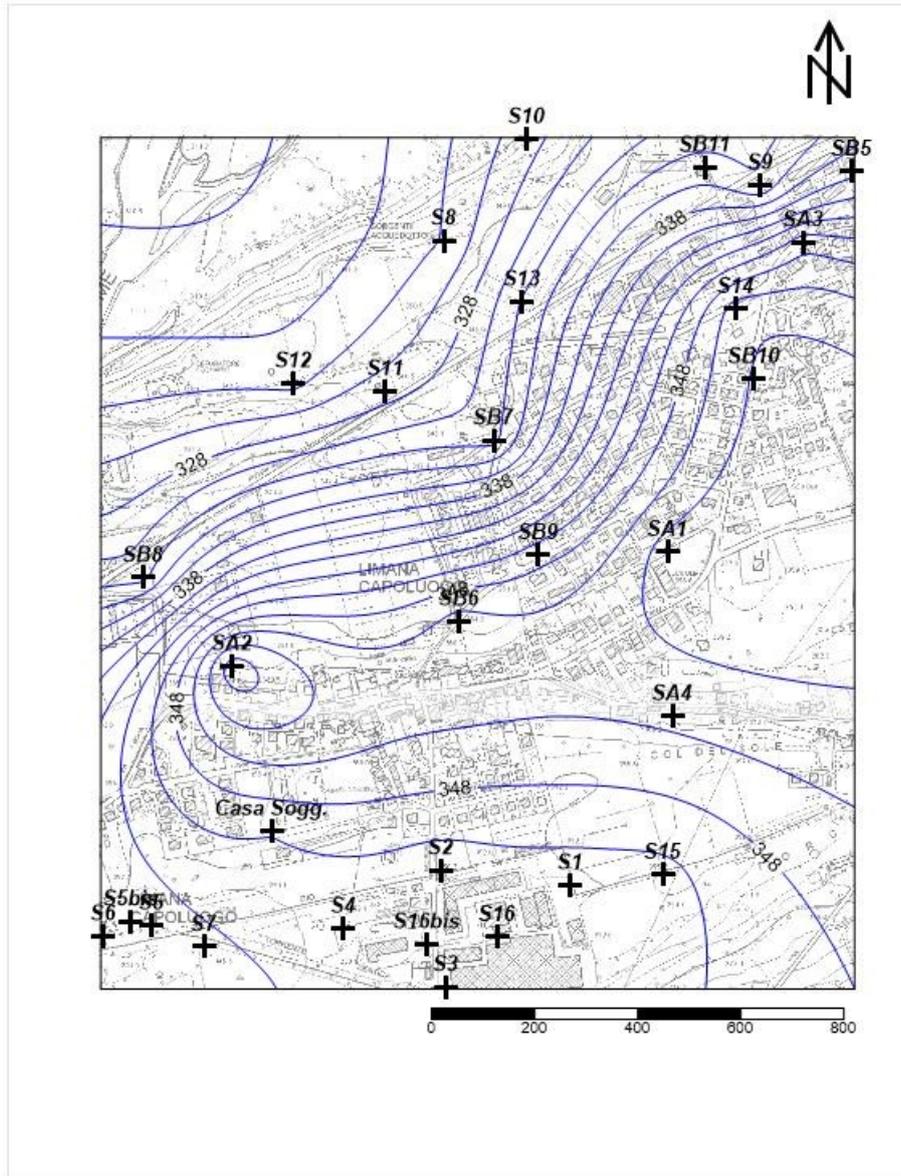


Figura 15 - Superficie potenziometrica generata tramite i dati di soggiacenza raccolti in data 18/04/2014 ed ubicazione dei piezometri all'interno dell'abitato di Limana.

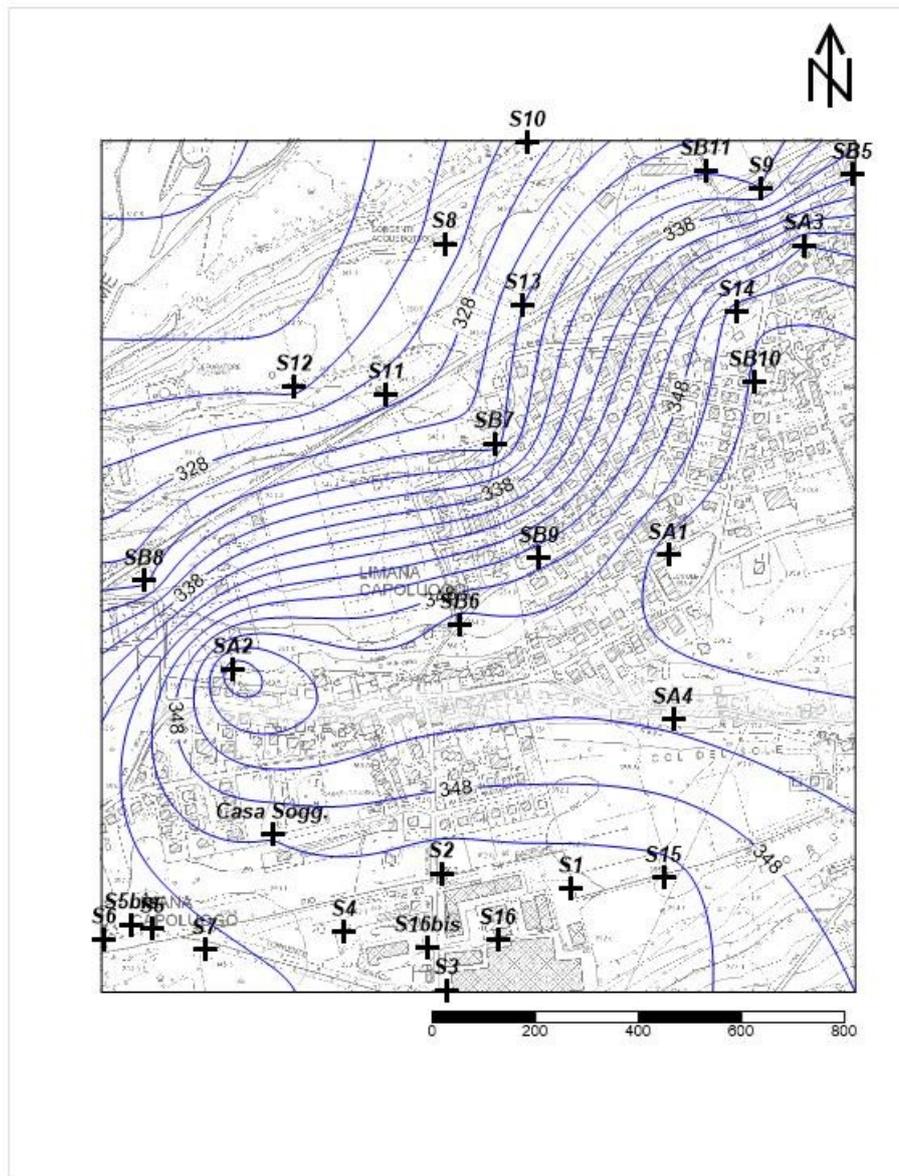


Figura 16 - Superficie potenziometrica generata tramite i dati di soggiacenza raccolti in data 15/05/2014 ed ubicazione dei piezometri all'interno dell'abitato di Limana.

L'analisi delle mappe evidenzia una notevole stabilità nel tempo: la configurazione della superficie piezometrica appare sostanzialmente costante tra i vari periodi di monitoraggio. Trattandosi di campagne di monitoraggio realizzate prevalentemente nel periodo invernale, i gradienti idraulici e le direzioni di flusso non subiscono variazioni significative. Questo comportamento indica una situazione di equilibrio

stagionale nella zona, con una distribuzione del carico idraulico relativamente omogenea e priva di forti oscillazioni nel breve termine.

In particolare, le linee isopotenziometriche mantengono una disposizione coerente, delineando un flusso prevalente dal centro abitato di Limana verso nord-ovest. Le differenze minime osservate tra una mappa e l'altra possono essere attribuite a variazioni idrologiche nel breve periodo, che non hanno comunque influito sulla struttura complessiva della distribuzione del carico idraulico. Questa stabilità potrebbe suggerire che l'acquifero abbia una capacità di risposta piuttosto uniforme rispetto agli input naturali.

Risulta inoltre evidente la presenza di uno spartiacque naturale al centro dell'area di studio. Questo spartiacque è chiaramente delineato dalla curvatura delle linee isopotenziometriche, che indicano una separazione tra due direzioni di flusso principali. Tale conformazione può essere attribuita alla presenza di un deposito glaciale, precedentemente individuato dall'analisi dei dati geognostici disponibili sull'area. Il deposito, caratterizzato da materiali a diversa permeabilità, sembra influenzare la distribuzione del carico idraulico, generando una barriera naturale di flusso che divide la zona in due domini con direzioni di flusso distinte.

Infine, è stato possibile ricostruire una superficie potenziometrica che fornisce informazioni sulla distribuzione di carico idraulico medio e sulla direzione di flusso prevalente. Questa ricostruzione offre una panoramica utile per valutare, in via preliminare, i potenziali percorsi di trasporto dei contaminanti all'interno dell'area in esame.

Di seguito è presentata la mappa (*Figura 17*) della superficie piezometrica della zona di Limana, utilizzando i dati medi di soggiacenza per ogni piezometro.

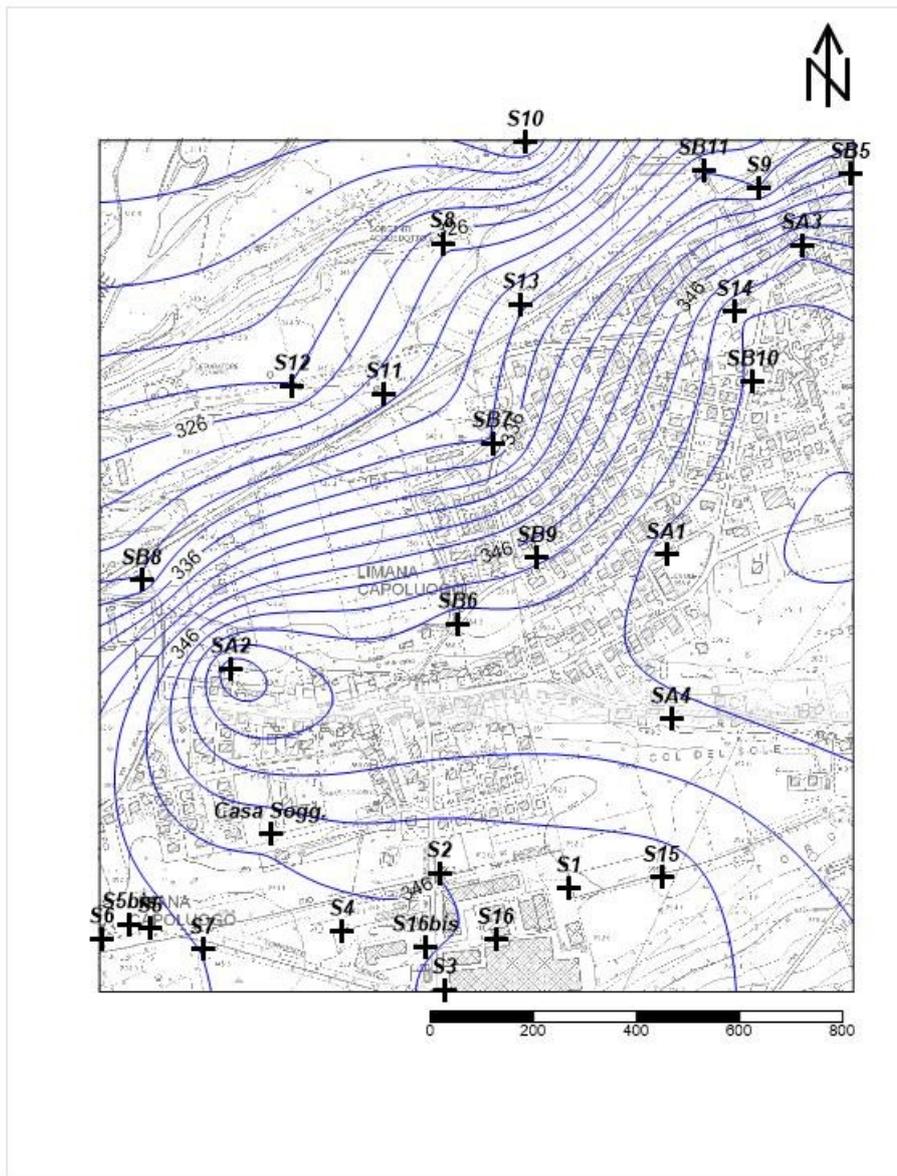


Figura 17 - Superficie potenziometrica media generata utilizzando i valori medi di soggiacenza.

## 4.2 Conducibilità idraulica del sottosuolo

La capacità di un acquifero di trasmettere acqua prende il nome di conducibilità idraulica o permeabilità (K), e corrisponde al volume d'acqua sotterranea che passa nell'unità di tempo per una sezione di acquifero, sotto un gradiente idraulico unitario.

Uno dei metodi utilizzati per determinare la conducibilità idraulica di un acquifero sul campo è la prova Lefranc. Si tratta di una prova di permeabilità a carico variabile o costante eseguita in fase di avanzamento durante la realizzazione di sondaggi sul fondo del foro. Inizialmente, viene misurato il livello dell'acqua sotterranea nel tratto interessato tramite un freatometro. L'esecuzione della prova di permeabilità prevede le seguenti modalità operative: iniziale riempimento con acqua del foro, fino alla sommità del rivestimento, successiva interruzione dell'immissione di acqua e misura nel tempo della diminuzione del livello dalla testa tubo del rivestimento fino al ripristino del livello iniziale (AGI, 1977).

Nell'ambito delle attività investigative svolte tra il 2003 ed il 2004, a seguito di uno specifico finanziamento della Regione Veneto, fu affidata all'Impresa Geotevere S.n.c., una campagna di indagini geognostiche. Questa campagna prevedeva la perforazione di 17 sondaggi meccanici a rotazione con carotaggio continuo, tutti equipaggiati con piezometri. Durante queste perforazioni, furono eseguite 60 prove di permeabilità a carico variabile di tipo Lefranc (Colleselli & Petitta, 2015). Successivamente, tra maggio e dicembre 2013 sono stati realizzati altri 11 sondaggi meccanici, anch'essi attrezzati a piezometro. Anche su questi sondaggi sono state condotte ulteriori 13 prove a carico variabile di tipo Lefranc.

In particolare, per una prova di tipo LeFranc a carico variabile, la conducibilità idraulica viene calcolata in riferimento alla metodologia consigliata dalla Associazione Geotecnica Italiana (AGI) attraverso la seguente formula:

$$K = \frac{A}{C_L \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2}$$

dove:

- K, conducibilità idraulica (m/s);
- A, area di base (m<sup>2</sup>);
- h<sub>1</sub> e h<sub>2</sub>, altezza dei livelli d'acqua nel foro rispetto al livello indisturbato o a fondo foro, ai tempi t<sub>1</sub> e t<sub>2</sub>;
- t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub> = tempi nei quali si misurano h<sub>1</sub> e h<sub>2</sub>;

- $C_L$ , coefficiente di forma che dipende dalla geometria del tratto di foro in cui si realizza la prova.

I dati delle prove Lefranc sono stati tabulati su un foglio Excel dove è stato definito: l'identificativo (ID), il numero della prova per ogni piezometro, l'intervallo di profondità a cui è stata eseguita la prova, il valore di conducibilità idraulica derivato dall'interpretazione della prova ed il tipo di litologia presente nella parte fenestrata del piezometro. Successivamente, tali valori sono stati suddivisi in funzione dell'orizzonte idrostratigrafico di appartenenza (definito precedentemente nel paragrafo 3.3), sulla base della profondità alla quale le misurazioni sono state eseguite e in relazione con le rispettive stratigrafie. Infine, per ciascun orizzonte, sono stati calcolati i valori minimi e massimi, la media, la mediana ed i vari percentili tramite box-plot (*Figura 18*). Un box-plot è una rappresentazione grafica utilizzata in statistica per rappresentare la distribuzione di un insieme di dati numerici utilizzato per visualizzare la dispersione e la simmetria dei dati, nonché per identificare eventuali valori anomali (outliers).

Di seguito sono visualizzati i box-plot per l'orizzonte più superficiale (a destra di colore verde), quello costituito prevalentemente da ghiaie e ciottoli con sabbie limose ed argillose e quello per l'orizzonte più profondo (a sinistra di colore arancione), costituito da limi sabbiosi più o meno argillosi con ghiaie e ciottoli e qualche blocco spigoloso.

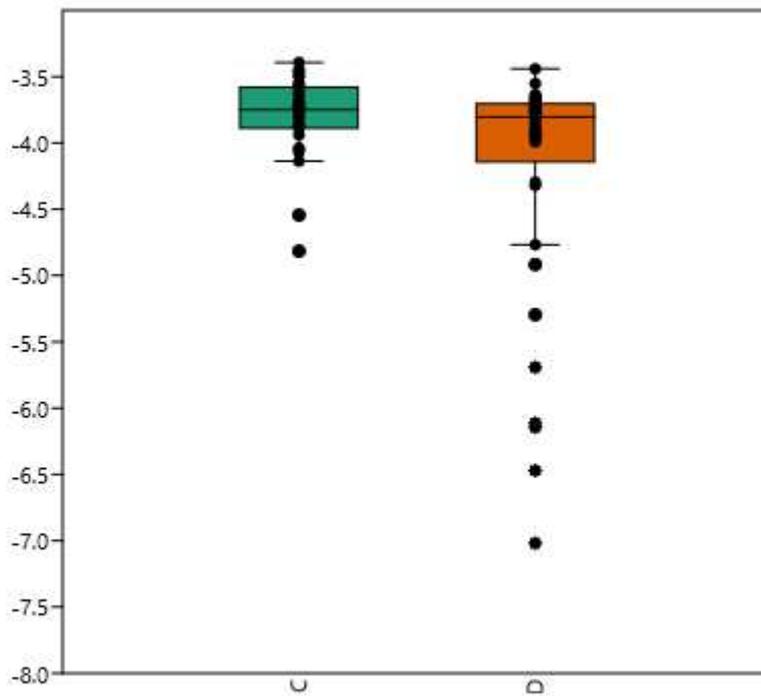


Figura 18 - Distribuzione dei valori di conducibilità idraulica (K) tramite box-plot per gli orizzonti idrostratigrafici superficiale (C) e profondo (D), con indicazione delle mediane, percentili e outliers.

Si può notare come entrambi gli orizzonti presentano una distribuzione simile, con mediane vicine e una scatola (intervallo interquartile) compatta, indicando una bassa dispersione dei dati centrali. Tuttavia, l'orizzonte più profondo mostra una maggiore presenza di outliers (dati che si discostano significativamente dagli altri valori), suggerendo una maggiore variabilità o la presenza di valori estremi rispetto all'orizzonte superficiale. Questi outliers sono rappresentati da bassi valori di K e probabilmente sono dovuti alla realizzazione delle prove in corrispondenza di livelli fini, che alla base dei deposti quaternari compaiono con maggiore frequenza.

Al netto della presenza di outliers, avendo per entrambi gli orizzonti una distribuzione e valori mediani simili, si è deciso di confrontare tutti i valori in un unico box-plot (Figura 19).

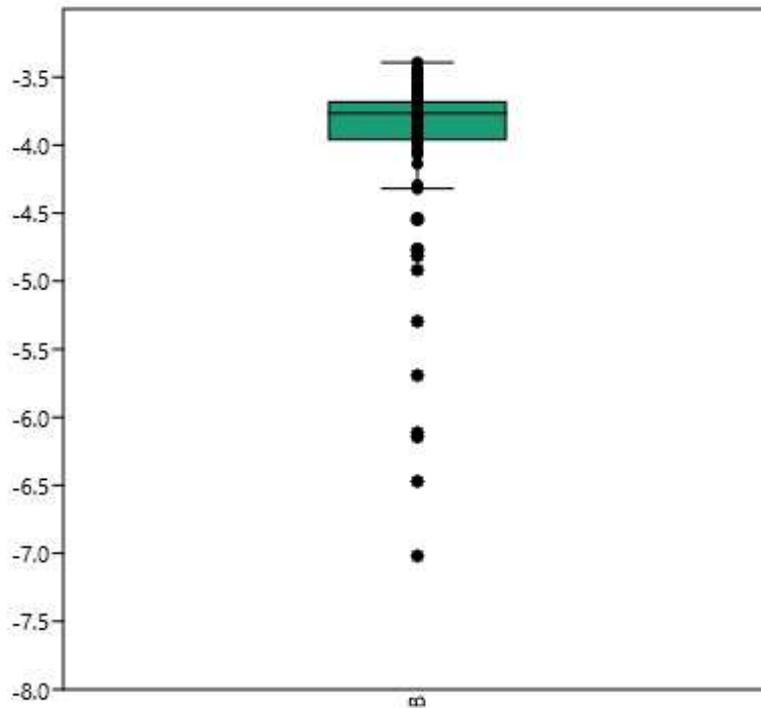


Figura 19 - Distribuzione di tutti i valori di conducibilità idraulica tramite Box-plot.

Si può notare che non vi sono particolari differenze rispetto alla *Figura 18*. Questo ci permette, tramite i valori di massimo ( $4.05E-04$  m/s) e minimo ( $4.8E-05$  m/s), di avere un intervallo di K tra cui individuare i valori da inserire nelle simulazioni numeriche.

Inoltre, i valori di conducibilità idraulica sono stati riportati su una mappa (*Figura 20*) che mostra la distribuzione spaziale del parametro nell'area di studio. I valori di conducibilità idraulica sono rappresentati con simboli colorati, dove ogni colore è funzione dell'ordine di grandezza del valore di K. Le prove sono state fatte in due diversi momenti. La prima misurazione è stata effettuata tra il 2003 ed il 2004 mentre la seconda misurazione è avvenuta nel 2013. I dati indicano la presenza di una zona a bassa permeabilità nel centro dell'abitato di Limana, con valori che superano di fino a tre ordini di grandezza quelli rilevati nel resto dell'area. Tale anomalia è attribuibile



### 4.3 Bilancio idrico del suolo

La valutazione delle risorse idriche non può prescindere dalla stima dell'infiltrazione legata all'afflusso meteorico. Uno dei metodi più utilizzati prevede il calcolo del bilancio idrico del suolo, dato da:

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

dove: P è la precipitazione,  $E_r$  l'evapotraspirazione reale, R il ruscellamento superficiale, I l'infiltrazione e  $\Delta S$  la variazione di immagazzinamento. Se il bilancio è stimato a partire dai valori medi delle sue componenti, calcolate su un tempo sufficientemente lungo (> 10 anni), le variazioni di immagazzinamento vengono solitamente considerate trascurabili e la somma di ruscellamento ed infiltrazione prende il nome di 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 utilizzato il metodo di Thornthwaite & Mather (1957), uno dei più noti e largamente utilizzati in idrogeologia, oltre che per la sua relativa semplicità, anche per una vasta casistica che lo propone come affidabile per svariati contesti climatici (*Barazzuoli & Salleollini, 1993*). Il metodo si basa sulla stima di  $E_r$  a partire dal calcolo dell'evapotraspirazione potenziale mensile ( $E_{p_m}$ ); i parametri necessari al calcolo di  $E_{p_m}$  sono la precipitazione mensile ( $P_m$ ) e la temperatura atmosferica media mensile ( $T_m$ ).

Il bilancio idrico del suolo è stato valutato entro il territorio del Comune di Limana su due periodi di riferimento, legati in entrambi i casi alla disponibilità delle serie storiche di precipitazione e temperatura, nello specifico:

- 29 anni dal 1994 al 2022;
- 11 anni dal 2011 al 2021.

### 4.3.1 Precipitazione e temperatura

Attraverso il portale dell'ARPAV sono state acquisite le serie mensili di precipitazione ( $P_m$ ) e temperatura atmosferica ( $T_m$ ), per il periodo 1994-2022, registrate presso le stazioni meteorologiche più vicine all'area oggetto di studio, vale a dire (*Figura 21*): Belluno – Aeroporto, Cansiglio – Tramedere, Col Indes – Tambre, Conegliano, Farra di Soligo, Follina, Gaiarine, Longarone, San Martino d'Alpago, Sant'Antonio Tortal, Sospirolo, Torch e Vittorio Veneto. Le principali caratteristiche delle serie acquisite e delle stazioni sono riportate in Tabella 2. Le stazioni con serie incomplete sono risultate: Belluno – Aeroporto, in cui mancano i dati di  $P_m$  e  $T_m$  compresi tra gennaio 1994 e ottobre 2004, e Vittorio Veneto, in cui mancano i dati di  $P_m$  e  $T_m$  compresi tra gennaio 1994 e gennaio 2000. Caso particolare è quello della stazione di Follina, in cui le registrazioni di  $P_m$  e  $T_m$  iniziano a partire da giugno 2016, per cui la serie è stata completata utilizzando i dati della vicina stazione di Follina antincendio (Tabella 2), attiva tra gennaio 1994 e gennaio 2016, e limitando in questo modo le lacune di registrazione al periodo compreso tra febbraio e maggio del 2016.

Preliminarmente alla ricostruzione dei dati mancanti, attraverso il coefficiente di correlazione di Pearson (*Davis, 2002*), è stata valutata la forza e la direzione dell'eventuale relazione lineare tra i valori  $P_m$  e  $T_m$  acquisiti presso le stazioni sopraelencate. Il coefficiente di Pearson ( $r$ ) calcolato tra due variabili  $x$  e  $y$  è dato da:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

dove  $x_i$  e  $y_i$  sono i valori delle variabili e  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  sono i rispettivi valori medi. Nella pratica si possono distinguere vari tipi di correlazione:

- diretta o positiva se  $r > 0$ ;
- inesistente se  $r = 0$ ;
- inversa o negativa se  $r < 0$ .

Inoltre, la correlazione diretta è definita:

- debole quanto  $0 < r < 0.3$ ;
- moderata se  $0.3 < r < 0.7$ ;
- forte se  $r > 0.7$ .

Per il calcolo del coefficiente di correlazione è stato utilizzato il software PAST versione 4.13 (*Hammer et al., 2001*).

In *Figura 22* sono mostrati i box-plot delle serie di  $P_m$  e  $T_m$ , mentre in *Figura 23* sono presentate le matrici di correlazione degli stessi parametri tra le stazioni considerate. Le matrici di correlazione mostrano come per entrambe le variabili la correlazione tra le stazioni sia sempre diretta e forte.

Per ricostruire i valori di  $P_m$  e  $T_m$  mancanti nelle serie delle stazioni di Belluno – Aeroporto, Follina e Vittorio Veneto sono state utilizzate delle funzioni lineari con le serie delle stazioni che sono risultate più correlate, vale a dire rispettivamente: Torch, Farra di Soligo e Conegliano per la precipitazione e Sospirolo e Farra di Soligo per la temperatura. In quest'ultimo caso, infatti, la stazione di Farra di Soligo è risultata la più correlata sia con la stazione di Follina che con quella di Vittorio Veneto. I parametri delle rette di regressione sono stati individuati attraverso l'applicazione del metodo dei minimi quadrati, in Microsoft Excel, e dall'analisi del coefficiente di determinazione ( $R^2$ ). Nel caso della regressione semplice, cioè tra due variabili,  $R^2$  è pari al quadrato del coefficiente di correlazione di Pearson e la bontà dell'adattamento è tanto migliore quanto più l'indice si avvicina a 1. Le rette di regressione relative a  $P_m$  e  $T_m$  per le coppie di stazioni individuate attraverso l'analisi di correlazione sono presentate in *Figura 24*. Come anticipato dalla matrice di correlazione, i valori di  $R^2$  derivati dai fittaggi di  $T_m$  sono sempre maggiori rispetto a

quelli di  $P_m$ , in relazione alla minore variabilità spaziale della temperatura rispetto alla precipitazione.

In Tabella 3 sono riportati i valori di precipitazione ( $P_{ma}$ ) e temperatura ( $T_{ma}$ ) medi annui, calcolati sui due periodi di riferimento individuati per il bilancio idrico del suolo: 1994-2022 e 2011-2021. Come si può vedere gli anni 2011-2021 sono caratterizzati da valori maggiori di sia di  $P_{ma}$  e che  $T_{ma}$ , con incrementi compresi tra 180 mm (Cansiglio – Tramedere) e 16 mm (Farra di Soligo) per la precipitazione e tra 0.70 °C (Belluno – Aeroporto) e 0.16 °C (Follina) per la temperatura. Precipitazione e temperatura media annua, nei due periodi di riferimento, risultano entrambe ben correlate con quota delle stazioni meteorologiche (*Figura 25*). I valori dei coefficienti di determinazioni delle regressioni lineari confermano la minore variabilità spaziale della temperatura rispetto a quella della precipitazione. Da notare che le regressioni della temperatura nei due periodi di riferimento presentano la medesima pendenza (-6.1E-03) e risultano traslate verso l'alto di 0.44 °C, vale a dire la media delle differenze di  $T_{ma}$  registrate sulle singole stazioni nei due periodi, a testimonianza di un incremento generalizzato della temperatura atmosferica su tutta l'area.

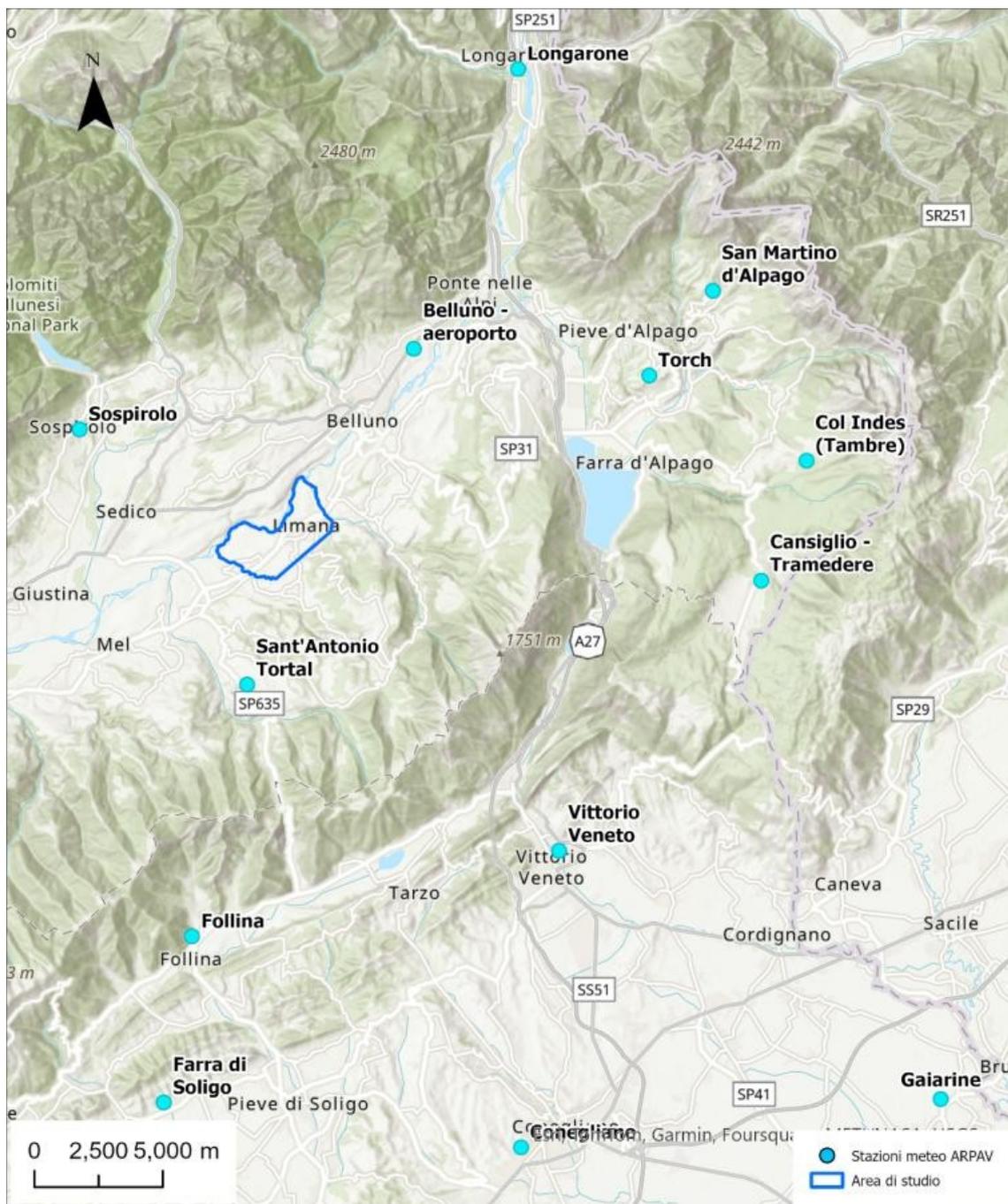


Figura 21 - Ubicazione delle stazioni meteorologiche utilizzate per il calcolo del bilancio idrico del suolo.

Stazione	Sigla	X (m)	Y (m)	Quota (m s.l.m.)	%P	%T
Belluno - Aeroporto	BA	1750560	5117458	379	37.36	37.36

Cansiglio - Tramedere	CA	176406 9	510835 0	1022		
Col Indes - Tambre	CT	176583 0	511306 1	1181		
Conegliano	CO	175472 8	508612 5	90		
Farra di Soligo	FS	174083 6	508788 3	169		
Follina	FO	174193 2	509440 2	208	1.15	1.15
Gaiarine	GA	177106 0	508802 7	17		
Longarone	LO	175461 5	512843 4	435		
San Martino d'Alpago	SM	176219 2	511972 9	828		
Sant'Antonio Tortal	SA	174407 2	510428 1	544		
Sospirolo	SO	173755 7	511429 5	426		
Torch	TO	175971 9	511640 9	593		
Vittorio Veneto	VV	175620 9	509776 8	123	20.9 8	20.9 8
Follina antincendio	FA	174157 3	509402 2	311		

*Tabella 2 - 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.*

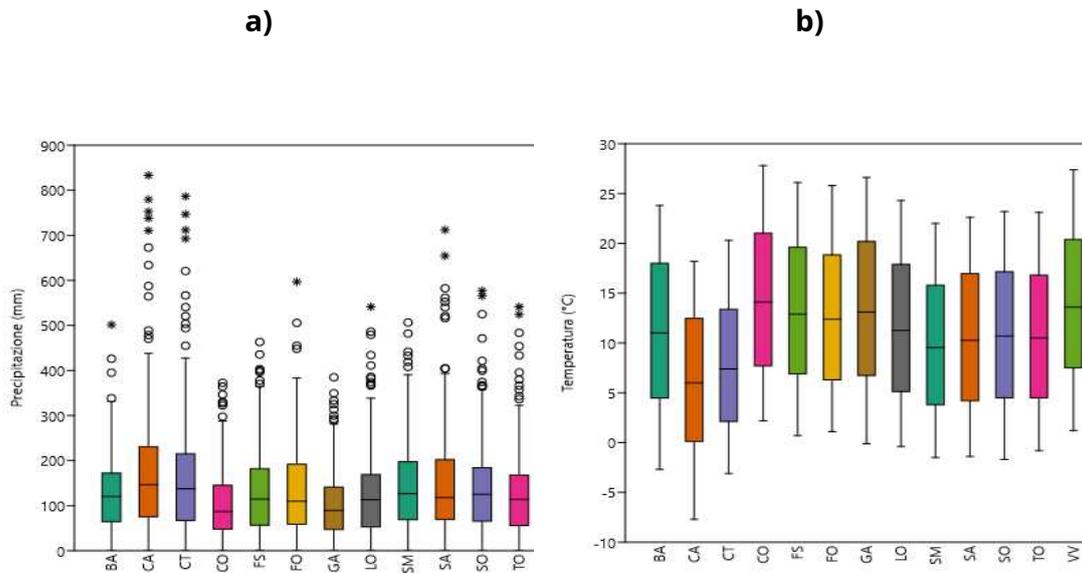


Figura 22 - Box-plot dei valori di: a) precipitazione mensile e b) temperatura mensile del periodo 1994-2022, registrati nelle stazioni di: Belluno – Aeroporto (BA), Cansiglio – Tramedere (CA), Col Indes – Tambre (CT), Conegliano (CO), Farra di Soligo (FS), Follina (FO), Gaiarine (GA), Longarone (LO), San Martino d'Alpago (SM), Sant'Antonio Tortal (SA), Sospirolo (SO), Torch (TO) e Vittorio Veneto (VV); nel box-plot delle precipitazioni con simboli puntuali (cerche ed asterischi) sono individuati valori anomali o outliers.

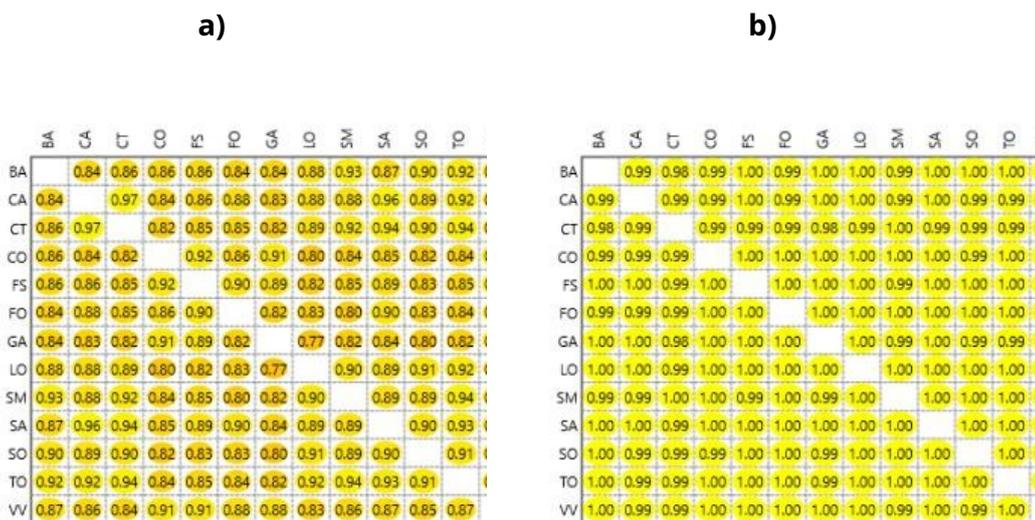
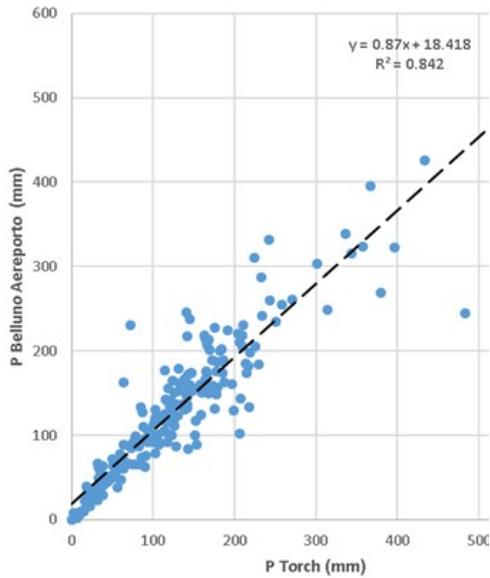


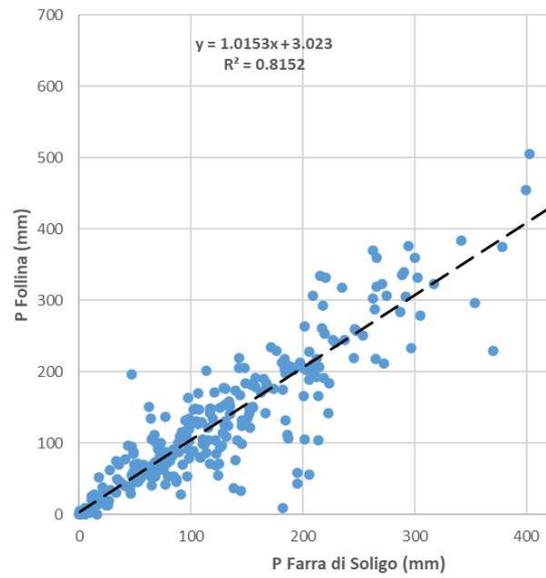
Figura 23 - Matrice di correlazione dei valori di: a) precipitazione mensile e b) temperatura mensile del periodo 1994-2022, tra le stazioni di: Belluno – Aeroporto (BA), Cansiglio – Tramedere (CA), Col Indes –

Tambre (CT), Conegliano (CO), Farra di Soligo (FS), Follina (FO), Gaiarine (GA), Longarone (LO), San Martino d'Alpago (SM), Sant'Antonio Tortal (SA), Sospirolo (SO), Torch (TO) e Vittorio Veneto (VV).

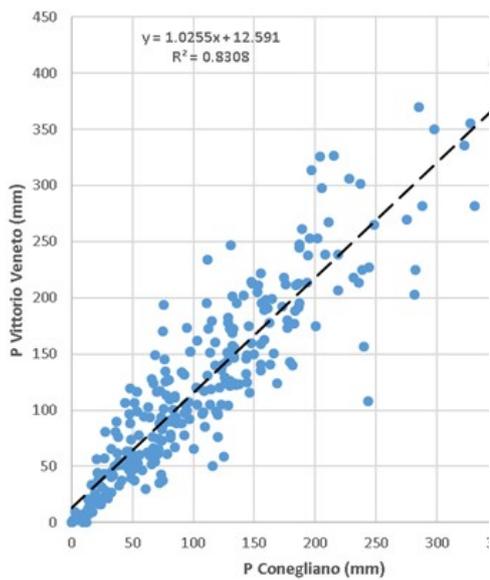
a)



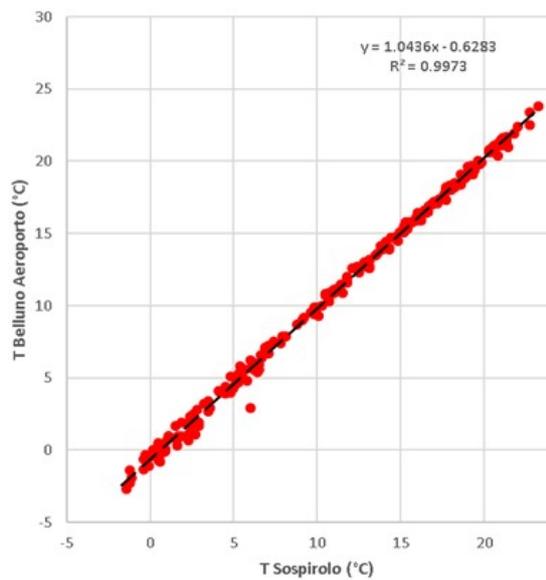
b)



c)



d)



e)

f)

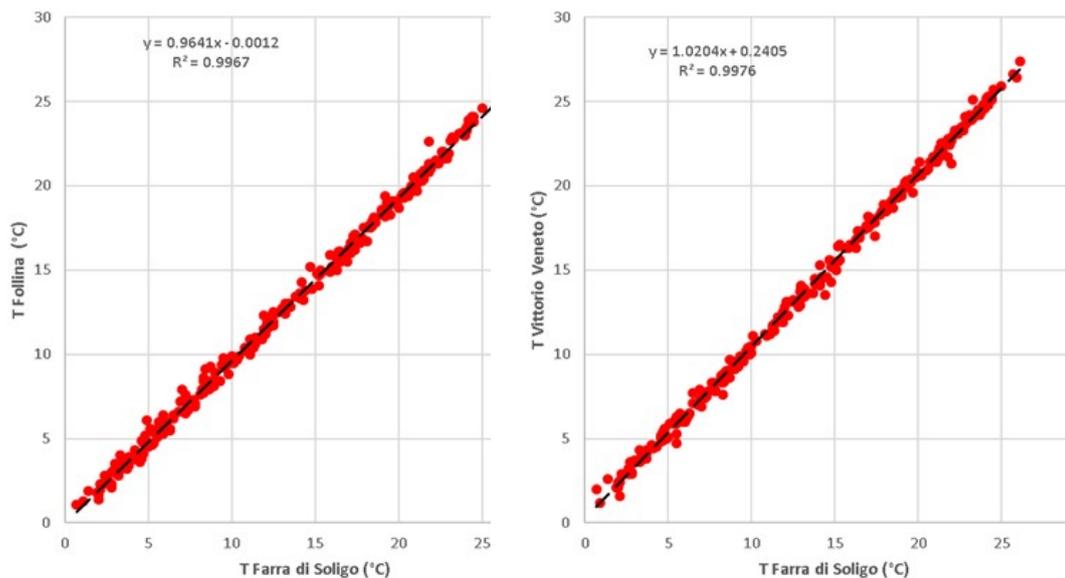


Figura 24 - Scatter-plot e rette di regressione dei valori di P<sub>m</sub> (in blu) e T<sub>m</sub> (in rosso) per le coppie di stazioni: a) Belluno – Aeroporto vs Torch, b) Follina vs Farra di Soligo, c) Vittorio Veneto – Conegliano, d) Belluno – Aeroporto vs Sospirolo, e) Follina vs Farra di Soligo, f) Vittorio Veneto vs Farra di Soligo, per il periodo 1994-2022.

Stazione	P <sub>ma</sub> 1994- 2022 (mm)	P <sub>ma</sub> 2011- 2021 (mm)	T <sub>ma</sub> 1994- 2022 (°C)	T <sub>ma</sub> 2011- 2021 (°C)
Belluno - Aeroporto	1498.82	1553.35	10.49	11.19
Cansiglio - Tramedere	2049.52	2229.24	6.15	6.48
Col Indes - Tambre	1911.74	2069.16	7.78	8.24
Conegliano	1228.36	1275.29	14.31	14.78
Farra di Soligo	1530.24	1547.11	13.18	13.57
Follina	1641.98	1669.83	12.48	12.64
Gaiarine	1218.92	1309.05	13.42	13.83
Longarone	1482.25	1634.64	11.38	11.81
San Martino d'Alpago	1681.27	1793.00	9.64	10.27
Sant'Antonio Tortal	1739.15	1825.09	10.41	10.83
Sospirolo	1640.50	1721.73	10.65	11.28

Torch	1468.75	1547.05	10.58	10.98
Vittorio Veneto	1410.79	1496.67	13.69	13.99

Tabella 3 - Valori di precipitazione medie annua (Pma) e temperatura media annua (Tma) registrati nei periodi 1994-2022 e 2011-2022 sulle stazioni ubicate in prossimità del bacino idrografico della Val Lapisina.

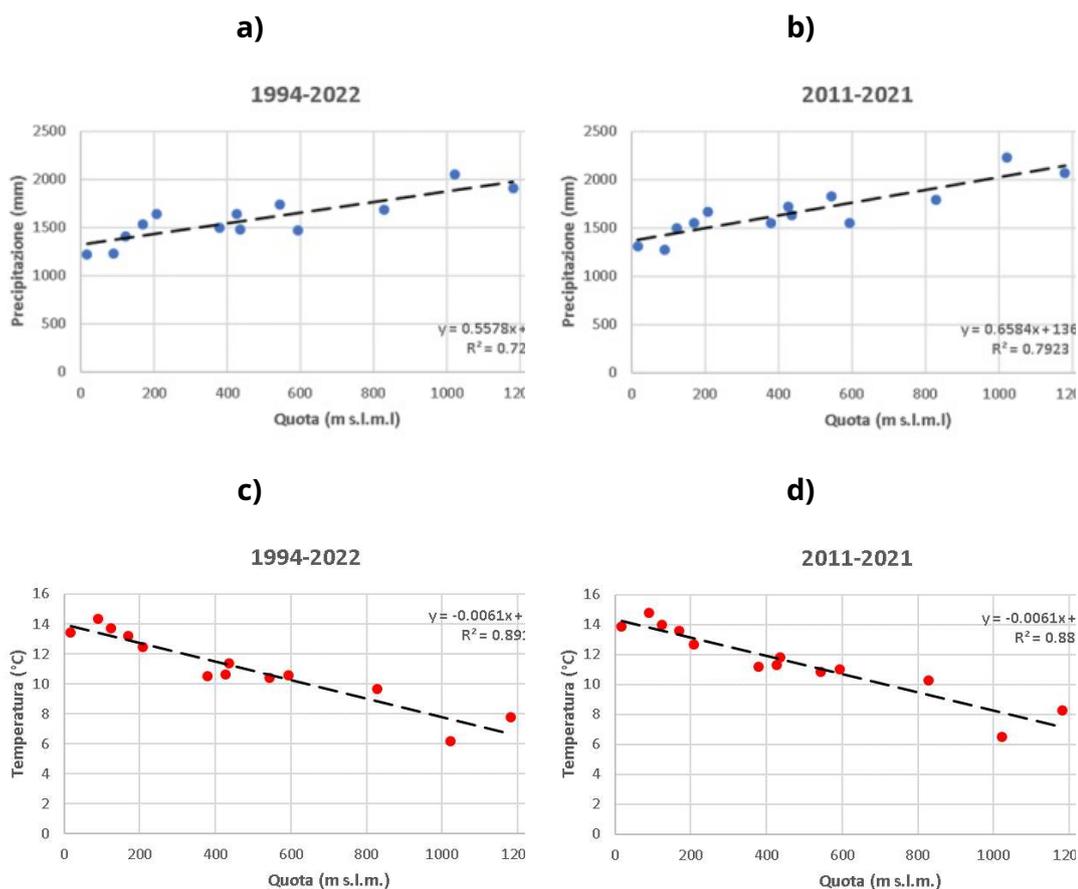


Figura 25 - Scatter-plot e rette di regressione tra i valori di Pma (in blu) e la quota delle stazioni per i periodi: a) 1994-2022, b) 2011-2021 e tra i valori di Tma (in rosso) e la quota delle stazioni per i periodi: c) 1994-2022 e d) 2011-2021.

### 4.3.2 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 ( $E_{p_m}$ ), che rappresenta la quantità di acqua che evapotraspirerebbe nel caso in cui, in termini di bilancio idrico del suolo, ve ne fosse una disponibilità continua e sufficiente.  $E_{p_m}$  è calcolata in base alla relazione sperimentale che la lega alla temperatura media mensile ( $T_m$ ), secondo:

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

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:

$$i = \left( \frac{T}{5} \right)^{1.541}$$

mentre  $\beta$  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 di acqua, che, mensilmente, è presente nel suolo in relazione al 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. Nel caso specifico, per stimare AWC in corrispondenza di ciascuna stazione, è stata utilizzata la Carta della riserva idrica dei suoli del Veneto alla scala 1:250000 (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) e corrispondono ai valori medi delle classi di riserva idrica: moderata, bassa e molto bassa, individuate dalla cartografia regionale in corrispondenza delle stazioni utilizzate. Applicando il bilancio idrico del suolo di Thornthwaite & Mather, a partire dai valori di

precipitazione mensile e temperatura media mensile, è stato possibile valutare l'evapotraspirazione reale, il deficit idrico (D) e l'eccedenza idrica o surplus al suolo (S), su base mensile e annua. Il surplus è considerato equiparabile, in prima approssimazione, alla precipitazione efficace ( $P_e$ ).

In Tabella 4 sono riepilogati i valori di surplus medio annuo calcolati sui due periodi di riferimento per le stazioni ubicate in prossimità all'area di studio. I valori sono compresi tra 1379.6 mm e 234.5 mm per il 1994-2022 e tra 1569.3 mm e 263.7 mm per il 2011-2021. Analogamente alla precipitazione mensile, anche il surplus risulta direttamente correlato alla quota delle stazioni meteorologiche in entrambi i periodi (*Figura 26*), con un lieve incremento del gradiente nel 2011-2021. In *Figura 27* ed in *Figura 28* sono riportati i bilanci idrici calcolati su ciascuna stazione per i due periodi di riferimento. Come si può vedere, l'afflusso meteorico è in grado di soddisfare la richiesta d'acqua per l'evapotraspirazione potenziale mensile, per cui  $E_{p_m}$  ed  $E_{r_m}$  sono sempre uguali ed il deficit è nullo, anche nei mesi estivi. Il surplus nelle stazioni montane è disponibile durante tutto l'anno, mentre in quelle di pianura è presente prevalentemente nei mesi primaverili ed autunnali.

In ultimo la stima del surplus sul bacino idrografico del territorio del Comune di Limana ha richiesto la spazializzazione dei valori puntuali ricostruiti in corrispondenza delle stazioni. Per la spazializzazione è stata utilizzata una funzione di base radiale multiquadratica (Multiquadratic Radial Basis Function o RBF; Carlson & Foley, 1992b), 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 (*Figura 29*). Il quantitativo di acqua al suolo disponibile per infiltrazione e ruscellamento all'interno dell'area di studio può essere stimato pari rispettivamente a: 850.75 mm/anno per il periodo 1994-2022 e 911.40 mm/anno per il periodo 2011-2021.

<b>Stazione</b>	<b>AWC (mm)</b>	<b>S<sub>ma</sub> 1994- 2022</b>	<b>S<sub>ma</sub> 2011- 2021</b>
-----------------	---------------------	--------------------------------------	--------------------------------------

		(mm)	(mm)
Belluno - Aeroporto	112.5	714.27	744.93
Cansiglio - Tramedere	112.5	1397.59	1569.31
Col Indes - Tambre	112.5	1225.56	1368.63
Conegliano	187.5	234.51	263.72
Farra di Soligo	187.5	581.31	585.69
Follina	37.5	871.66	895.16
Gaiarine	187.5	250.96	325.40
Longarone	37.5	746.88	885.79
San Martino d'Alpago	112.5	932.27	1025.75
Sant'Antonio Tortal	112.5	961.46	1035.53
Sospirolo	187.5	778.57	839.31
Torch	112.5	687.39	754.07
Vittorio Veneto	187.5	439.87	516.20

Tabella 4 - Valori di surplus medio anno (Sma) calcolati nei periodi 1994-2022 e 2011-2022 sulle stazioni ubicate in prossimità del bacino idrografico della Val Lapisina.

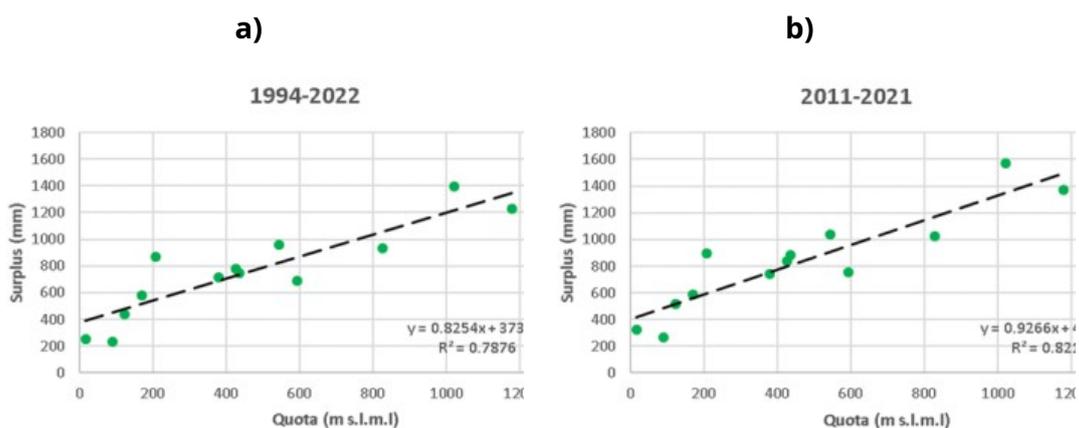
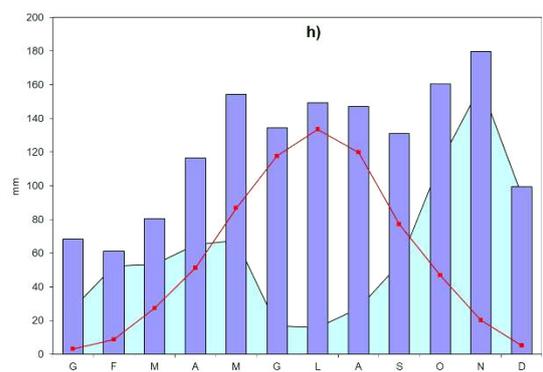
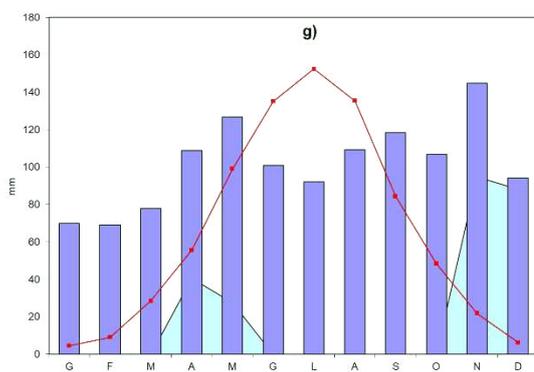
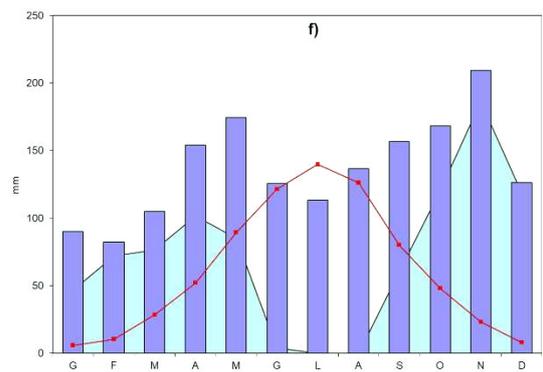
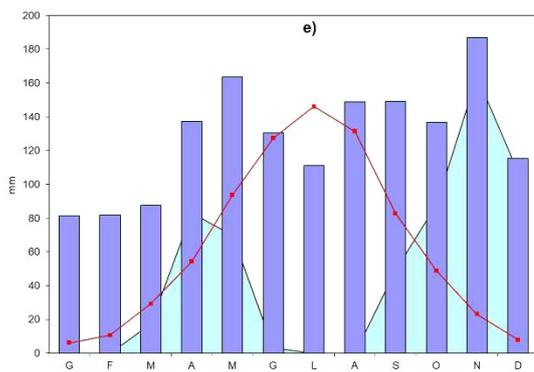
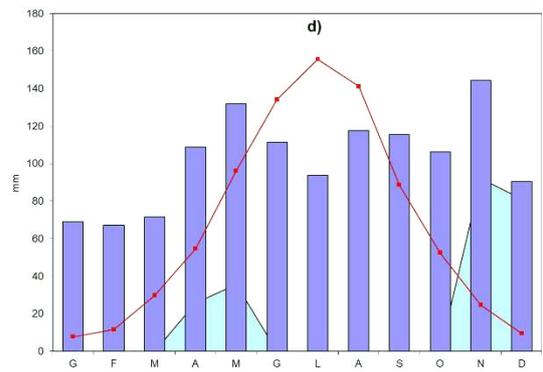
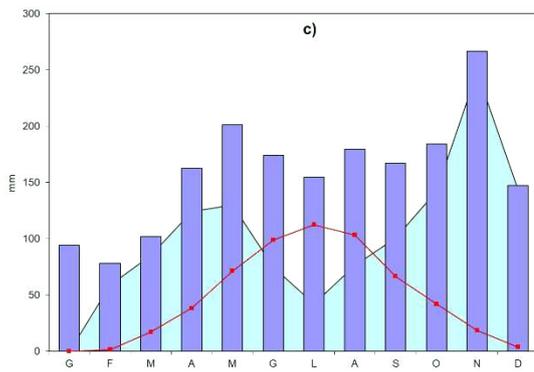
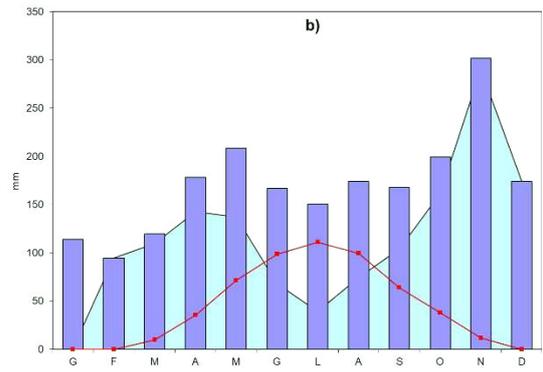
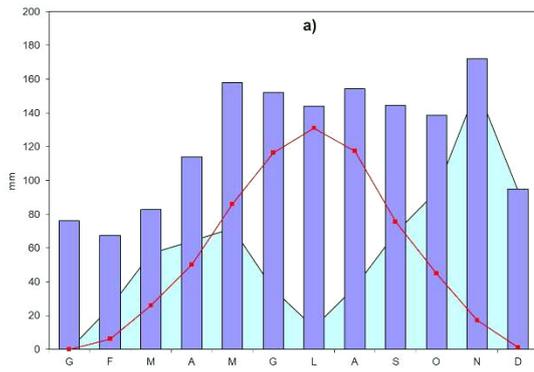


Figura 26 - Scatter-plot e rette di regressione tra i valori di Sma e la quota delle stazioni per i periodi:

a) 1994-2022, b) 2011-2021



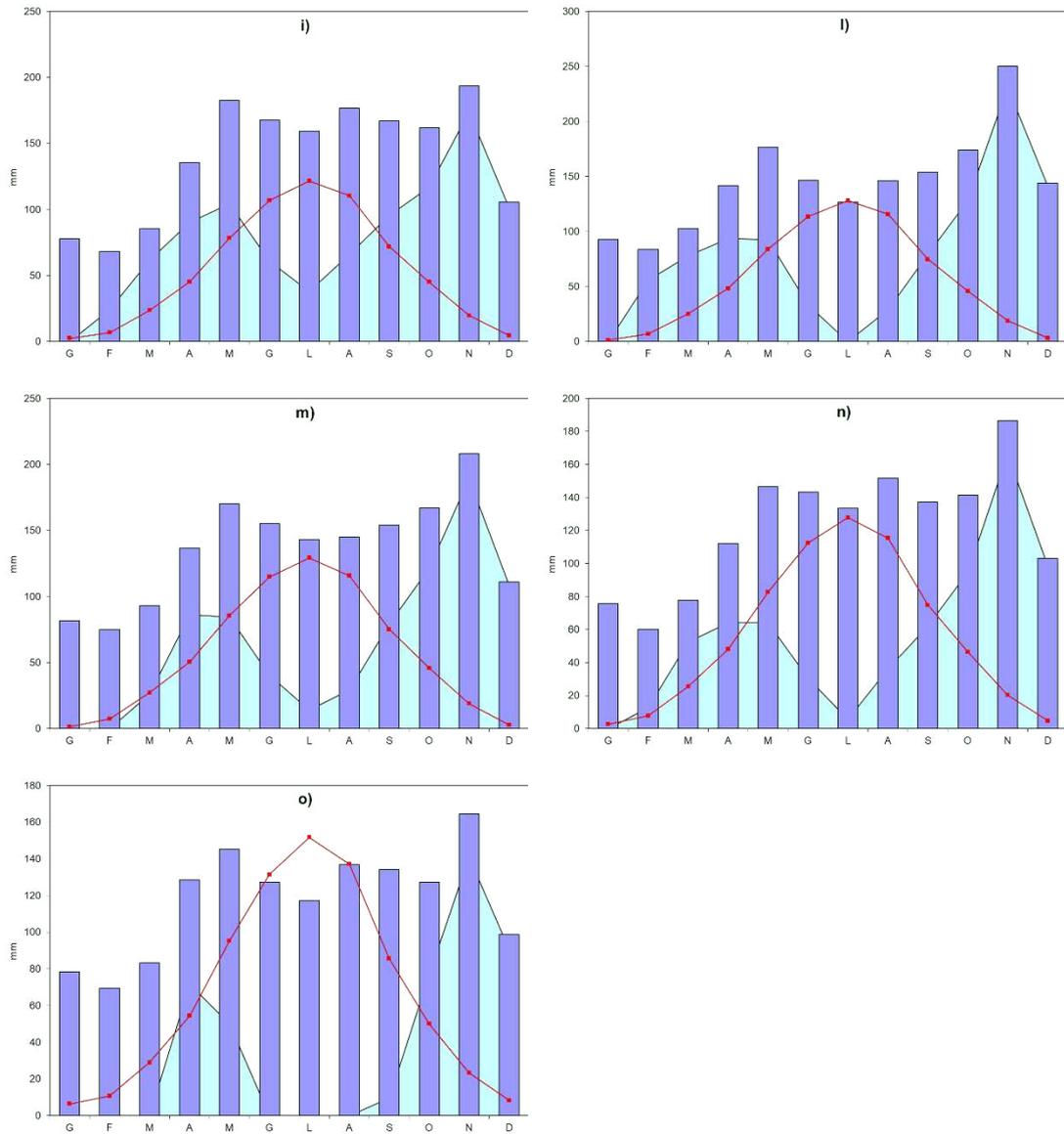
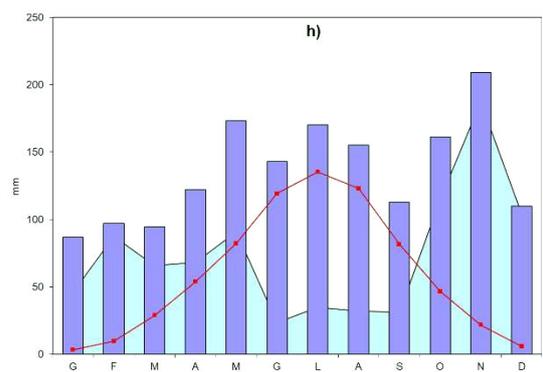
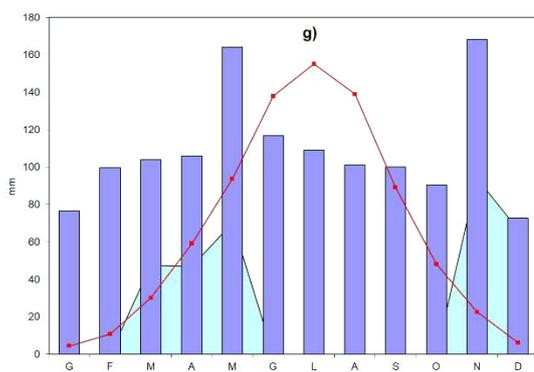
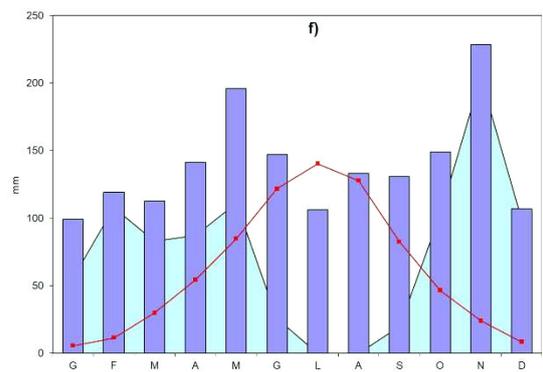
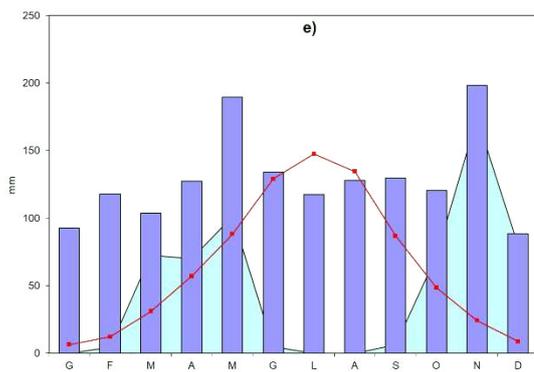
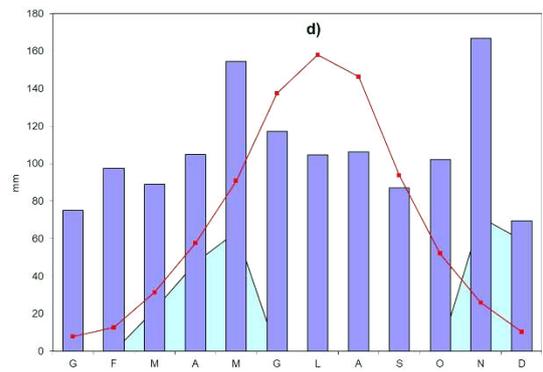
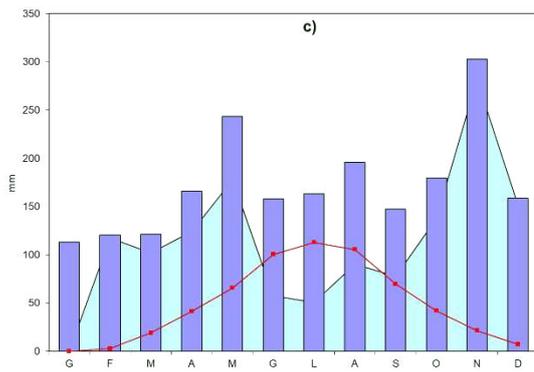
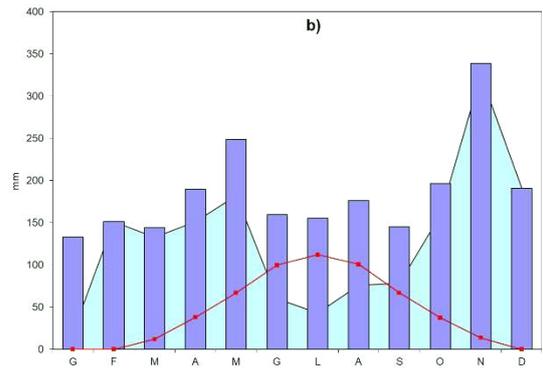
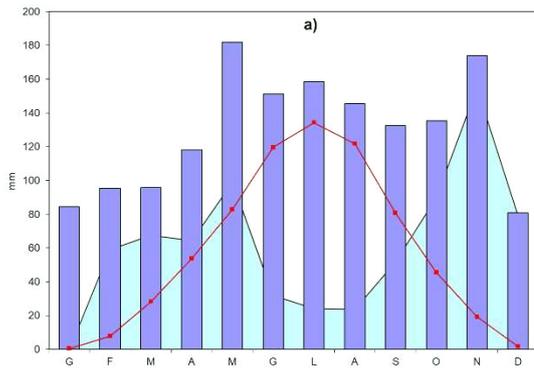


Figura 27 - Bilancio idrico del suolo secondo Thornthwaite & Mather nelle stazioni di: a) Belluno – Aeroporto, b) Cansiglio – Tramedere, c) Col Indes – Tambre, d) Conegliano, e) Farra di Soligo, f) Follina, g) Gaiarine, h) Longarone, i) San Martino d'Alpago, l) Sant'Antonio Tortal, m) Sospirolo, n) Torch e o) Vittorio Veneto per il periodo 1994-2022.



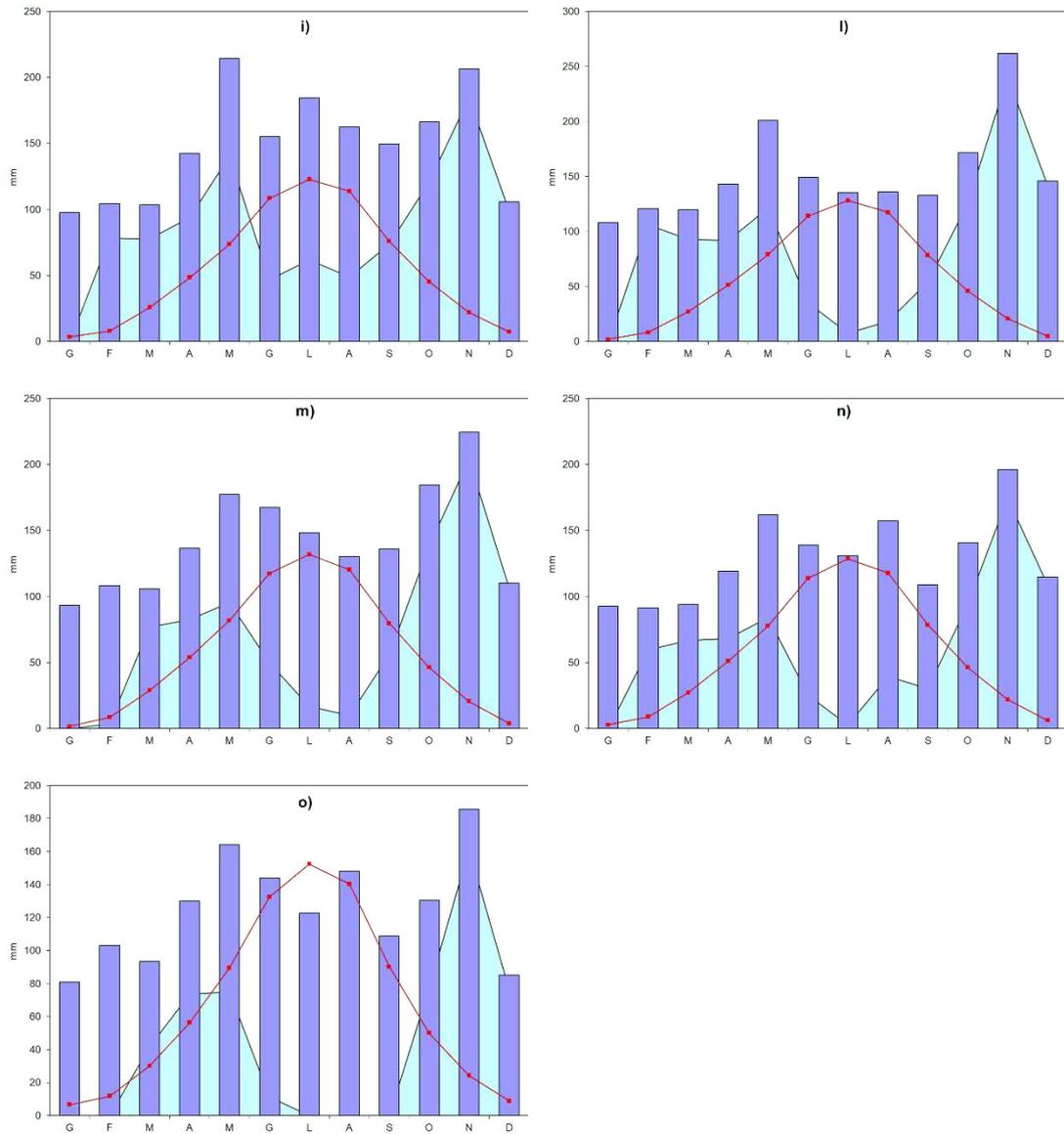


Figura 28 - Bilancio idrico del suolo secondo Thornthwaite & Mather nelle stazioni di: a) Belluno – Aeroporto, b) Cansiglio – Tramedere, c) Col Indes – Tambre, d) Conegliano, e) Farra di Soligo, f) Follina, g) Gaiarine, h) Longarone, i) San Martino d'Alpago, l) Sant'Antonio Tortal, m) Sospirolo, n) Torch e o) Vittorio Veneto per il periodo 2011-2021.

**a)**

**b)**

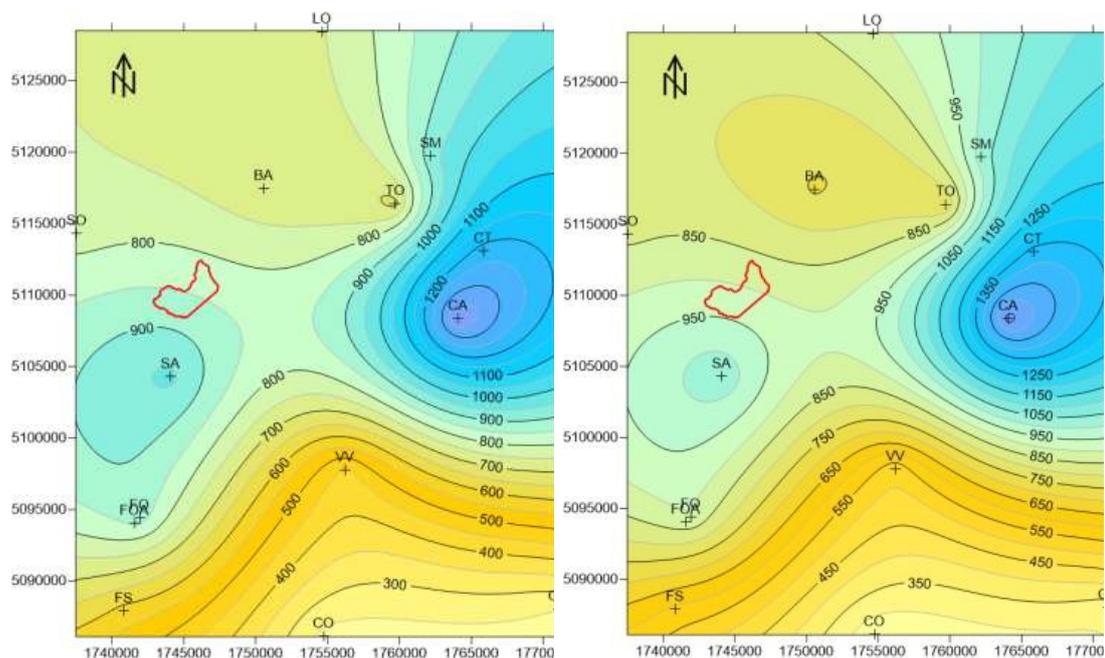


Figura 29 - Distribuzione del Surplus (in mm/anno) nell'area di studio per i periodi: a) 1994-2022 e b) 2011-2021; le coordinate (in m) sono nel sistema di riferimento Gauss-Boaga, fuso Ovest.

### 4.3.3 Infiltrazione

Una volta ottenuto il valore di precipitazione efficace ( $P_e$ ), è necessario valutare come essa si ripartisca tra acqua di ruscellamento e acqua di infiltrazione. Per valutare ciascuna di queste aliquote, è stato utilizzato il coefficiente di infiltrazione potenziale (c.i.p.) ovvero la percentuale di infiltrazione sul totale della pioggia efficace basandosi sulla litologia affiorante all'interno dell'area considerata (Celico, 1988). Per differenza, si può ricavare il valore di ruscellamento nella medesima area.

In Tabella 5 sono riportati alcuni valori del coefficiente di infiltrazione potenziale.

Complessi idrogeologici	c.i.p. %	Complessi idrogeologici	c.i.p. %
Calcari	90-100	Lave	90-100
Calcari dolomitici	70-90	Depositi piroclastici	50-70
Dolomie	50-70	Piroclastiti e lave	70-90

Calcari marnosi	30-50	Rocce intrusive	15-35
Detriti grossolani	80-90	Rocce metamorfiche	5-20
Depositi alluvionali	80-100	Sabbie	80-90
Depositi argilloso-marnoso-aren.	5-25	Sabbie argillose	30-50

*Tabella 5 - range di valori del coefficiente di infiltrazione potenziale per alcune litologie (Celico, 1988).*

Come espresso in precedenza, l'area studio è caratterizzata dalla presenza depositi di origine glaciale e fluvioglaciale formati principalmente da limi sabbiosi più o meno argillosi con ghiaie. Quindi il coefficiente di infiltrazione potenziale utilizzato (c.i.p.), in riferimento ai valori proposti da Celico (1988), è di 0.3. Questo valore indica che il 30% della pioggia efficace alimenta l'infiltrazione mentre il rimanente 70% defluisce per ruscellamento. Si può quindi dedurre che nell'area di studio la litologia favorisce il ruscellamento piuttosto che l'infiltrazione, permettendo alla pioggia efficace di disperdersi attraverso il reticolo idrografico e solo secondariamente di alimentare prevalentemente la circolazione idrica sotterranea.

## **4.4 Distribuzione dei contaminanti**

### **4.4.1 Distribuzione dei contaminanti nella rete piezometrica**

Come visto in precedenza, tra il 2001 ed il 2013 sono state eseguite numerose indagini geognostiche che hanno previsto l'esecuzione di sondaggi attrezzati successivamente a piezometro. Nel secondo semestre del 2013, su richiesta del Comune di Limana, sono stati effettuati dei campionamenti e delle analisi chimiche delle acque sotterranee, con lo scopo di verificare la situazione dell'inquinamento, alla luce delle nuove perforazioni con posa di piezometri eseguite nel medesimo anno. Il lavoro è stato svolto dal laboratorio accreditato A&B Chem di Longarone (BL).

Assieme ai campioni d'acqua prelevati, è stato effettuato per ogni punto un primo rilevamento dei valori di temperatura, pH e conducibilità elettrica specifica (EC). Il valore della temperatura di compensazione è pari a 20°C. Si riportano in Tabella 6 i valori medi per i rispettivi punti di campionamento.

<b>ID</b>	<b>T [°C]</b>	<b>pH</b>	<b>EC [<math>\mu</math>S/cm]</b>
S1	12.25	6.90	560.00
S2	12.05	6.33	604.50
S3	12.50	7.24	446.33
S4	12.65	6.91	637.00
S5	12.20	6.91	645.00
S6	13.50	8.63	1112.00
S7	10.80	7.03	580.00
S8	11.45	7.30	579.50
S9	14.12	7.38	521.40
S12	14.95	7.70	452.50
S13	12.35	7.35	403.50
S14	12.83	6.95	574.50
S15	11.75	6.86	571.50
S16	13.40	7.04	454.00
S16bis	12.40	7.12	658.00
SA1	15.05	7.36	570.00
SA2	11.70	7.65	759.00
SA3	12.28	7.35	519.75
SA4	12.55	6.82	748.00
SB5	12.80	7.24	528.20
SB6	13.10	7.46	612.50
SB7	11.85	7.47	538.00
SB8	15.00	7.48	681.50
SB9	15.20	7.35	807.00

SB10	14.73	7.44	584.33
SB11	12.67	7.38	449.67

Tabella 6- Valori medi di temperatura, pH e conducibilità elettrica specifica nei punti di campionamento.

Da questi dati si ricava il corrispettivo grafico che compara l'andamento dei valori per ciascun punto di campionamento (Figura 30).

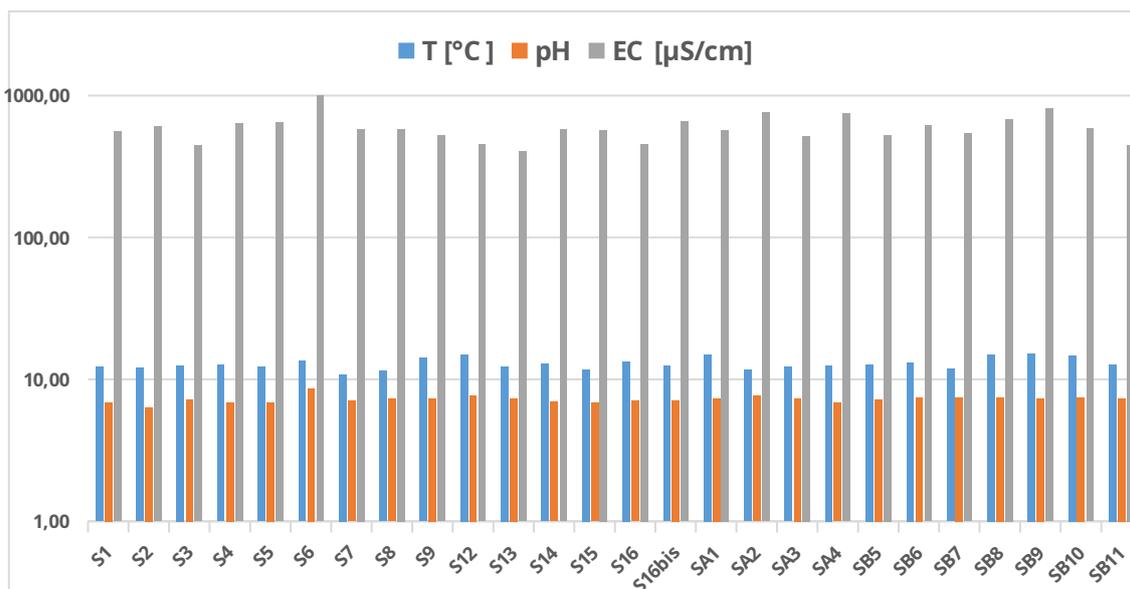


Figura 30 - Andamento dei valori medi di conducibilità elettrica specifica, temperatura e pH in riferimento ai punti di prelievo

Sono state condotte quattro campagne di campionamento e analisi delle acque sotterranee, in aggiunta alle analisi sui campioni di terreno prelevati dai sondaggi. Queste campagne si sono svolte in data: 22/08/2013, 07/02/2014 (limitata alla zona di La Cal con il campionamento di sei piezometri), 10/09/2014 e, più recentemente in data 08/06/2015.

I dati ottenuti sono stati divisi per data di campionamento e parametro analizzato. I valori dei parametri sono stati successivamente confrontati con i corrispettivi valori di concentrazione soglia di contaminazione (CSC), che sono riportati nell'Allegato 5 al Titolo V della parte IV del D. Lgs. 152/06.

Di seguito si riportano i valori di CSC per ogni parametro analizzato durante le campagne di campionamento e analisi (*Tabella 7*).

Parametro	CSC ( $\mu\text{g/l}$ )
Clorometano	1.5
Triclorometano	0.15
Cloruro di Vinile	0.5
1,2-dicloroetano	3
1,1-dicloroetilene	0.05
Tricloroetilene	1.5
Tetracloroetilene	1.1
Esaclorobutadiene	0.15
1,1-dicloroetano	810
1,2-dicloroetilene	60
1,2-dicloropropano	0.15
1,1,2-tricloroetano	0.2
1,2,3-tricloropropano	0.001
1,1,2,2-tetracloroetano	0.05
Tribromometano	0.3
1,2-dibromoetano	0.001
Dibromoclorometano	0.13
Bromodiclorometano	0.17

*Tabella 7 - Valori di concentrazione soglia di contaminazione (CSC) per ogni parametro analizzato durante la campagna d'indagine.*

Dall'analisi dei risultati in confronto con i valori delle CSC emerge che, in base alla normativa vigente (D. Lgs 152/06), molti di essi non raggiungono livelli tali da costituire un rischio per la salute umana. Inoltre, i valori di contaminante che non

superano il limite di rilevabilità, ovvero il limite inferiore di concentrazione sotto il quale il campione non può essere rivelato con sufficiente probabilità statistica (Pettine, 2016), vengono considerati come assenti.

I contaminanti indice sono: Triclorometano, Tricloroetilene, Tetracloroetilene, Dibromoclorometano, Bromodichlorometano, 1,2-dicloropropano ed il 1,1,2-tricloroetano. La distribuzione di questi valori di concentrazione è stata rappresentata con l'ausilio di Surfer 12, utilizzato in precedenza anche per la ricostruzione delle superfici potenziometriche. La rappresentazione grafica utilizzata prevede l'utilizzo di simboli su una base cartografica. A ciascun simbolo è associato un colore che esprime l'ordine di grandezza della concentrazione in relazione alla CSC e un'etichetta con il valore di concentrazione. Questa operazione ha prodotto sette mappe, una per ciascun contaminante, che visualizzano i punti di campionamento distribuiti su una superficie delimitata da curve di livello rappresentanti la superficie potenziometrica media.

Nello specifico, i simboli di colore blu scuro, verde e azzurro rappresentano concentrazioni di contaminanti che si trovano al di sotto del valore della CSC, il che significa che in questi punti la contaminazione è presente, ma non supera i limiti di sicurezza stabiliti. D'altra parte, i simboli di colore giallo, arancione e rosso indicano concentrazioni di contaminanti che superano il valore di CSC, segnalando quindi la presenza di livelli di contaminazione potenzialmente pericolosi. Il valore più alto di concentrazione è rappresentato dal simbolo arancione (Figura 33). Questa situazione suggerisce un'area con un'elevata presenza di contaminanti, che richiede potenziali ulteriori indagini o interventi di bonifica.

Di seguito sono presentate le mappe di distribuzione dei contaminanti (Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35, Figura 36, Figura 37).

# TRICLOROMETANO

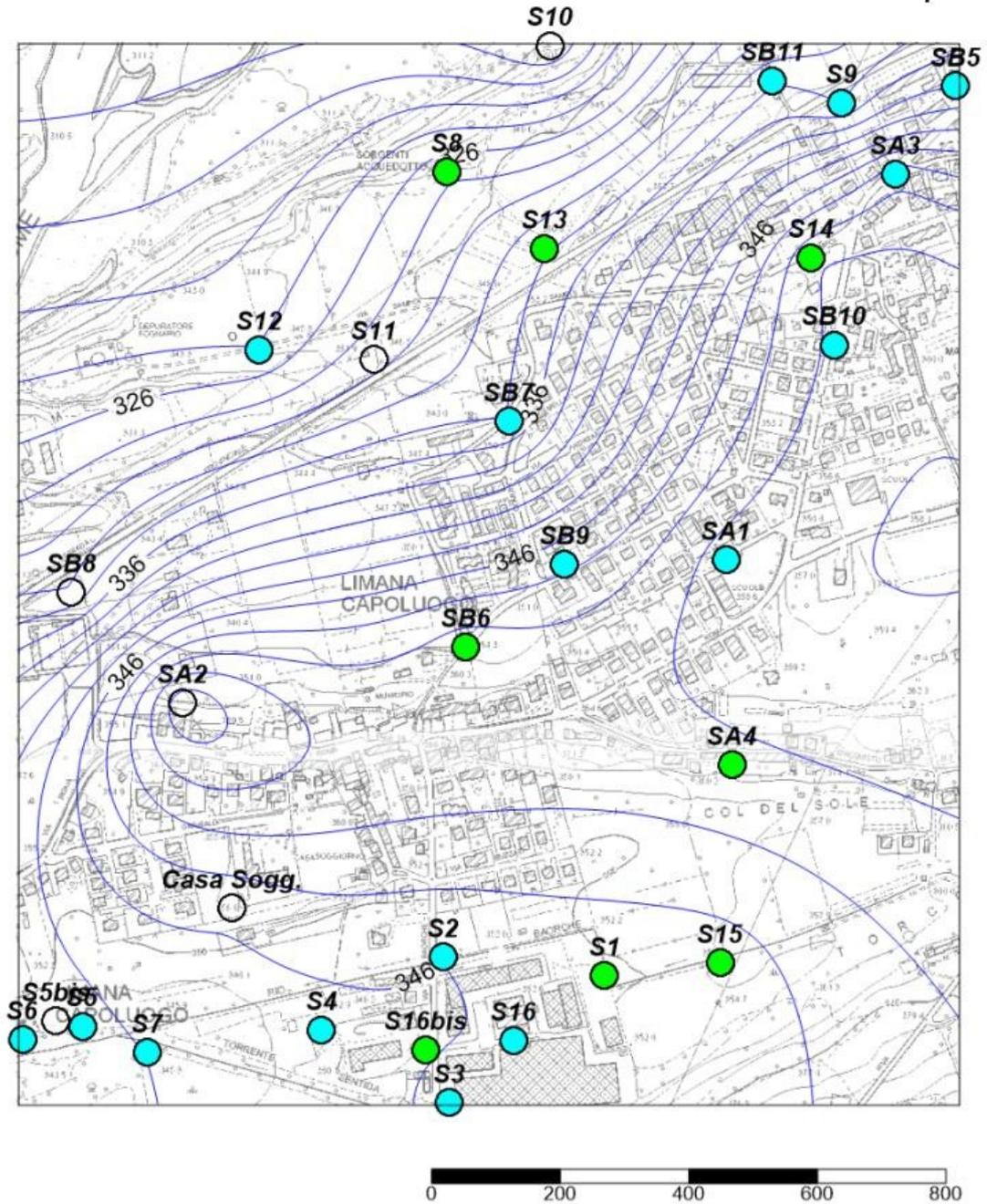


Figura 31 - Distribuzione delle concentrazioni di Triclorometano (in  $\mu\text{g/l}$ ) nei vari punti di campionamento. I simboli verdi ed azzurri indicano concentrazioni inferiori alla soglia di contaminazione (CSC).

# TRICLOROETILENE

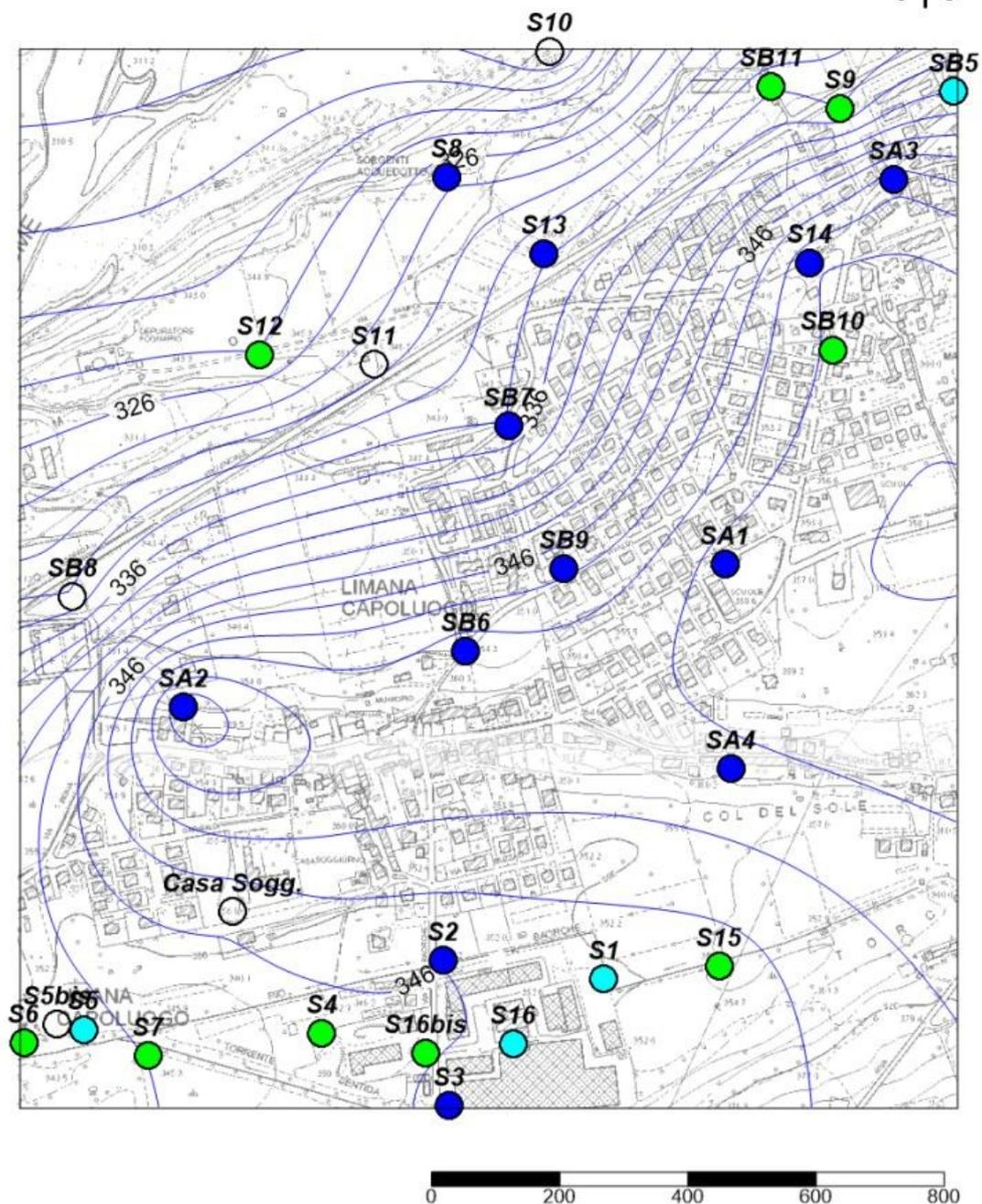


Figura 32 - Distribuzione delle concentrazioni [ $\mu\text{g}/\text{l}$ ] di Tricloroetilene nei vari punti di campionamento. I pallini verdi, azzurri e blu indicano concentrazioni inferiori alla soglia di contaminazione (CSC).

# TETRACLOROETILENE

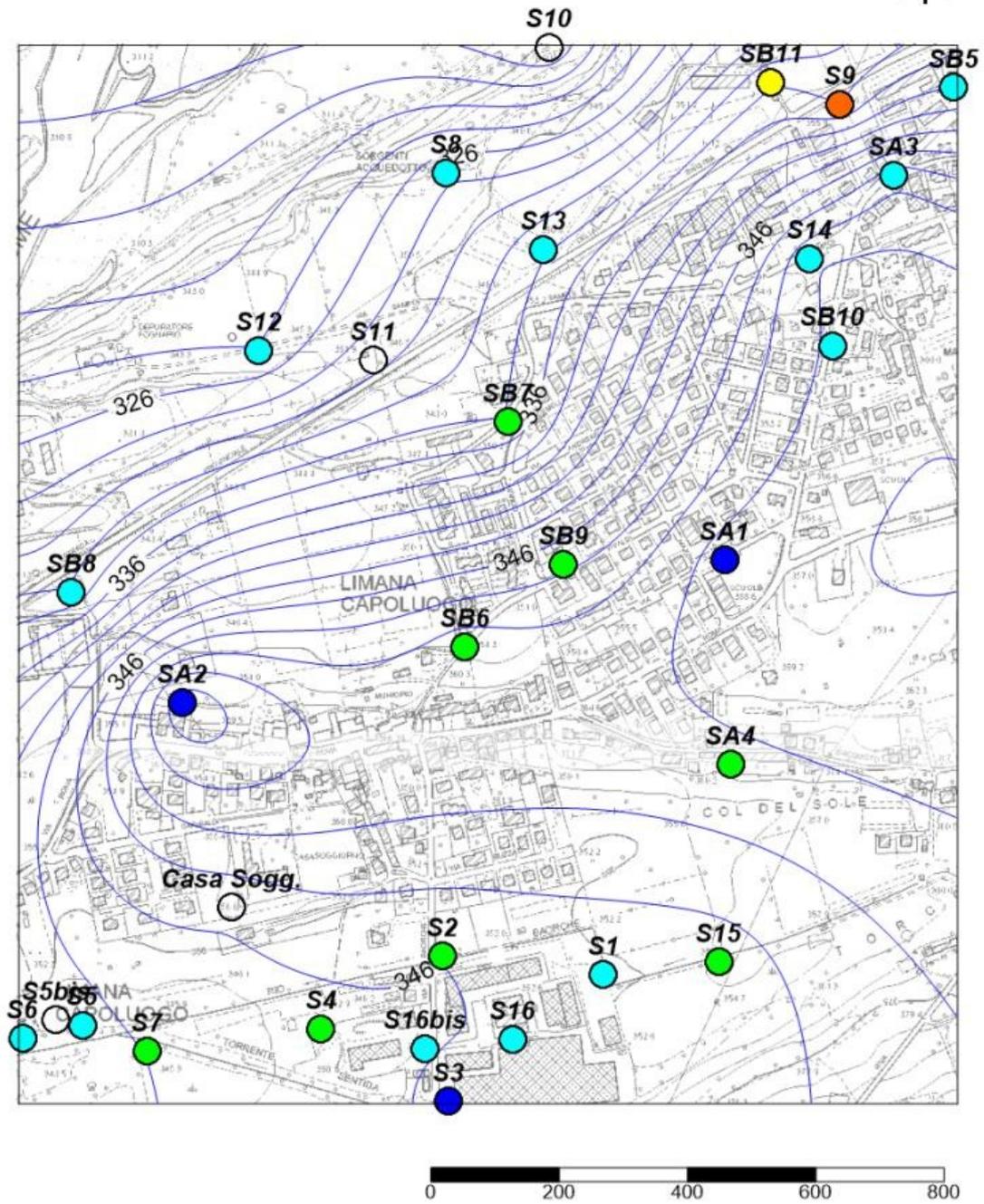


Figura 33 - Distribuzione delle concentrazioni [ $\mu\text{g}/\text{l}$ ] di Tetracloroetilene nei vari punti di campionamento. I pallini verdi, azzurri e blu indicano concentrazioni inferiori alla soglia di contaminazione (CSC), mentre i pallini giallo e arancione indicano superamento delle CSC.

# DIBROMOCLOROMETANO

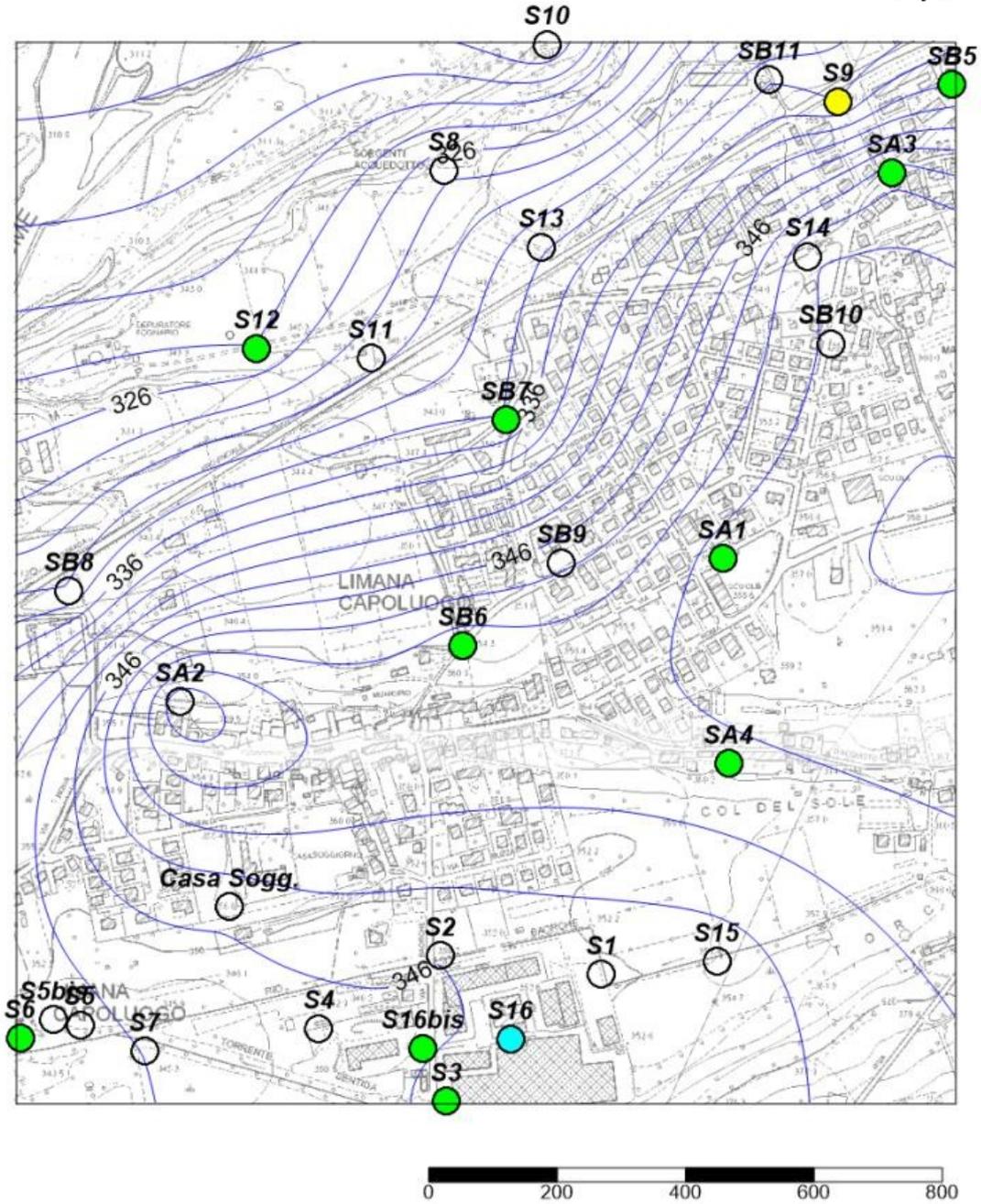


Figura 34 - Distribuzione delle concentrazioni [ $\mu\text{g}/\text{l}$ ] di Dibromoclorometano nei vari punti di campionamento. I pallini verdi ed azzurri indicano concentrazioni inferiori alla soglia di contaminazione (CSC).



# 1,2-DICLOROPROPANO

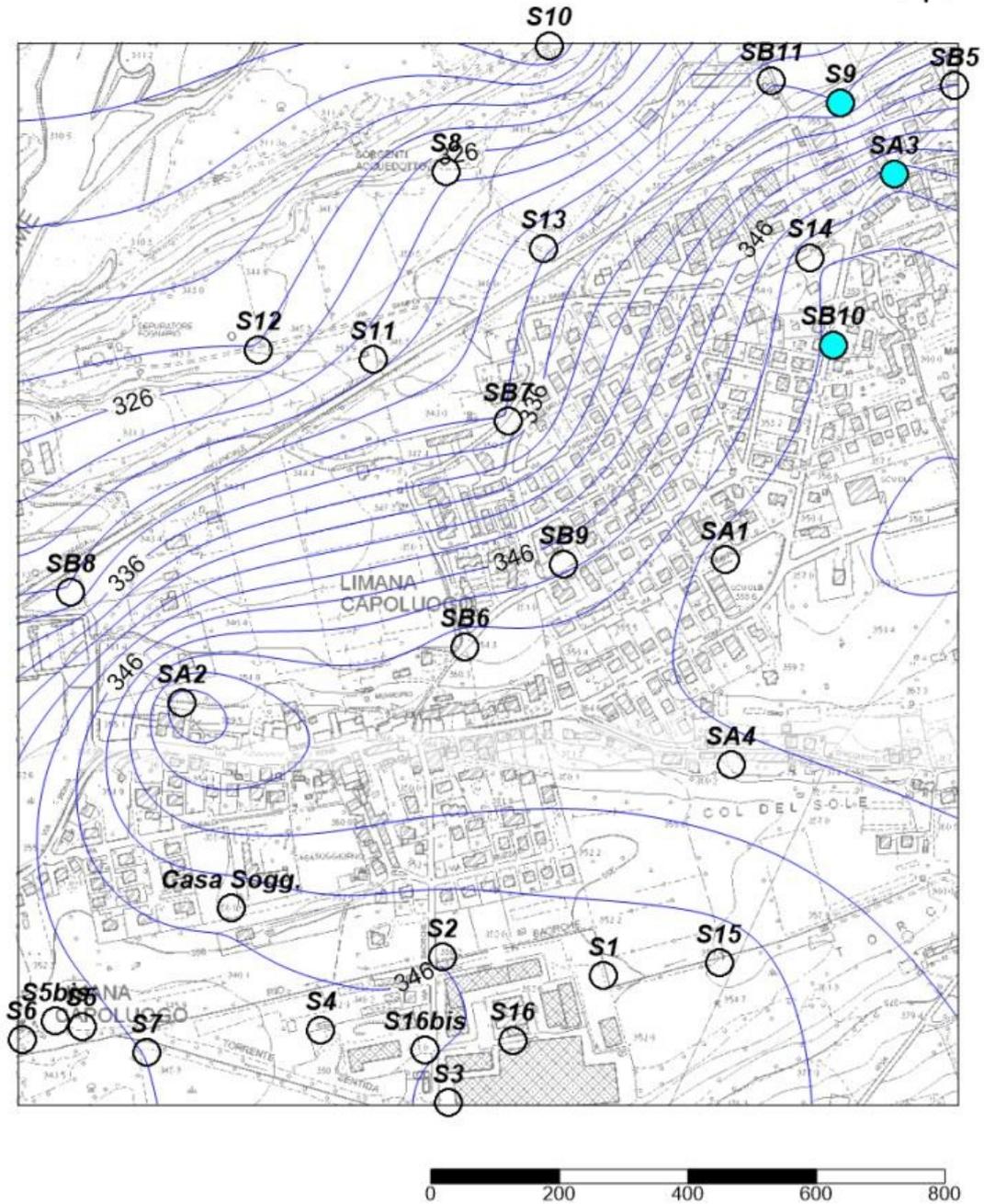


Figura 36 - Distribuzione delle concentrazioni [ $\mu\text{g/l}$ ] di 1,2-dicloropropano nei vari punti di campionamento. I pallini verdi ed azzurri indicano concentrazioni inferiori alla soglia di contaminazione (CSC).

# 1,1,2-TRICLOROETANO

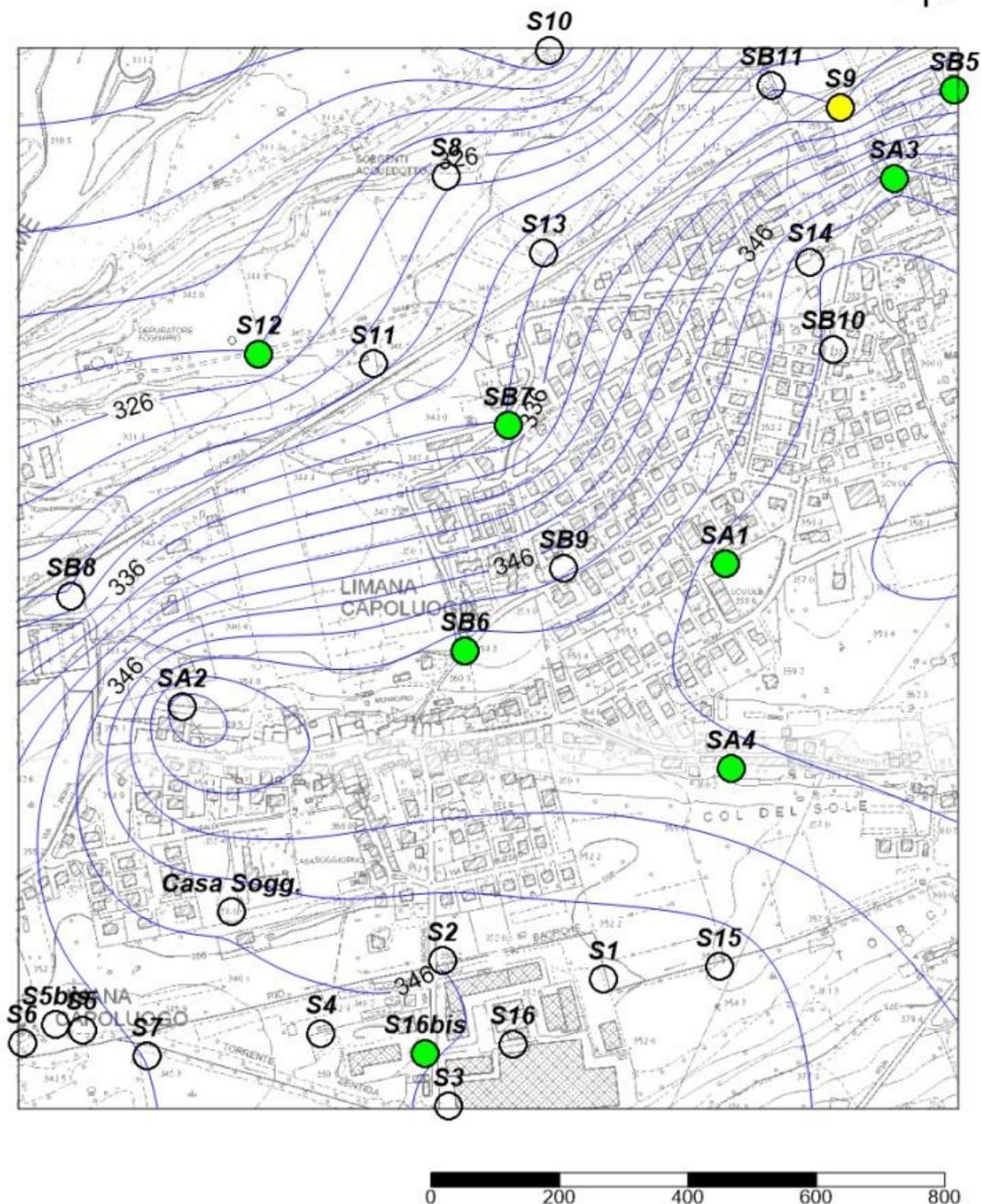


Figura 37 - Distribuzione delle concentrazioni [ $\mu\text{g}/\text{l}$ ] di 1,1,2-tricloroetano nei vari punti di campionamento. I pallini verdi indicano concentrazioni inferiori alla soglia di contaminazione (CSC), mentre i pallini giallo indicano invece un superamento.

L'interpretazione di queste mappe è fondamentale per comprendere la distribuzione della contaminazione nell'area di studio e per identificare le zone che necessitano di maggiore attenzione.

Da un primo confronto tra le mappe di concentrazione si nota immediatamente come nella maggior parte dei casi, non ci siano superamenti dei valori delle CSC ad eccezione di due casi, ovvero per il Tetracloroetilene (*Figura 33*) ed il 1,1,2-tricloroetano (*Figura 37*). Le concentrazioni rilevate risultano generalmente molto inferiori ai limiti stabiliti dalla legge e si trovano prevalentemente nella parte meridionale e centrale della mappa, ovvero più a monte rispetto alle Sorgenti Sampo.

Le aree dove vengono superati i valori delle CSC sono indicate con simboli gialli e, in un caso, anche arancioni, a significare che il valore delle CSC è stato superato di oltre un ordine di grandezza. I contaminanti in questione sono il Tetracloroetilene ed il 1,1,2-tricloroetano. Viene evidenziata una contaminazione residua specificatamente nel piezometro S9 e, nel caso del Tetracloroetilene, anche più a valle nel piezometro SB11, nella zona di La Cal.

In conclusione, l'analisi delle mappe fornisce una visione complessiva della distribuzione delle concentrazioni di contaminanti nell'area di studio, evidenziando le zone di maggior interesse con valori superiori alle CSC previste dal D.Lgs. 152/06. La parte restante della rete piezometrica presenta valori di contaminazione nulla o comunque al di sotto delle CSC, suggerendo che le condizioni ambientali generali non siano troppo compromesse.

#### **4.4.2 Analisi di contaminazione nelle Sorgenti Sampo**

Tra la fine del 2000 ed inizio del 2001, grazie alle analisi chimiche eseguite dall'Unità Locale Socio-Sanitaria (ULSS), è stata individuata una contaminazione da organoalogenati nelle Sorgenti Sampo. Inizialmente le analisi venivano svolte con

cadenza settimanale mentre ad oggi risultano eseguite ogni due tre mesi, vista anche la stabilizzazione dei valori di concentrazione di PCE nelle acque campionate.

I dati attualmente disponibili vanno da gennaio 2013 a febbraio 2015 e sono a cura di ARPAV. Dall'esame dei dati ricavati, con eccezione del Triclorometano, si evince una netta diminuzione dei valori di contaminazioni rispetto ai rapporti del 2001 dove venivano riscontrati picchi di PCE prossimi a 500 µg/l, quindi significativamente al di sopra dei limiti di legge (D.Lgs. 152/06).

Analizzando la concentrazione di Triclorometano nelle sorgenti (*Figura 38*) si osserva un incremento tra gennaio 2013 ed agosto 2013. Partendo da un valore di circa 0.15 µg/l, viene raggiunto un picco di circa 0.31 µg/l intorno a maggio 2013, superando la CSC, che risulta pari a 0.15 µg/l. Dopo il picco, la concentrazione di Triclorometano ha una rapida diminuzione, che scende sotto la soglia di contaminazione già a partire da settembre 2013. Il valore si abbassa fino a scendere sotto il limite di rilevabilità in data 10/02/2014. Per tutto il periodo successivo, fino a febbraio 2015, i valori rimangono stabili sotto il limite di rilevabilità.

In seguito all'individuazione di PCE, con concentrazioni superiori ai limiti di legge, nei piezometri a monte delle sorgenti, i valori di concentrazione della stessa sostanza, misurati in due punti di prelievo delle Sorgenti Sampoi, sono riportati in *Figura 39* e *Figura 40*. Non risultano esserci superamenti delle CSC nel periodo analizzato. Nei restanti punti di prelievo non sono stati riscontrati valori superiori al limite di rilevabilità.

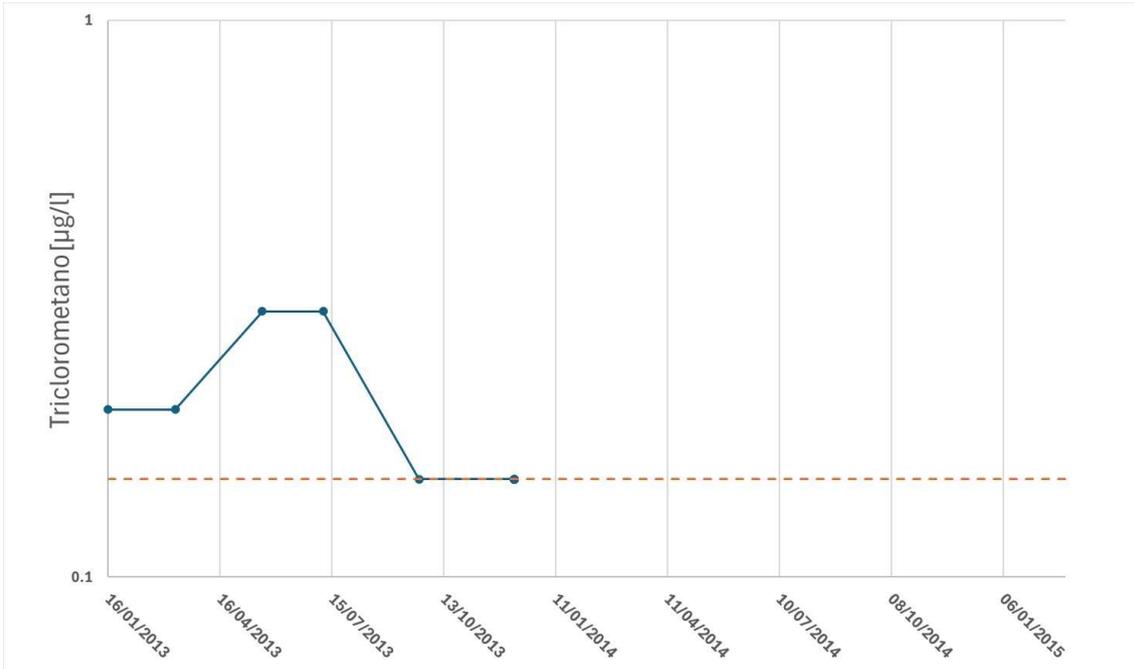


Figura 38 - Andamento della concentrazione di Triclorometano rilevate nella "Canaletta a 500 m. da recinzione e ingresso area laghetti (ACQ. Sampoi) Limana" in un periodo che va da gennaio 2013 a febbraio 2015. La linea blu rappresenta i valori misurati di Triclorometano, mentre la linea arancione orizzontale rappresenta il valore della CSC pari a 0.15 µg/L, come definito dal D.Lgs. 152/06.

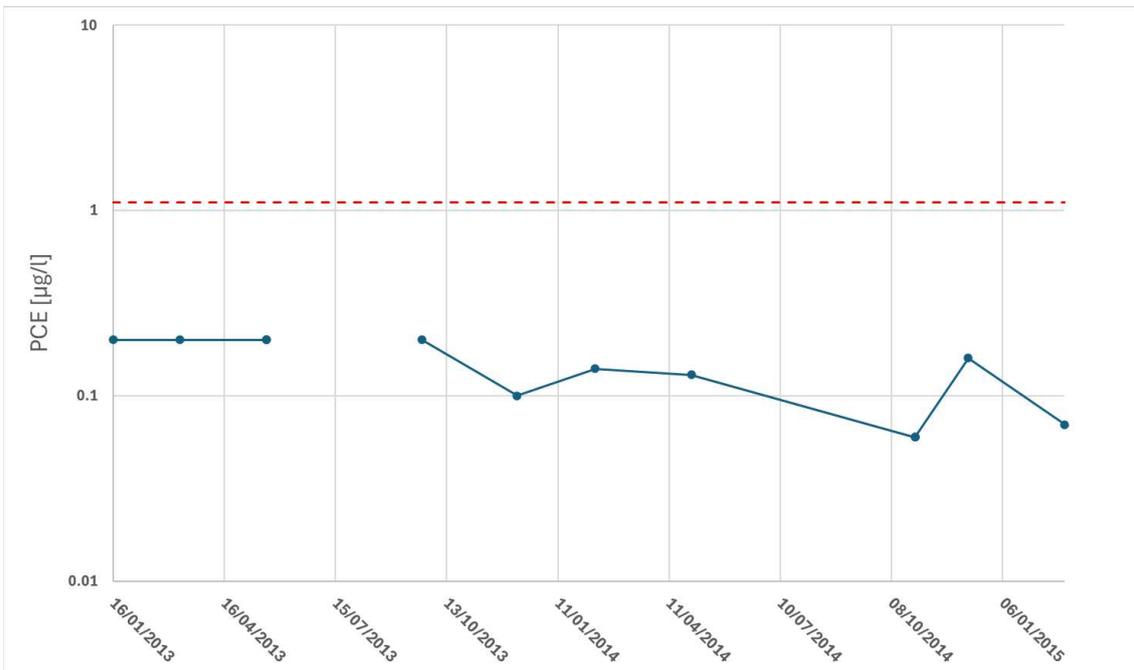


Figura 39 - Andamento della concentrazione di PCE rilevato nella "Opera di presa destra (ACQ. Sampoi) Limana" in un periodo che va da gennaio 2013 a febbraio 2015. La linea blu rappresenta i valori

misurati di PCE, mentre la linea arancione orizzontale rappresenta il valore della CSC pari a 1.1 µg/L, come definito dal D.Lgs. 152/06.

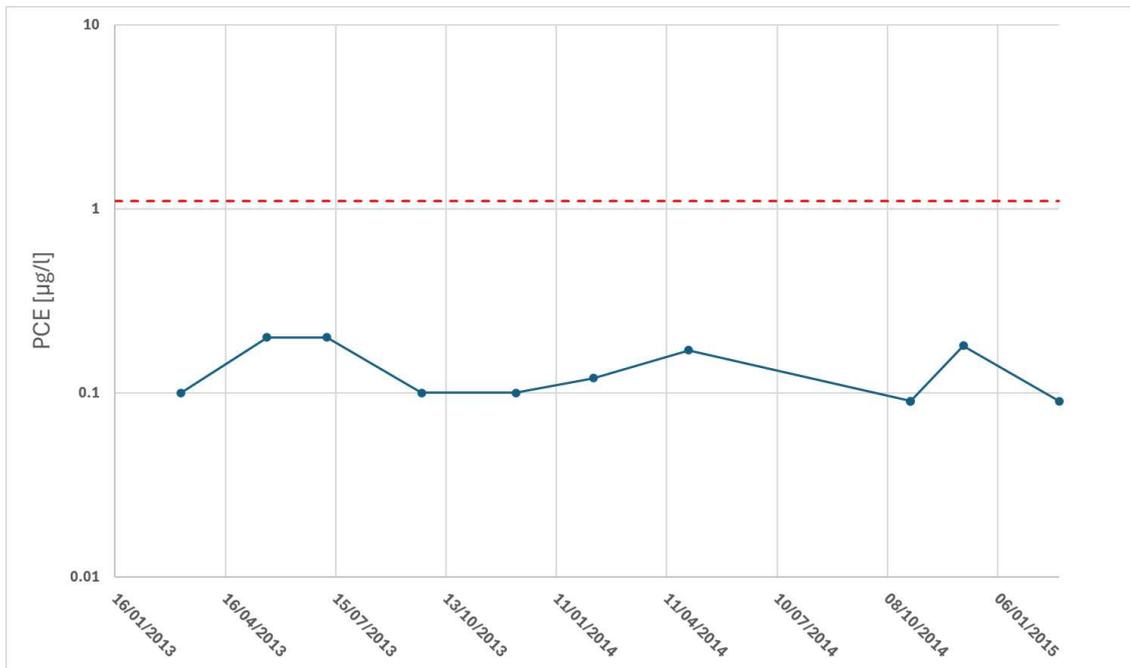


Figura 40 - Andamento della concentrazione di PCE rilevato nella "Sorgiva destra (ACQ. Sampoi) Limana" in un periodo che va da gennaio 2013 a febbraio 2015. La linea blu rappresenta i valori misurati di PCE, mentre la linea arancione orizzontale rappresenta il valore della CSC pari a 1.1 µg/L, come definito dal D.Lgs. 152/06.

Per i restanti contaminanti, di cui si sono fatte le analisi (Tabella 6), non sono stati riscontrati valori di concentrazione al di sopra delle CSC e nella maggior parte dei casi non sono stati riscontrati valori al di sopra del limite di rilevabilità.

#### 4.5 Modello idrogeologico concettuale e della contaminazione

Il modello idrogeologico concettuale rappresenta e sintetizza le principali caratteristiche idrogeologiche dell'area in oggetto. La sua definizione passa attraverso la raccolta, l'organizzazione e l'elaborazione dei dati di campo disponibili. Quindi, in accordo con le indagini eseguite, combinando i risultati di tali indagini e le

elaborazioni precedentemente documentate, si può delineare il seguente modello idrogeologico concettuale per l'area di studio.

Dal punto di vista idrogeologico l'area di studio è caratterizzata dalla presenza di un acquifero freatico entro i depositi alluvionali e fluvioglaciali che caratterizzano il territorio del Comune di Limana. Lungo la verticale, l'acquifero libero ha come base il substrato Eocenico costituito dal Flysch di Belluno. Questi depositi grossolani sono differenziabili in due orizzonti, uno di origine glaciale e uno di origine fluvioglaciale, con conducibilità idraulica dello stesso ordine di grandezza ( $1.0E-05$  m/s). All'interno dell'acquifero deflusso delle acque sotterranee ha una direzione prevalente che va da monte verso valle, quindi con direzione sud-nord.

L'alimentazione dell'acquifero è legata principalmente all'infiltrazione derivante dalle precipitazioni con valori medi di circa 1577 mm/anno, calcolati per il periodo dal 1994 al 2022 dalle stazioni meteo utilizzate per il bilancio. I corsi d'acqua che circoscrivono l'area di studio non sembrano incidere in maniera apprezzabile sull'alimentazione dell'acquifero, ma il Fiume Piave probabilmente ne costituisce il recapito finale. Per quanto riguarda le sorgenti Sampoi, invece, il rapporto con l'acquifero freatico è incerto e sarà uno degli obiettivi delle simulazioni numeriche nel seguito descritte.

Per quanto riguarda la contaminazione, sono stati riscontrati solo due casi di superamento delle CSC nei piezometri S9 ed S11 per i contaminanti Tetracloroetilene ed il 1,1,2-tricloroetano. In entrambi i casi, il valore di concentrazione supera il limite di legge (D.Lgs.152/06) di massimo un ordine di grandezza. Per le Sorgenti Sampoi invece, è risultato che dal 2013 al 2015 non sono stati superati i valori delle CSC per le sostanze analizzate con l'eccezione del Triclorometano che tra gennaio 2013 ed agosto 2013 raggiunge il valore di  $0.31 \mu\text{g/l}$ , ovvero circa il doppio del valore consentito dalla legge.

## **5 Metodi**

### **5.1 Approccio metodologico ed obiettivi delle simulazioni**

Dopo aver delineato il modello idrogeologico concettuale dell'area di studio, è necessario selezionare il software più adatto per eseguire la simulazione desiderata. Questa scelta è uno step fondamentale per passare dal modello concettuale a quello numerico. Per la simulazione del flusso delle acque sotterranee è stato scelto il codice MODFLOW-2005 (Harbaugh, 2005) sviluppato dall'United States Geological Survey (USGS), che, tramite un'approssimazione alle differenze finite, risolve l'equazione di flusso in condizioni stazionarie e/o transitorie per un fluido monofase a densità costante in un mezzo continuo, poroso e completamente saturo.

L'equazione di flusso delle acque sotterranee è un'equazione differenziale alle derivate parziali che deriva dall'equazione di continuità (o Principio di Conservazione di Massa) all'interno di un volume elementare (REV) e dalla legge di Darcy (valida quindi solo in assenza di flussi turbolenti). Per un acquifero allo stato stazionario è formulata come segue:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( -K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( -K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( -K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + W = 0$$

dove  $K_x$ ,  $K_y$  e  $K_z$  sono le componenti principali del tensore della conducibilità idraulica lungo gli assi  $x$ ,  $y$  e  $z$  di un sistema di riferimento cartesiano;  $H$  è il carico idraulico e  $W$  è il termine che rappresenta i flussi per unità di volume in entrata ( $W > 0$ ) e/o in uscita ( $W < 0$ ) dal sistema acquifero.

Se il mezzo è omogeneo ed isotropo la conducibilità idraulica ( $K$ ) diventa costante indipendentemente dalla posizione nello spazio e quindi l'equazione diventa (Equazione di Laplace):

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0$$

La soluzione dell'equazione di flusso delle acque sotterranee richiede la definizione di condizioni al contorno che vincolano il problema e rendono unico il risultato.

L'equazione, nel caso di MODFLOW, viene poi risolta numericamente attraverso l'approssimazione alle differenze finite. Tale metodo prevede la sostituzione delle derivate parziali con delle differenze misurabili (finite) e la risoluzione dell'equazione in punti specifici dello spazio identificati attraverso delle celle di una griglia di discretizzazione. Questo permette di calcolare il carico idraulico solo su un numero predeterminato di punti entro il dominio di modellazione.

L'obiettivo di questo studio è quello di individuare e verificare i contributi di alimentazione delle sorgenti Sampo, riproducendone il comportamento all'interno di uno spazio tridimensionale con geometria, caratteristiche idrauliche e condizioni al contorno ben definite.

Per il raggiungimento di tale scopo è stata implementata una simulazione di calibrazione che riproduce allo stato stazionario le condizioni medie del periodo 2013-2014. A partire dai risultati della simulazione di calibrazione, tramite il codice numerico MODPATH (USGS), è stata realizzata una simulazione di trasporto advettivo per tracciare il percorso delle particelle d'acqua all'interno dei depositi quaternari e verificare l'ipotesi di contaminazione delle sorgenti attraverso essi.

Entrambe le simulazioni sono state implementate attraverso ModelMuse 5.3.0.0, interfaccia grafica libera sviluppata dall'USGS.

## **5.2 Dominio di modellazione e discretizzazione geometrica**

Una volta definito il modello idrogeologico concettuale e selezionato il codice numerico più appropriato per la realizzazione delle simulazioni, è fondamentale procedere alla progettazione e alla discretizzazione dello spazio in cui verrà simulato il comportamento del sistema acquifero, noto come dominio di modellazione. In un modello numerico l'area individuata con il modello idrogeologico concettuale è sostituita da un dominio discretizzato attraverso una griglia di nodi a cui, alle differenze finite, sono associate delle celle. Il codice MODFLOW-2005 impiega celle di tipo block-centered, in cui il nodo è posizionato al centro della cella stessa e la cui forma è parallelepipedica o cubica (griglia strutturata). Sul piano orizzontale, è stata

utilizzata una spaziatura tra i nodi con un passo costante di 20 m sia lungo l'asse x e sia lungo l'asse y.

Il dominio di modellazione è un poligono di forma pseudo rettangolare con area di 9.7 km<sup>2</sup> ed asse maggiore orientato da nord verso est. Il poligono è delimitato su tre lati dai principali corsi d'acqua che la circondano (Fiume Piave a nord, Torrente Cicogna a est, Torrente Refos a ovest), i quali agiscono anche come barriere di flusso naturale, ovvero ostacoli fisici che limitano o deviano il movimento delle acque, influenzando così la distribuzione e la direzione del flusso idrico nel dominio. Sul lato rivolto verso le Prealpi Bellunesi (a sud), il dominio segue il limite di affioramento dei depositi quaternari e l'inizio della formazione del Flysch di Belluno. Questo riflette la transizione tra materiali caratterizzati da un diverso comportamento idrodinamico: acquifero per i depositi inconsolidati, acquitardo per le rocce flyschoidi.

La discretizzazione verticale ha previsto la suddivisione in diversi strati, o layers, e la conseguente definizione delle superfici che delimitano ciascuno di essi sia inferiormente (bottom) che superiormente (top). Il dominio è delimitato superiormente dalla superficie topografica (top), rappresentata dal Digital Elevation Model (DEM) della Regione Veneto con passo di 5 x 5 m (*Figura 41*), e dalla superficie che segna il passaggio tra i depositi quaternari ed il Flysch di Belluno (bottom). Tale volume è stato suddiviso in due strati di spessore variabile e compreso tra un massimo di 20 m ed un minimo di 5 m circa. Il primo layer rappresenta l'orizzonte più superficiale composto da ghiaie con sabbie limose ed argillose, mentre il secondo layer rappresenta l'orizzonte sottostante composto da limi sabbiosi con ghiaie.

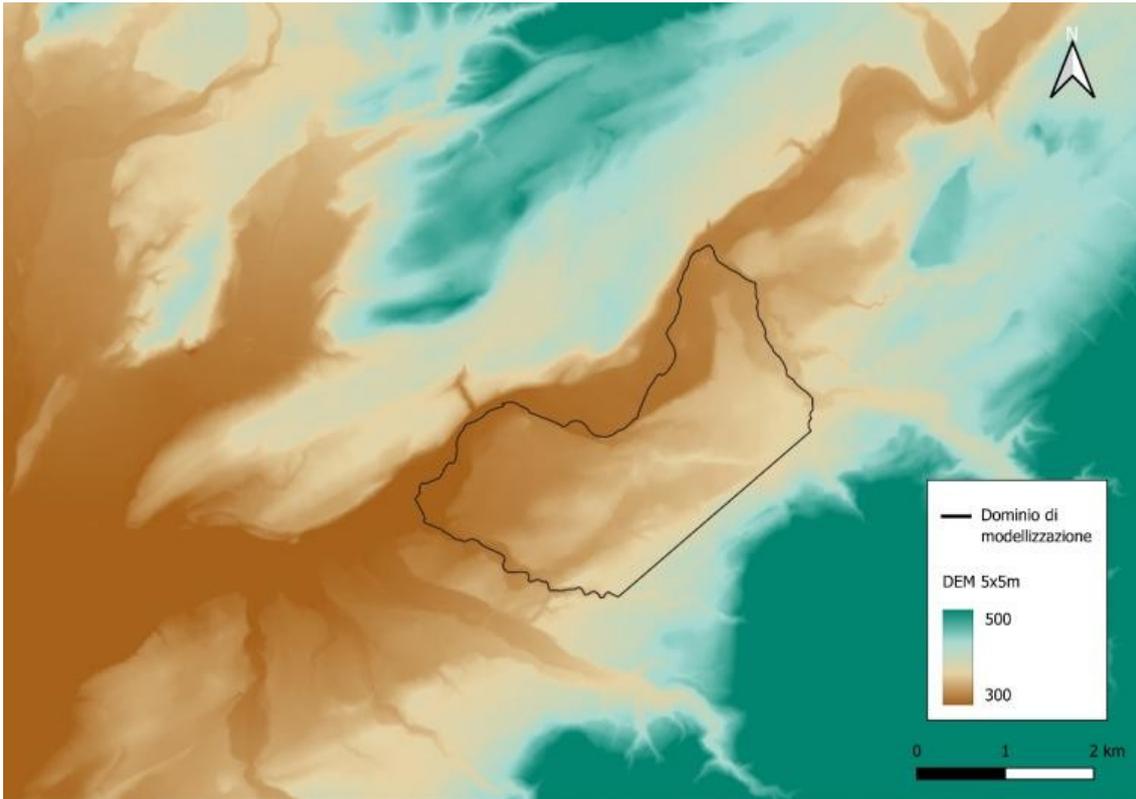


Figura 41 - Porzione del DEM della Regione Veneto con passo 5 x 5 m, utilizzato per la ricostruzione del top del dominio di modellazione.

Di seguito è presentata la discretizzazione verticale lungo la riga 68 della griglia di discretizzazione (Figura 42) e lungo la colonna 161 (Figura 43). Sono state selezionate queste due sezioni in quanto attraversano l'area delle sorgenti Sampoï, rilevante per il presente studio.

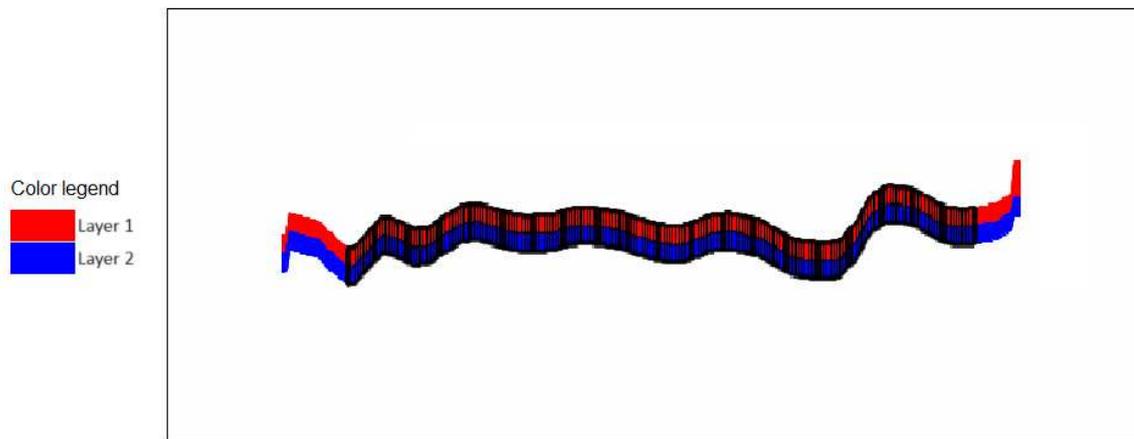


Figura 42 - Discretizzazione verticale lungo la riga 68; la sezione è presentata con fattore di esagerazione verticale pari a 10.

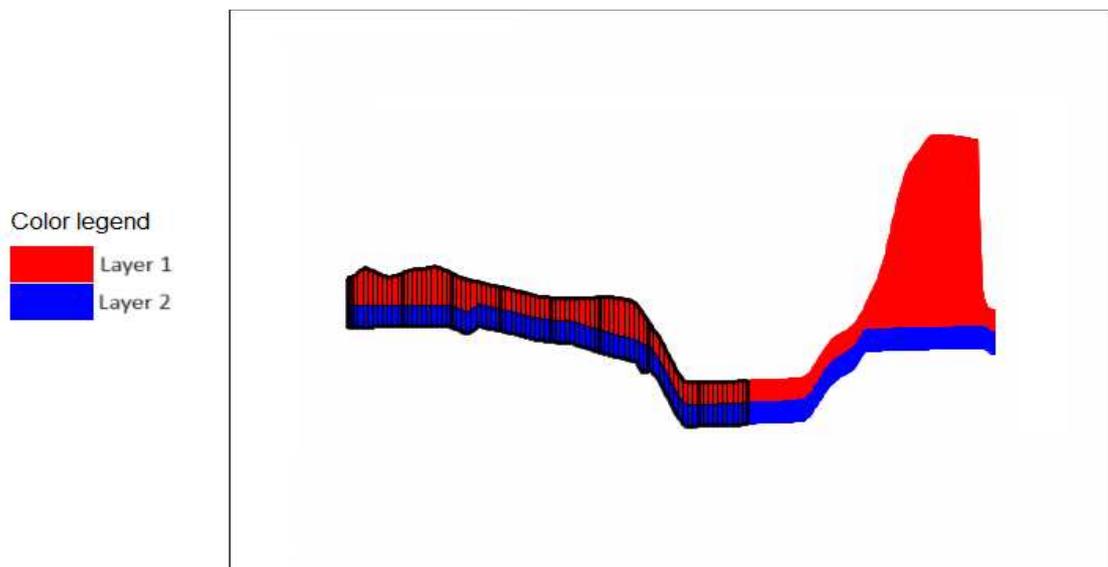


Figura 43 - Discretizzazione verticale lungo la colonna 161; la sezione è presentata con fattore di esagerazione verticale pari a 10.

Invece a seguire, è visualizzato l'andamento delle superfici interpolate, rispettivamente di model top (Figura 44) e di bottom dei layer 1 e 2 (Figura 45 e Figura 46).

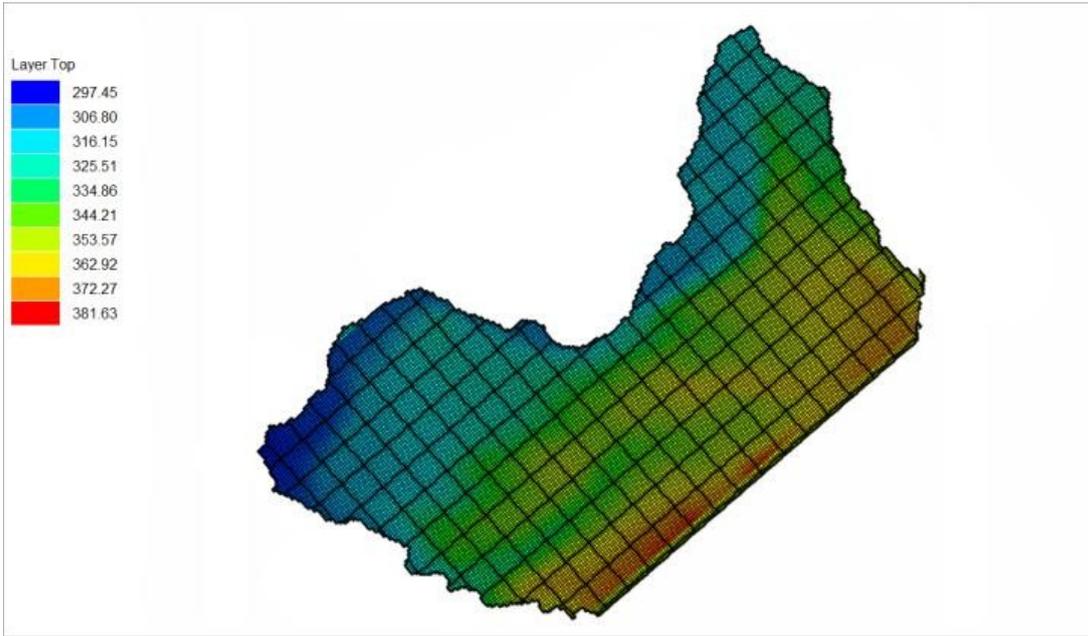


Figura 44 – Visualizzazione in metri sul livello del mare del top del layer 1 interpolato con l'utilizzo di ModelMuse.

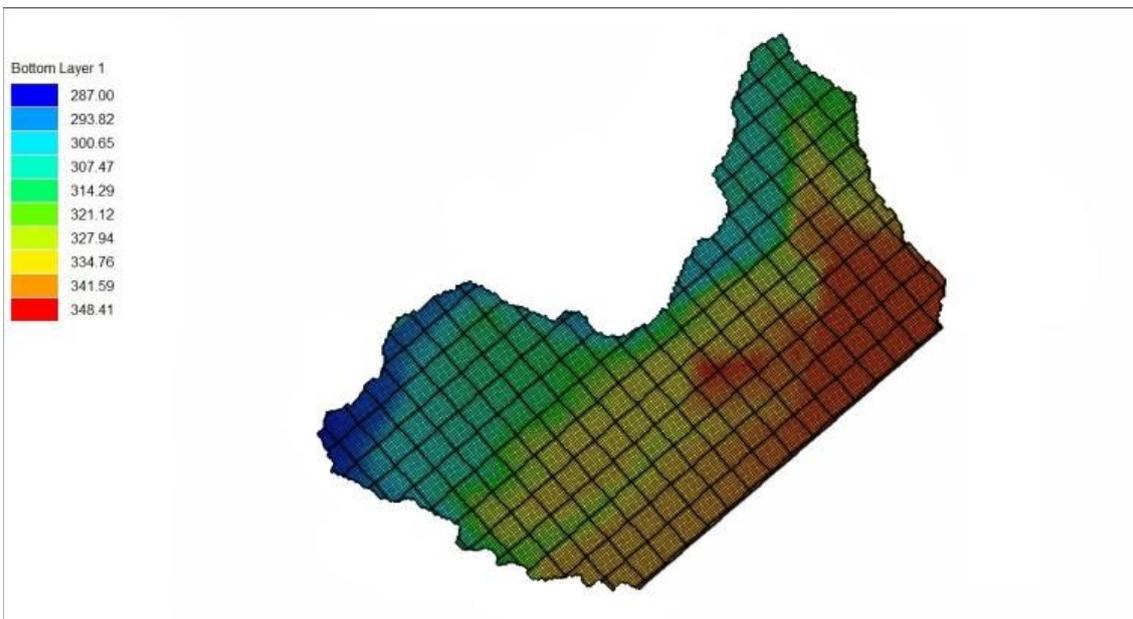


Figura 45 - Visualizzazione in metri sul livello del mare bottom del layer 1 interpolato con l'utilizzo di ModelMuse.

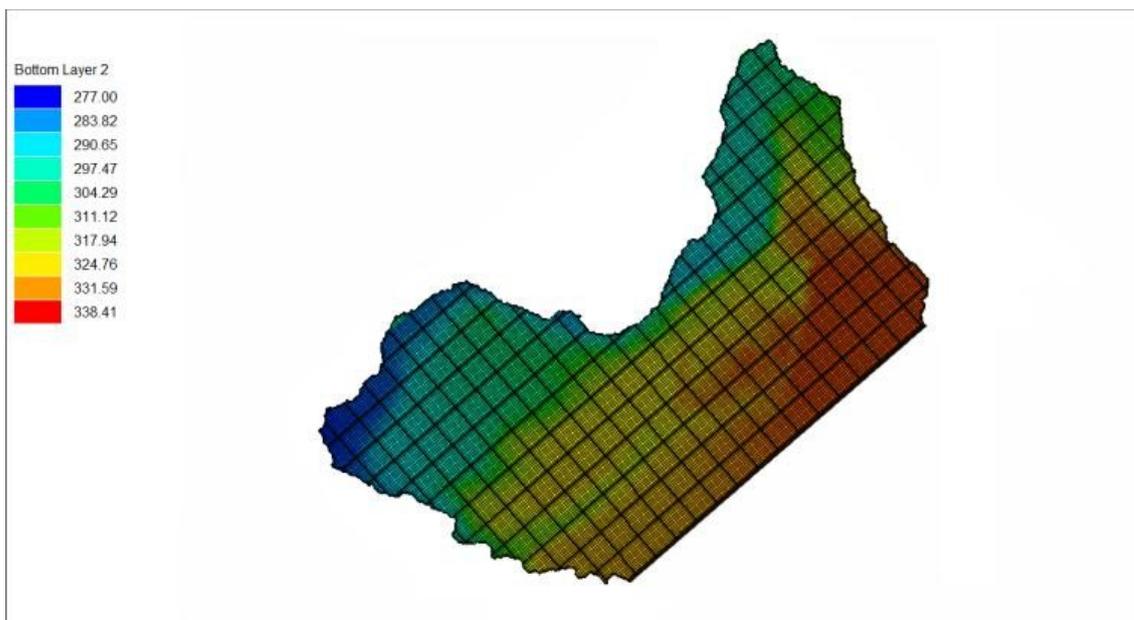
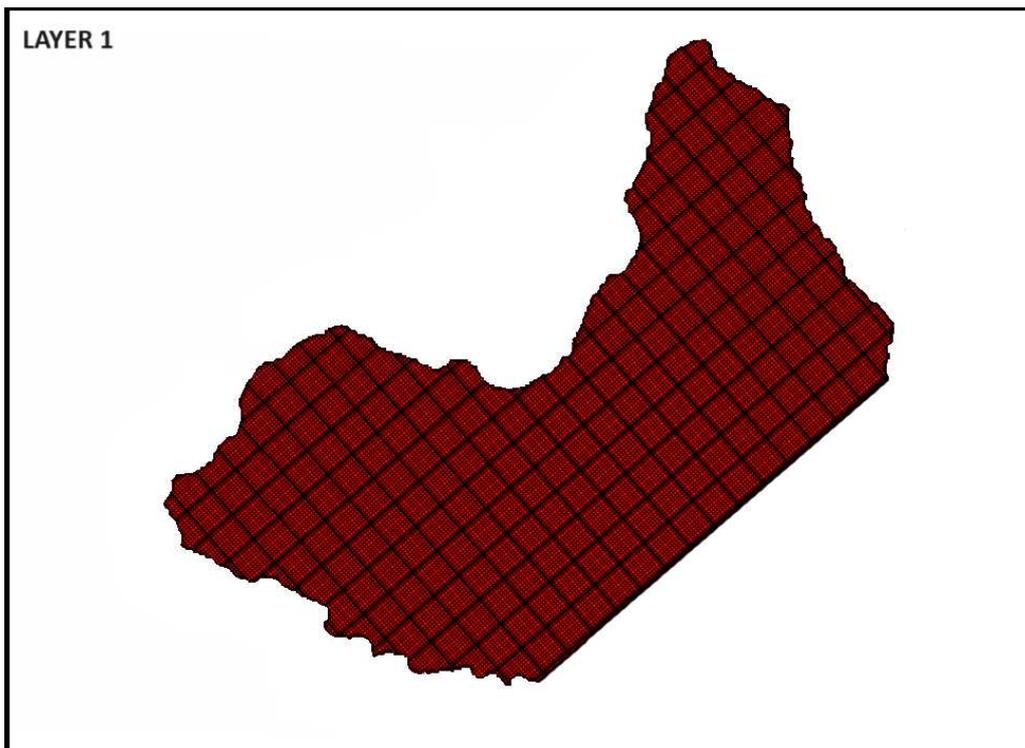


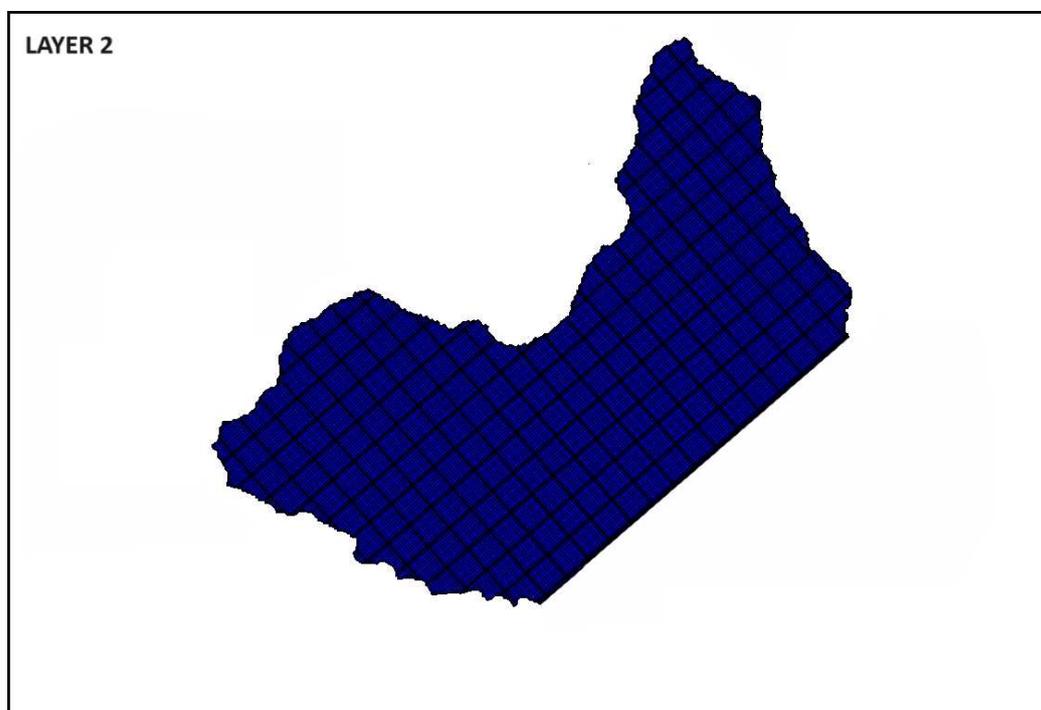
Figura 46 - Visualizzazione in metri sul livello del mare bottom del layer 2 interpolato con l'utilizzo di ModelMuse.

### 5.3 Parametrizzazione delle unità idrogeologiche

Nelle simulazioni in condizioni stazionarie, le sole variabili di input richieste dal modello sono le componenti principali del tensore della conducibilità idraulica ( $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$ ). In ModelMuse e quindi MODFLOW-2005 questa operazione è effettuata immettendo il valore della conducibilità idraulica orizzontale ( $K_x$ ) e definendo i rapporti di anisotropia sul piano orizzontale ( $K_x/K_y$ ) e verticale ( $K_x/K_z$ ). In questo lavoro si è deciso di associare ad ogni layer del modello un tensore della permeabilità isotropo ( $K_x = K_y = K_z$ ), e di rappresentare le anisotropie verticali utilizzando valori di  $K_x$  variabili per i due strati discretizzati. In particolare, al layer 1 è stato associato preliminarmente un valore di  $K_x$  pari  $8.90E-05$  a m/s (Figura 47), mentre nel layer 2 è stato utilizzato un valore di  $7.85E-05$  m/s (Figura 48). Questi valori sono stati ottenuti dall'analisi delle prove Lefranc realizzate durante i sondaggi e successivamente ottimizzati a seguito di un processo di calibrazione (Par. 5.6).



*Figura 47 - Distribuzione della conducibilità idraulica orizzontale ( $K_x$ ) nel layer 1.*



*Figura 48 - Distribuzione di conducibilità idraulica orizzontale ( $K_x$ ) nel layer 2.*

## 5.4 Condizioni al contorno e distribuzione iniziale di carico idraulico

Le boundaries, interne e perimetrali, delle simulazioni allo stato stazionario sono invarianti nel tempo, così come i valori delle proprietà dei materiali. È quindi importante prestare particolare attenzione nell'assegnazione delle condizioni al contorno, poiché una soluzione in stato stazionario è fortemente influenzata dai limiti imposti sui limiti del dominio. Questo perché non vi è il contributo fornito dall'immagazzinamento come nelle simulazioni in transitorio; quindi, i flussi sono immessi e/o estratti dalle condizioni interne e perimetrali, che a loro volta possono essere di tipo puntuale o distribuite arealmente (*Anderson et al., 2015*). Pertanto, la scelta delle condizioni al contorno è cruciale nella implementazione di un modello, poiché vincolano il problema e rendono unica la soluzione.

Matematicamente esistono tre tipi di condizioni al contorno:

- *primo tipo o di carico idraulico assegnato (o condizione di Dirichlet)*, dove il carico relativo ad una cella o ad un gruppo di celle è impostato ad un valore noto e fisso. La condizione di carico assegnato è adoperabile quando corpi idrici, quali fiumi, laghi, canali, riserve o dreni, che presentano un potenziale idraulico noto, interagiscono con l'acquifero direttamente. In alcuni casi questa condizione può risultare irrealistica.
- *Secondo tipo o di flusso assegnato (o condizione di Neumann)*, dove è specificata la derivata del carico idraulico ai limiti del dominio o in una determinata direzione (flusso). Il flusso è calcolato dalla legge di Darcy. Una particolare formulazione della condizione di Neumann consiste nel porre il flusso pari a zero, creando di fatto quello che viene definito un limite impermeabile.
- *Terzo tipo o flusso dipendente dal carico (o condizione di Cauchy)*, con la quale il flusso in entrata o in uscita dal sistema viene calcolato in funzione della differenza di carico tra la cella a cui è associata questa condizione e una cella ad essa adiacente, mediante la seguente equazione:

$$Q = CA (H_{bou} - H_{ijk})$$

in cui  $Q$  è il flusso per unità di superficie,  $H_{bou}$  è il carico idraulico associato alla boundary,  $H_{ijk}$  è il carico calcolato dal modello in una generica cella adiacente alla boundary,  $A$  è l'area della cella attraverso cui la filtrazione, mentre  $C$  è la conduttanza tra due celle espressa dall'equazione:

$$C = \frac{K_i}{b}$$

dove  $K_i$  è la conducibilità idraulica in una direzione generica ortogonale all'interfaccia tra la boundary e la cella adiacente, mentre  $b$  è lo spessore dell'interfaccia.

Le simulazioni allo stato stazionario richiedono come minimo una cella/nodo con una condizione di carico idraulico specificato, in modo da fornire al modello un livello di riferimento per il calcolo del carico idraulico.

MODFLOW-2005 è un codice modulare costituito da diversi pacchetti (packages) che permettono di attivare determinate condizioni al contorno (boundaries); ognuno di questi pacchetti simula uno specifico tipo di stress che viene applicato al sistema. I pacchetti utilizzati nel modello in oggetto sono i seguenti:

- Recharge (RCH), è un pacchetto utilizzato per simulare un flusso specificato distribuito sulla parte superiore del dominio (condizione al contorno di secondo tipo), definito in unità di lunghezza/tempo. In MODFLOW, i flussi vengono poi moltiplicati per l'area orizzontale delle celle a cui sono applicati, per calcolare i tassi di flusso volumetrico (*Harbaugh et al., 2000*). L'unico parametro di input necessario per la sua implementazione è il valore di recharge rate (mm/anno) da applicare ad ogni cella.

Tramite questo pacchetto si è simulata l'infiltrazione derivante dalla precipitazione a cui è stato assegnato un valore variabile per le diverse zone dell'area studio, derivante dal bilancio idrico del suolo esposto nel paragrafo 4.3. La boundary recharge è stata applicata su tutte le celle del layer 1.

- Drain (DRN), questo pacchetto viene utilizzato per simulare l'effetto di un dreno (condizione al contorno di terzo tipo). Il dreno rimuove l'acqua

sotterranea finché il carico idraulico non supera l'altezza del dreno stesso. Quindi, se il carico idraulico scende al di sotto dell'elevazione del dreno, esso non ha alcun effetto. La portata drenata è proporzionale alla differenza tra il carico idraulico calcolato nelle celle adiacenti alla boundary e l'elevazione del dreno (*Anderson et al., 2015*). La costante di proporzionalità è espressa dalla conduttanza del materiale di riempimento del layer a cui è associato il dreno.

Il flusso in uscita ( $Q_{out}$ ) dalla condizione DRN è calcolato attraverso la seguente formula:

$$Q = C \cdot (h_e - H)$$

dove  $Q$  è la portata drenata,  $h_e$  è l'elevazione del dreno,  $H$  il carico idraulico nelle celle circostanti e  $C$  la conduttanza data da:

$$C = \frac{K_z}{M} \cdot L \cdot W$$

con  $K_z$  ed  $M$  rispettivamente conducibilità idraulica verticale e spessore del materiale di riempimento del dreno (backfill material),  $L$  e  $W$  sono lunghezza e larghezza del dreno. Il pacchetto DRN è attivo solo se  $(h_e - h) < 0$ .

Nell'ambito di questo modello la condizione Drain è stata usata sulla rottura del pendio a valle dell'abitato di Limana per simulare il flusso sotterraneo in uscita dai depositi inconsolidati di fondovalle e nel caso del dreno centrale (DRN\_2) è stato posto in corrispondenza delle sorgenti Sampo (Figura 49), per simularne il deflusso.

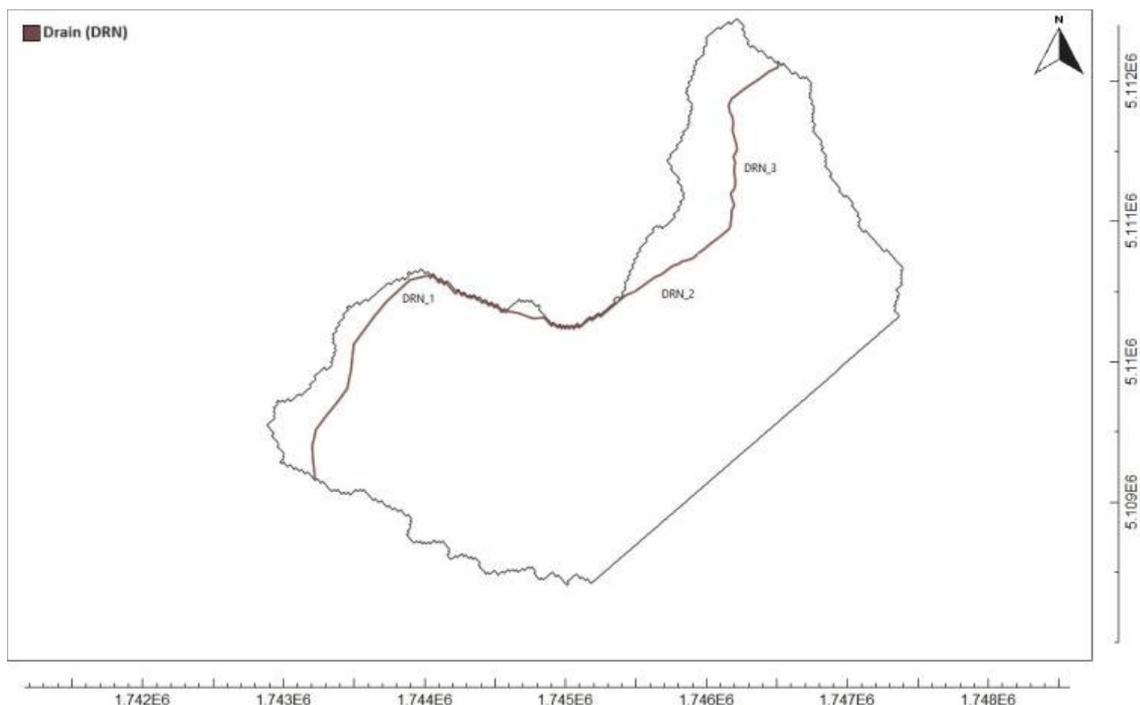


Figura 49 - Ubicazione della condizione al contorno di tipo Drain (DRN) applicata al dominio di modellazione, le coordinate sono nel sistema di riferimento Gauss-Boaga, fuso Ovest.

- River (RIV), questo pacchetto viene utilizzato per simulare l'interazione acqua superficiale/acqua sotterranea attraverso uno strato di infiltrazione che separa il corpo idrico superficiale dal sistema idrico sotterraneo (condizione di Tipo 3; *Anderson et al., 2015*). I fiumi interagiscono con l'acquifero drenando o alimentando il sistema, in funzione della differenza tra il livello idrometrico del fiume ed il carico idraulico nell'acquifero. Il flusso in entrata ( $QRiv > 0$ ) o in uscita ( $QRiv < 0$ ) dal sistema ad opera della condizione river è determinato tramite la seguente relazione:

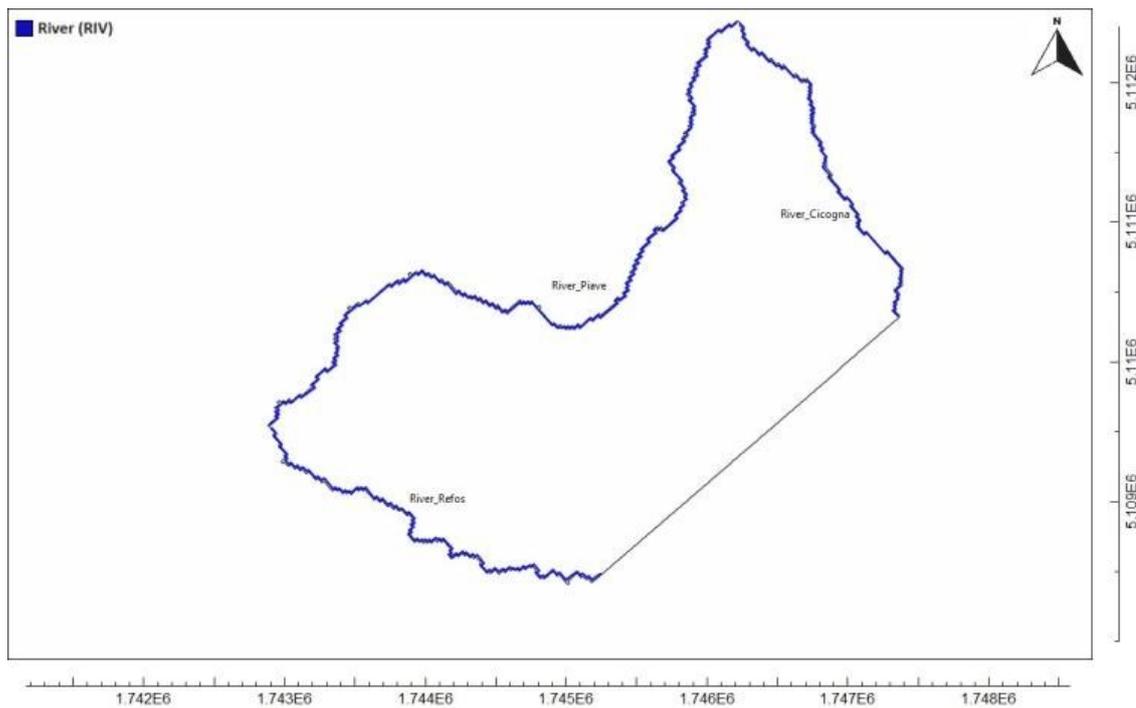
$$Q = C \cdot (h_s \cdot H)$$

dove  $Q$  è la portata alimentata o drenata,  $h_s$  è il livello idrometrico del fiume,  $H$  è il carico idraulico nelle celle circostanti e  $C$  è la conduttanza data da:

$$C = \frac{K_z}{M} \cdot L \cdot W$$

Con  $K_z$  ed  $M$  rispettivamente conducibilità idraulica verticale e spessore dello strato di subalveo che separa le acque superficiali da quelle sotterranee,  $L$  e  $W$  lunghezza e larghezza del corso d'acqua.

Per la corretta implementazione della boundary è necessario immettere, oltre al valore del livello idrometrico (river stage), anche la quota del letto del fiume (river bottom), oltre che il valore di conduttanza. Con questo pacchetto sono stati implementati i principali corsi d'acqua che bordano il dominio di modellazione (Piave, Cicogna e Refos) tutti applicati al primo layer della griglia di discretizzazione (*Figura 50*). Per il Torrente Cicogna ed il Torrente Refos i valori del river stage sono stati fatti coincidere con il model top, che a sua volta corrisponde al DEM dell'area studio. Il valore di conduttanza assegnato è pari a  $8.64 \text{ m}^2/\text{giorno}$ .



*Figura 50 - Ubicazione della condizione al contorno di tipo River (RIV) applicata al dominio di modellazione, le coordinate sono nel sistema di riferimento Gauss-Boaga, fuso Ovest.*

L'assegnazione delle condizioni iniziali, necessarie per la risoluzione di problemi in regime stazionario, consiste nella definizione della distribuzione iniziale di carico idraulico all'interno del dominio di modellazione. Nelle simulazioni allo stato transitorio si tratta di una fase molto delicata dell'implementazione poiché l'impiego di una distribuzione di carico idraulico iniziale non congrua con le condizioni al contorno può condizionare il risultato della simulazione. Nel presente caso di studio, è stata realizzata una simulazione in stato stazionario, per cui, grazie all'impiego di adeguati criteri di convergenza, durante il processo iterativo il carico idraulico si è progressivamente adattato alle condizioni al contorno. Questo ha permesso di raggiungere la convergenza anche partendo da un valore fisso sull'intera area di studio, inizialmente ipotizzato pari a 450 m.s.l.m.

## **5.5 Discretizzazione temporale e metodi risolutivi**

Le simulazioni con il codice MODFLOW-2005 possono essere sia allo stato stazionario che allo stato transitorio. In un modello di flusso allo stato stazionario, le condizioni al contorno non variano durante la simulazione e quindi si produce un'unica distribuzione di carico idraulico. Nelle simulazioni allo stato transitorio viene introdotta la variabile tempo ed il tempo viene discretizzato in:

- unità di tempo, ovvero l'unità di misura del tempo utilizzata nella simulazione che è variabile (ad es. secondi, minuti, ore, giorni, mesi e anni);
- stress periods (SP), ovvero periodi in cui gli stress applicati al sistema si mantengono costanti;
- time steps (TS), ovvero la suddivisione degli stress periods in sottomultipli di ampiezza variabile (o in alcuni casi costante).

Essendo una simulazione allo stato stazionario, è stato utilizzato un singolo passo temporale (time step) all'interno di un unico periodo di stress (stress period), in entrambi i casi della durata di un anno (365 giorni). Il modello è stato quindi configurato per calcolare il flusso delle acque sotterranee su una scala temporale annuale.

## 5.6 Strategia di calibrazione, punti di controllo ed analisi degli indicatori statistici

La calibrazione è il processo di risoluzione di un problema inverso, in cui si cerca un insieme di parametri, condizioni al contorno e stress che permettano al modello implementato di riprodurre in modo sufficientemente realistico le misure sperimentali di carico idraulico e/o flusso, che costituiscono il dataset di calibrazione. La calibrazione allo stato stazionario viene eseguita principalmente per ottimizzare i valori di conducibilità idraulica e la loro distribuzione all'interno del dominio di modellazione ( $K_x$ ,  $K_y$  e  $K_z$ ). Lo scopo della calibrazione è quindi quello di trovare il dataset di parametri e di condizioni al contorno che approssimino nel modo migliore possibile i dati di campo che si hanno a disposizione. Di norma però si ha a disposizione un insieme di osservazioni imperfette, come valori di carico idraulico e velocità di flusso, che offrono una visione parziale delle condizioni reali di un sito. Queste osservazioni variano in termini di precisione e accuratezza. Quindi vengono selezionate alcune di esse, relative a condizioni o periodi simili, come target di calibrazione, confrontando poi questi target con i valori simulati per valutare l'adattamento del modello (*Anderson et al., 2015*).

La calibrazione di un modello numerico può essere di due tipi: qualitativa e quantitativa (*Anderson & Woessner, 1992*). Nel primo caso consiste nel confronto tra l'andamento dei carichi simulati dal modello e quelli misurati durante i rilievi piezometrici, che vengono sovrapposti e confrontati per avere un'indicazione della corrispondenza tra modello e realtà. La calibrazione quantitativa si effettua confrontando direttamente i carichi misurati con quelli simulati in punti corrispondenti all'interno del dominio di modellazione (*Figura 51*). La calibrazione quantitativa utilizza l'analisi statistica dei residui e può essere eseguita in due modi: manuale (o trial & error), dove l'utente modifica i parametri di input ed eventualmente le condizioni al contorno fino a ottenere una riproduzione sufficientemente accurata del dataset di calibrazione, oppure automatica utilizzando specifici algoritmi numerici.

Per il nostro modello, è stata fatta una calibrazione quantitativa di tipo manuale, modificando singolarmente parametri e condizioni al contorno in grado di incidere in maniera significativa sulla soluzione finale.

Inizialmente si è agito sul valore di conduttanza della funzione dreno; in fase di implementazione era stato assegnato un valore iniziale pari a  $0.864 \text{ m}^2/\text{giorno}$  a tutti e tre i dreni presenti entro il dominio di modellazione. Dopodiché è stato aumentato a  $8.64 \text{ m}^2/\text{giorno}$  per il dreno numero 2 (DRN\_2, *Figura 49*), ovvero quello in corrispondenza delle Sorgenti Sampoi. Così facendo si è aumentato il flusso in uscita dalla boundary che ha portato ad un miglior fitting del sistema. Non si è agito sulla conduttanza dei due torrenti ad est ed a ovest del dominio, ma invece è stata tolta la boundary River che corrispondeva al Fiume Piave a nord dell'area studio. Questa scelta è stata fatta perché, dopo l'inserimento dei dreni a monte, il sistema non veniva in nessun modo influenzato dai cambiamenti di valore di questa condizione.

In seguito, si è agito sulla conducibilità idraulica (Kx). Come detto in precedenza, circa al centro dell'abitato di Limana, vi è un deposito di materiale glaciale che fa da spartiacque naturale. Il dominio di modellazione è stato quindi diviso in due poligoni, uno più piccolo coincidente con il deposito (definito dalla lettera A in *Figura 51*) ed uno più grande che circonda il primo poligono e ricopre il resto dell'area studio. Modificando quindi i valori di conducibilità all'interno del poligono A, è stato infine individuato un valore pari a  $0.1728 \text{ m}/\text{giorno}$  (equivalente a  $2.0\text{E}-06 \text{ m/s}$ ), quindi di un ordine di grandezza inferiore quello attribuito all'orizzonte più superficiale.

Infine, si è agito sulla ricarica (RCH) assegnata al primo layer. Modificando il suo valore si è potuto constatare che la ricarica zenitale è il parametro che maggiormente influisce sulla soluzione e per questo motivo si è proceduto, come per la conducibilità idraulica, alla sua differenziazione entro il dominio. Dopo numerosi tentativi, nelle celle corrispondenti al poligono A (*Figura 51*) il tasso di ricarica è stato incrementato di 1.7 volte. Questo ha permesso di abbassare notevolmente la differenza tra i carichi osservati e calcolati. Il resto del dominio non ha subito variazioni rispetto al valore originale di ricarica zenitale.

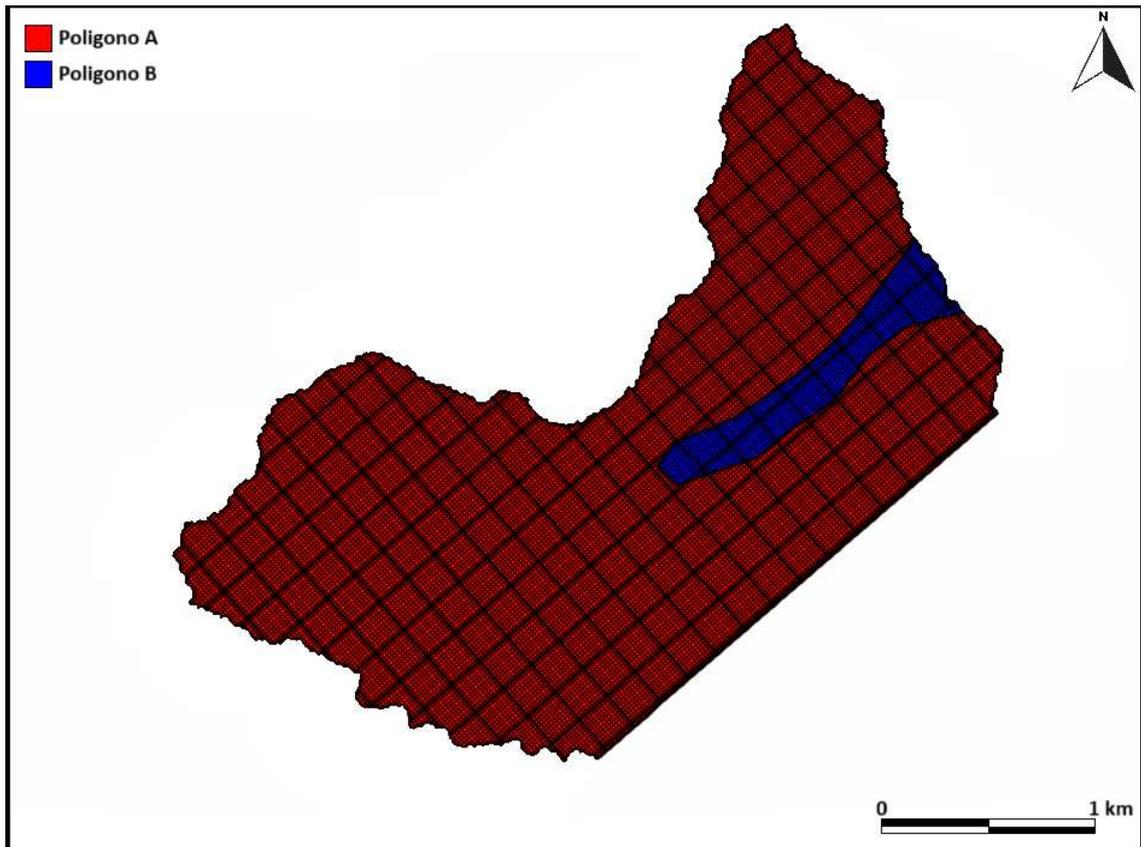


Figura 51 - Suddivisione del dominio in poligoni per l'ottimizzazione di  $Kx$  e  $RCH$ .

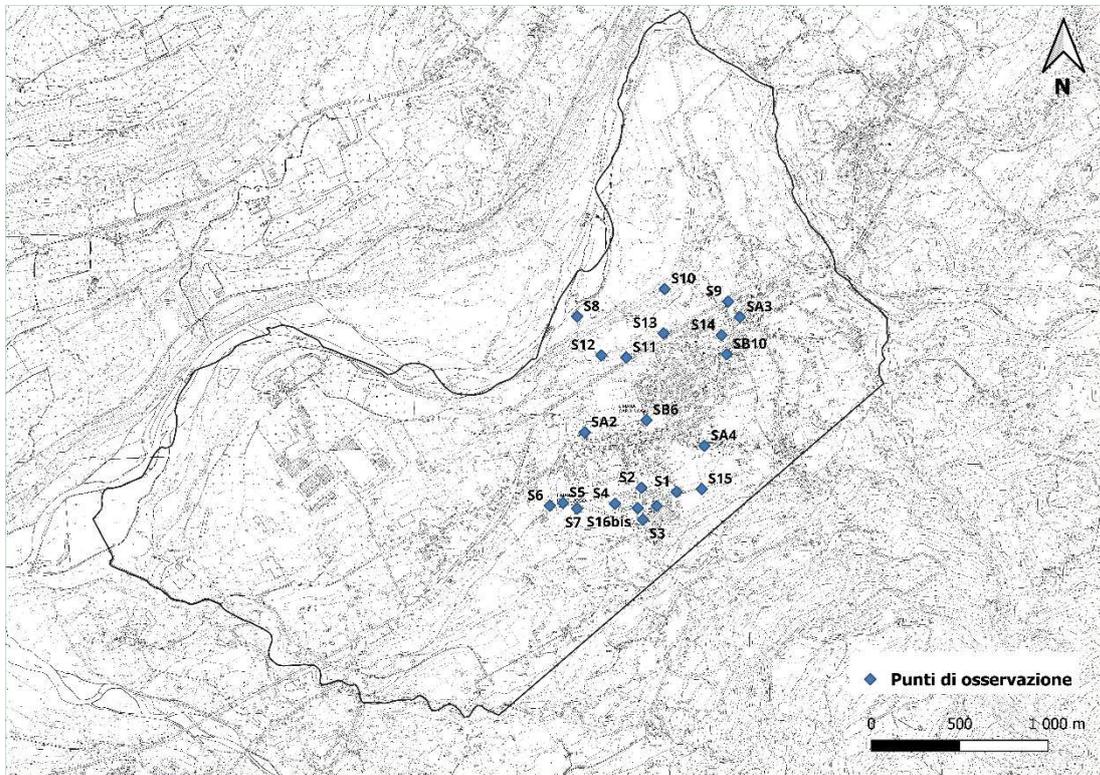
Per quantificare il grado di approssimazione della calibrazione invece, i valori di carico idraulico misurati nei target di calibrazione vengono confrontati con i corrispondenti valori simulati attraverso il calcolo del residuo ( $R_i$ ), per ciascun target secondo l'equazione:

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

dove:  $H_{cal}$  è il valore del carico idraulico calcolato e  $H_{obs}$  è invece il valore del carico idraulico osservato.

Gli observation points, ovvero i punti di osservazione del carico idraulico, che sono stati utilizzati sono in corrispondenza dei sondaggi adibiti successivamente a piezometri, a cui è stato assegnato il valore di carico idraulico medio per il periodo

2013-2014; la loro ubicazione è mostrata in *Figura 52*. Il valore del carico idraulico medio è stato attribuito alle celle del primo layer coincidenti all'ubicazione dei piezometri.



*Figura 52 - Punti di osservazione ricadenti nel dominio di modellazione.*

Il parametro statistico che sintetizza al meglio la qualità di una calibrazione di tipo quantitativo è lo scarto quadratico medio normalizzato (nRMS, in %). Questo viene calcolato dividendo lo scarto quadratico medio (RMS) per la differenza tra i valori massimi e minimi osservati, secondo le formule:

$$RSM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i^2}$$

$$nRSM = \frac{RSM}{H_{obs_{max}} - H_{obs_{min}}}$$

dove  $n$  è il numero dei punti di osservazione e  $Hobs_{max}$  e  $Hobs_{min}$  sono rispettivamente il massimo ed il minimo valore di carico idraulico misurato.

Tradizionalmente si considerano calibrati i modelli in cui nRMS scende sotto al 10% (Anderson & Woessner, 1992). Siccome i parametri stimati devono essere consistenti con la realtà fisica del sistema simulato, un valore di nRMS leggermente sopra il 10% può comunque essere considerato accettabile.

I risultati dei parametri statistici e dei residui ottenuti in fase di calibrazione sono mostrati in *Tabella 8*.

DATI DI CALIBRAZIONE	
RM (m)	0.24
RMS (m)	3.69
nRMS (%)	11.68
$R_i$ max (m)	9.88
$R_i$ min (m)	-4.71
n	19.00

*Tabella 8 - Parametri statistici e dati di calibrazione; RM (m), media dei residui; RMS (m), scarto quadratico medio; nRMS (%), scarto quadratico medio normalizzato;  $R_{i,max}$  (m), residuo massimo;  $R_{i,min}$  (m), residuo minimo; n punti, numero di punti usati per la calibrazione.*

In *Tabella 8* viene mostrato come l'obiettivo di uno scarto quadratico medio normalizzato inferiore al 10% non sia stato raggiunto. Ma nonostante questo la calibrazione può essere considerata comunque accettabile per i motivi precedentemente spiegati. Inoltre, la validità del modello è supportata dal confronto tra le portate uscenti dal sistema osservate e simulate, le quali risultano essere dello stesso ordine di grandezza (come riportato in *Tabella 9*). Questa corrispondenza tra i flussi osservati e simulati conferma l'adeguatezza del modello.

A conclusione del processo di calibrazione, è stato realizzato uno scatter plot (*Figura 53*), in cui viene mostrato il rapporto tra i carichi osservati (in ascissa) ed i carichi calcolati (in ordinata). Lo scatter plot mostra in modo sintetico la bontà della calibrazione. La calibrazione è tanto più buona quanto più i punti della dispersione

risultano distribuiti intorno alla linea centrale o retta di identità, che indica una corrispondenza uno-a-uno tra i valori simulati e quelli osservati (*Anderson et al., 2015*). Nel nostro caso si osserva che la differenza tra i valori osservati e quelli calcolati è più pronunciata per i valori di carico idraulico più elevati, mentre per i valori intermedi e bassi i dati mostrano un buon fitting.

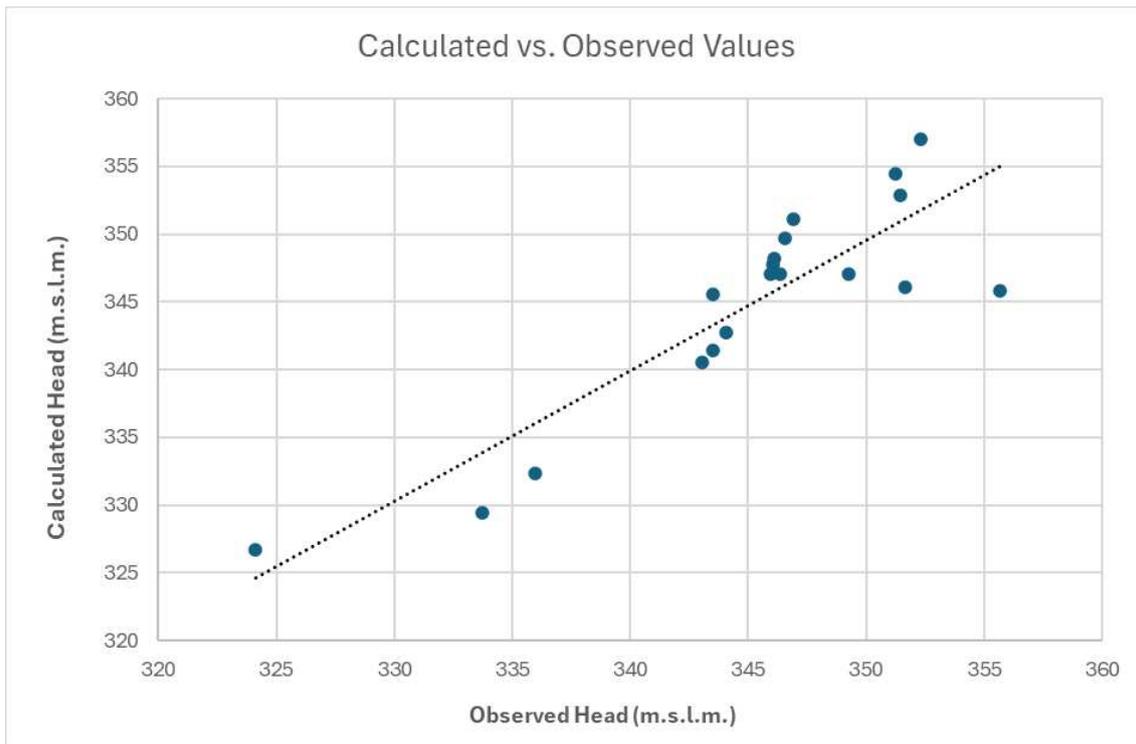


Figura 53 - Scatter Plot di calibrazione tra i dati osservati e calcolati di carico idraulico

## 5.7 Calcolo dei percorsi di migrazione delle particelle

Un altro aspetto fondamentale è comprendere i percorsi che le particelle di contaminante potrebbero aver seguito prima di raggiungere le Sorgenti Sampoi. Per fare questo, è stato utilizzato il codice MODPATH, un programma di post-processing implementato in ModelMuse e compatibile con le soluzioni di MODFLOW-2005. MODPATH permette di eseguire il particle-tracking, ovvero la visualizzazione delle linee che rappresentano le traiettorie di particelle fluide, sulla base della distribuzione

di carico idraulico ottenuta con MODFLOW-2005. Il calcolo viene effettuato utilizzando una semplice interpolazione lineare: per ogni cella del dominio di modellazione vengono plottate le componenti principali della velocità di flusso, risultanti in un singolo vettore velocità, che viene quindi utilizzato come via preferenziale di movimento delle particelle (*Pollock, 2016*). Viene descritta quindi la sola componente avvertiva del trasporto, secondo cui le particelle sono trasportate passivamente dal flusso di acqua sotterranea. Nel nostro caso, MODPATH è stato applicato per determinare l'origine del flusso che alimenta le Sorgenti Sampoia a partire dai risultati della simulazione di calibrazione allo stato stazionario.

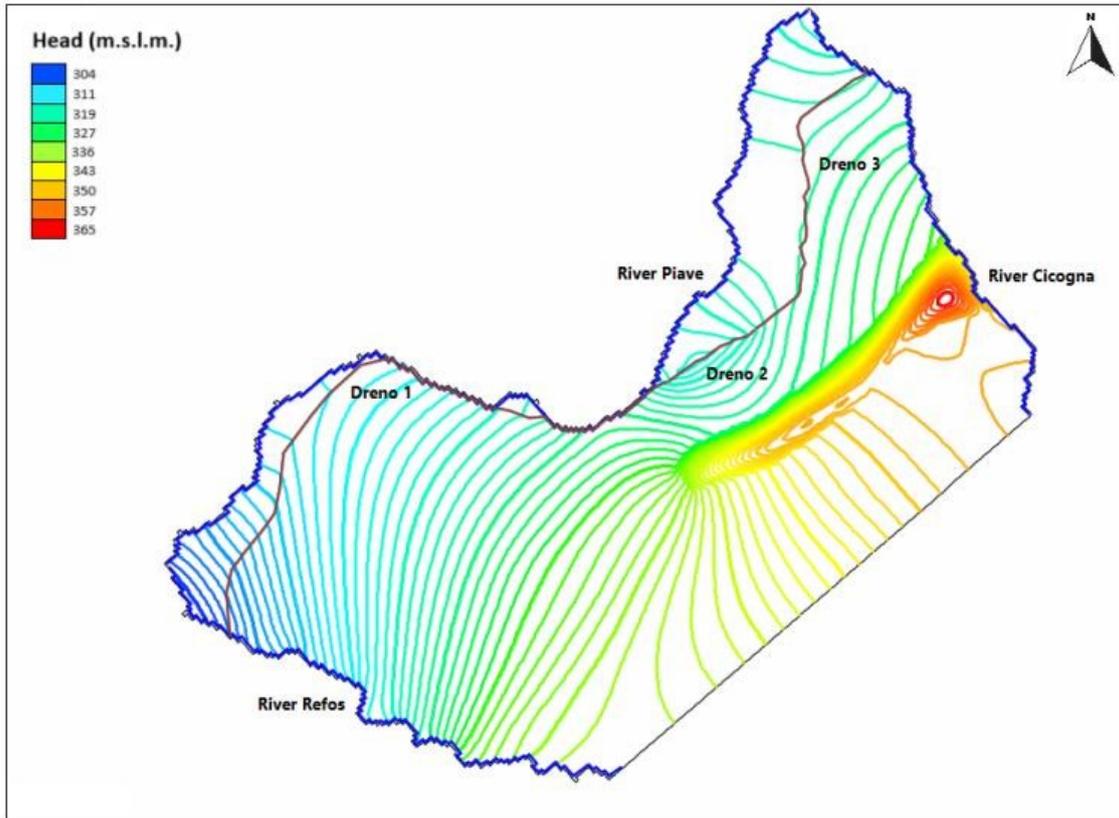
Il tracciamento delle particelle è stato di tipo backward (all'indietro) a partire dai punti di recapito ipotizzati. Il modello è stato utilizzato secondo due configurazioni specifiche, nella prima sono stati riprodotti 3 scenari differenti, utilizzando come punto d'origine le quattro sorgenti attualmente in uso ed in cui sono stati riscontrati nel 2001 i casi di contaminazione. La seconda configurazione prevede, come punti di origine per il tracciamento, tutti e sette i siti in cui sono presenti opere di prelievo delle acque sotterranee, sia quelle attualmente operative, sia quelle in disuso. Poiché non sono disponibili dati sito-specifici sulla porosità, è stato deciso di considerare valori di porosità efficace del 15%, 20% e 25%, poiché in linea con il contesto geologico dell'area di studio.

## **6 Risultati**

### **6.1 Risultati delle simulazioni di calibrazione**

Come già descritto nei paragrafi introduttivi alla modellazione, la simulazione ha avuto come obiettivi fondamentali: (i) la riproduzione dei valori di carico idraulico medio e (ii) la verifica del bilancio di massa dell'acquifero libero nei depositi quaternari.

La simulazione, dopo i processi di calibrazione, ha dato come risultato la distribuzione del carico idraulico medio nell'area studio mostrato rispettivamente nella *Figura 54* per il layer 1 e nella *Figura 54* per il layer 2.



*Figura 54 - Distribuzione del carico idraulico calcolata nel primo layer a seguito del processo di calibrazione.*

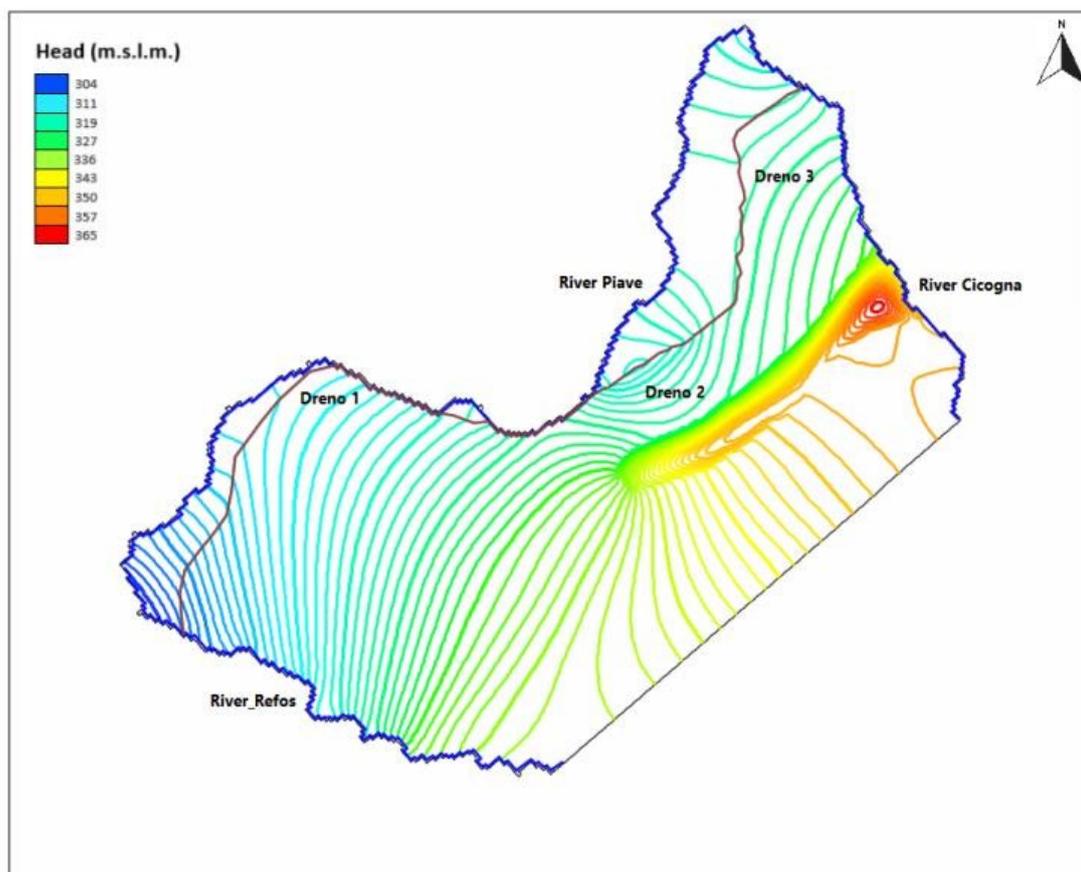


Figura 55 - Distribuzione del carico idraulico calcolata nel secondo layer a seguito del processo di calibrazione.

Poiché entrambi i layer presentano caratteristiche di conducibilità idraulica molto simili, la distribuzione del carico idraulico risulta essere analoga.

La distribuzione di carico idraulico per entrambi i layer riproduce in modo abbastanza fedele l'andamento della freatimetria media presentata nel paragrafo 4.1. Il carico idraulico massimo, pari a circa 365 m s.l.m., si osserva in corrispondenza dell'area caratterizzata da una minore conducibilità idraulica e da un maggiore apporto meteorico che contribuisce all'alimentazione del sistema (come mostrato in Figura 54). Con il processo di calibrazione si è riuscito quindi a simulare con buona approssimazione l'alto piezometrico nel centro dell'abitato di Limana ricostruito attraverso l'interpolazione dei dati puntuali. Da questa zona, il carico idraulico diminuisce progressivamente verso valle fino a raggiungere il minimo di 304 m.s.l.m. ad est del dominio di modellazione dove il Torrente Refos si immette nel

Fiume Piave. Osservando le distribuzioni di carico idraulico si evince come i dreni abbiano una particolare influenza sul sistema, provocando la diminuzione del carico idraulico in corrispondenza della rottura del pendio a valle dell'abitato di Limana e, nel caso del dreno 2 (DRN\_2, *Figura 49*), per simulare le opere di presa delle Sorgenti Sampoï.

Oltre ai risultati relativi alla distribuzione di carico idraulico, il codice genera anche il bilancio di massa del sistema idrogeologico (Flow Budget); quello relativo alla simulazione in esame è riportato in *Tabella 9*. La tabella è integrata con l'istogramma di *Figura 56*, il quale evidenzia come la principale fonte di alimentazione del sistema sia data dalla ricarica zenitale (85.28%), seguita dall'apporto dei fiumi (14.72%). Questa osservazione è coerente con le scelte effettuate in precedenza durante la calibrazione e conferma che l'acquifero freatico presente nei depositi di fondovalle è alimentato principalmente dalle acque meteoriche, mentre i corsi d'acqua che circondano le Sorgenti Sampoï hanno un'influenza marginale sulla circolazione idrica sotterranea.

Per quanto riguarda il flusso in uscita del bilancio di massa, il contributo maggiore è opera del drenaggio posto lungo la rottura di pendio e lungo le sorgenti (60.78%), mentre il contributo minore, pari al 39.22%, è attribuito ai fiumi, che localmente svolgono un'azione drenante anziché alimentante.

<b>BILANCIO DI MASSA</b>		
<b>CONTRIBUTI</b>	<b>FLOWIN [m<sup>3</sup>/giorno]</b>	<b>FLOWOUT [m<sup>3</sup>/giorno]</b>
DRAIN	0	8629.3604
RIVER	2090.9639	5567.0142
RECHARGE	12105.4102	0
TOTALE	14196.374	14196.375
IN - OUT	-9.77E-04	

*Tabella 9 - Bilancio di massa.*

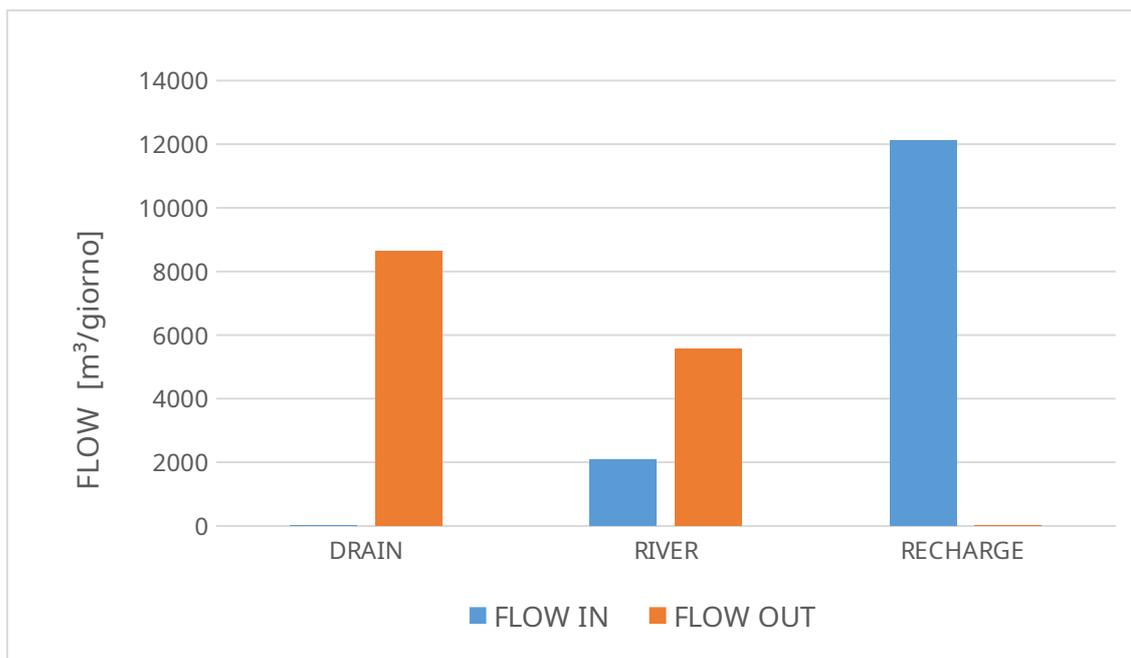


Figura 56 - Istogramma del Bilancio di massa.

Verificata la congruità del bilancio di massa, tramite un pacchetto di MODFLOW chiamato DROB (drain observation package), è stato anche possibile valutare come i singoli dreni agissero sul sistema e confrontare i valori di portata calcolati con quelli disponibili per le sorgenti Sampoio. Il pacchetto DROB, infatti, viene utilizzato per confrontare i flussi osservati con i flussi simulati calcolati dal DRN di MODFLOW (Harbaugh et al., 2000). Questi dati possono essere impiegati per valutare l'efficacia di un sistema di drenaggio in uno scenario specifico. In questo caso, invece, è stato utilizzato per estendere la calibrazione quantitativa ai flussi simulati, confrontando le portate disponibili alle Sorgenti Sampoio con quelle in uscita dal dreno 2 (Tabella 10).

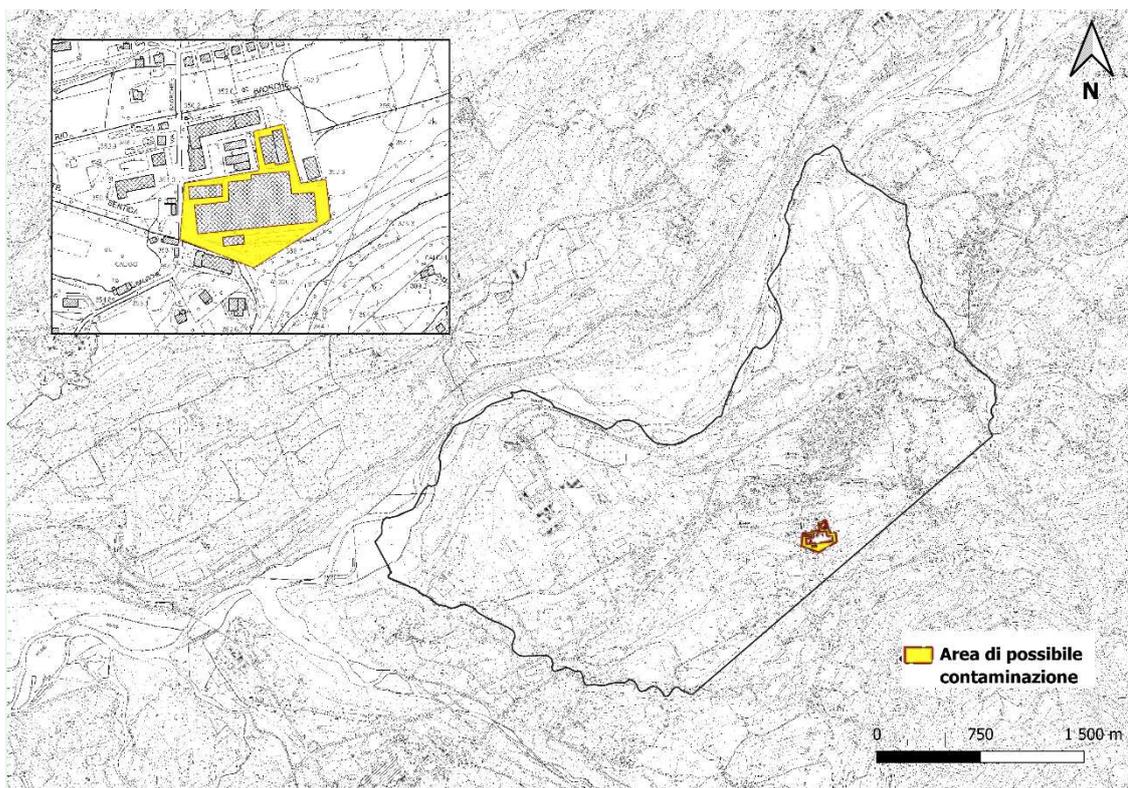
DRAIN FLOW OBSERVATIONS			
NAME	OBSERVED VALUE	SIMULATED VALUE	DIFFERENCE
Drain1	-10	-3815.139893	3805.139893
Drain2	-1983.744019	-3262.351318	1278.6073
Drain3	-10	-1551.868774	1541.868774
FLOW SUM OF SQUARED DIFFERENCE: 1.84913E+07			

Tabella 10 - Confronto tra i valori osservati e simulati del flusso in m³/giorno in riferimento al Bilancio di massa dei dreni.

Dal confronto tra i valori osservati e simulati per il drenaggio associato alle sorgenti Sampo, emerge che i risultati sono comparabili in termini di ordine di grandezza. Le portate simulate riproducono in modo soddisfacente le misurate realizzate in loco durante le campagne di rilevamento svolte da ARPAV nei diversi anni. In tal senso, è importante segnalare, infatti, che il dataset di misure disponibile non è sicuramente in grado di ricostruire il regime idrogeologico delle sorgenti, trattandosi di misura acquisite in maniera discontinua con cadenza annuale (*Tabella 1*).

## **6.2 Risultati delle simulazioni previsionali di trasporto advettivo**

Come indicato nel Paragrafo 5.7, relativo al calcolo dei percorsi di migrazione delle particelle, un ulteriore obiettivo della simulazione era determinare se le particelle di contaminante rilevate alle Sorgenti Sampo potessero essere ricondotte a una contaminazione originaria situata nella zona a sud-ovest, nei pressi di una ditta che si occupa della produzione di componenti di scambio termico per la refrigerazione commerciale ed industriale (*Figura 57*). Per raggiungere questo obiettivo, è stato necessario utilizzare il codice MODPATH. Questo strumento, attraverso una ricostruzione in modalità backward, permette di stimare i percorsi di flusso e, considerando esclusivamente il flusso advettivo, di simulare il movimento delle particelle all'interno dell'acquifero.



*Figura 57 – Possibile zona di contaminazione primaria*

Le simulazioni realizzate prevedono due configurazioni: nella prima sono stati realizzati tre scenari partendo dalle quattro sorgenti attive, dove nel 2001 si sono verificati i primi casi di contaminazione; nella seconda sono stati considerati tutti e sette i siti di prelievo, sia operativi che in disuso. Non avendo dati sito-specifici di porosità si è scelto di valutare 3 valori di porosità efficace: del 15%, 20% ed infine 25%, in accordo con il contesto idrogeologico dell'area studio. Tramite il metodo del tracciamento inverso (backward tracking), si sono ricostruiti i percorsi di migrazione del contaminante, partendo da 8 particelle disposte a cilindro attorno a ciascuna emergenza sorgiva.

Di seguito sono riportati i percorsi di migrazione delle particelle di inquinante nel layer 1, quello più superficiale, ottenute utilizzando i valori di porosità del 15% (*Figura 58*), del 20% (*Figura 59*) e del 25% (*Figura 60*), secondo la configurazione che prevede esclusivamente 4 sorgenti attive.

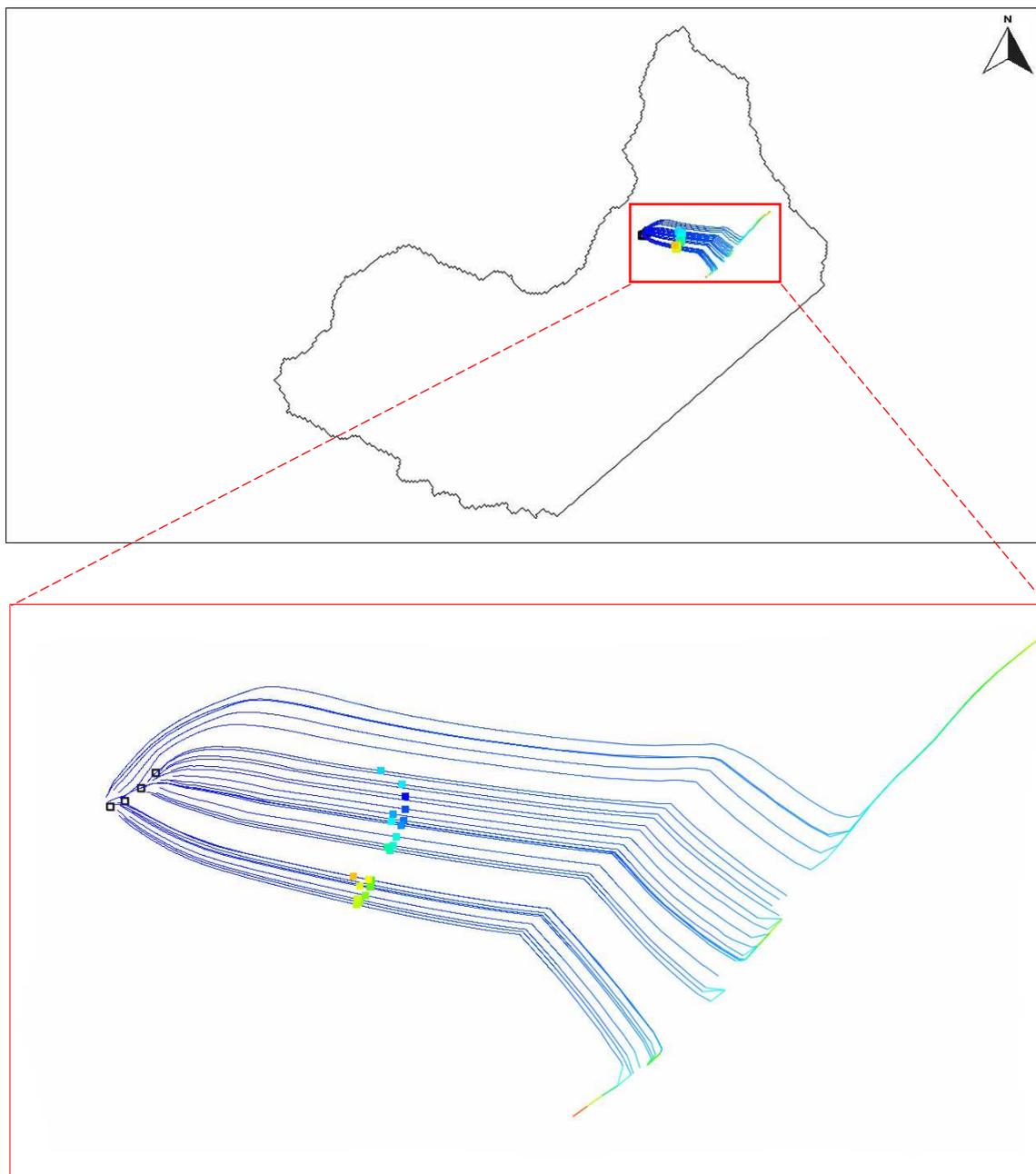
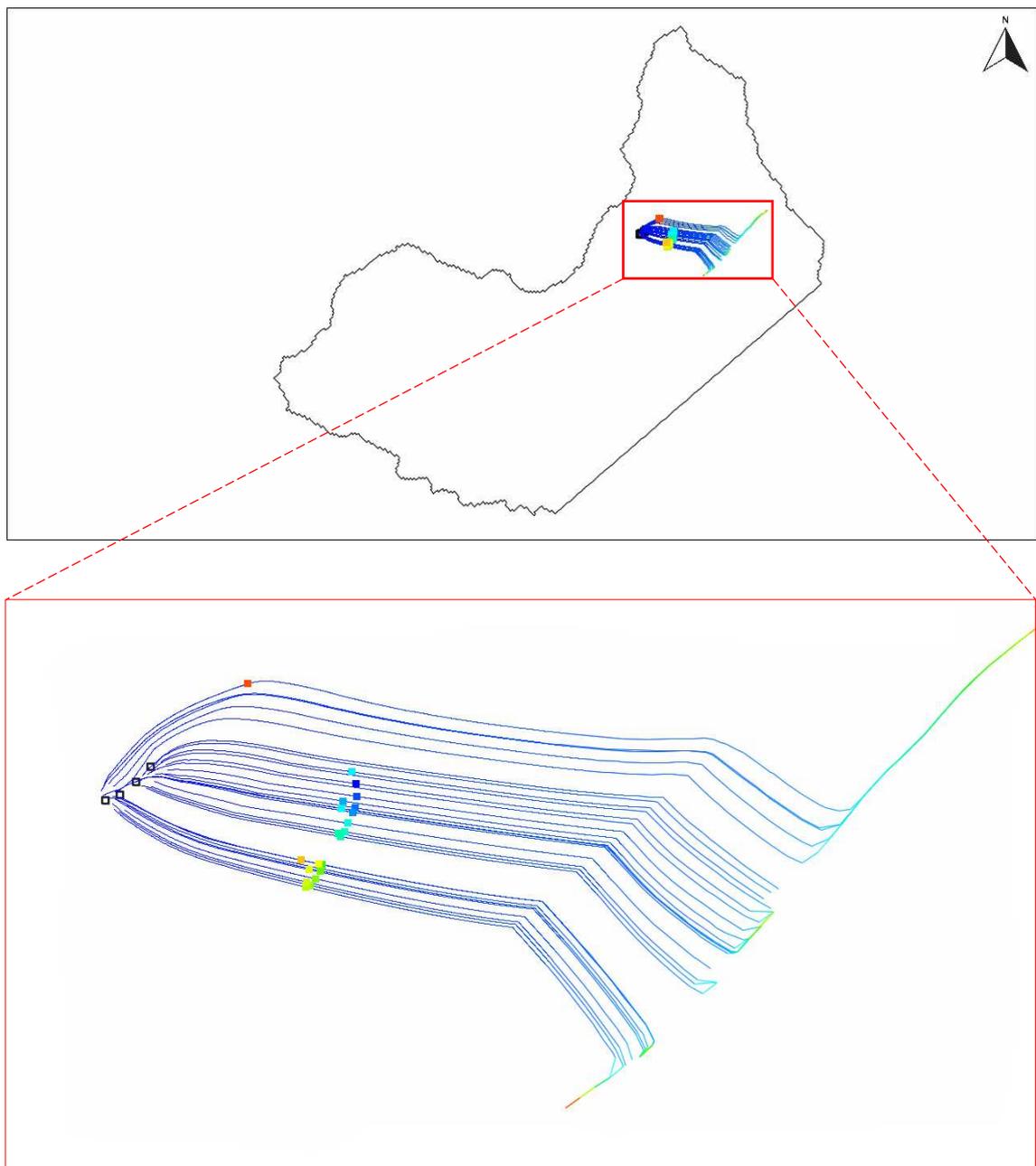


Figura 58 - Risultati delle simulazioni previsionali di trasporto advettivo, considerando una porosità del 15%, nei 4 punti di prelievo attualmente attivi delle Sorgenti Sampoi. Sono rappresentate le particelle di contaminante tracciate con il metodo backward tracking dopo 365 giorni e le pathlines di flusso sotterraneo.



*Figura 59 - Risultati delle simulazioni previsionali di trasporto advettivo, considerando una porosità del 20%, nei 4 punti di prelievo attualmente attivi delle Sorgenti Sampo. Sono rappresentate le particelle di contaminante tracciate con il metodo backward tracking dopo 365 giorni e le pathlines di flusso sotterraneo.*

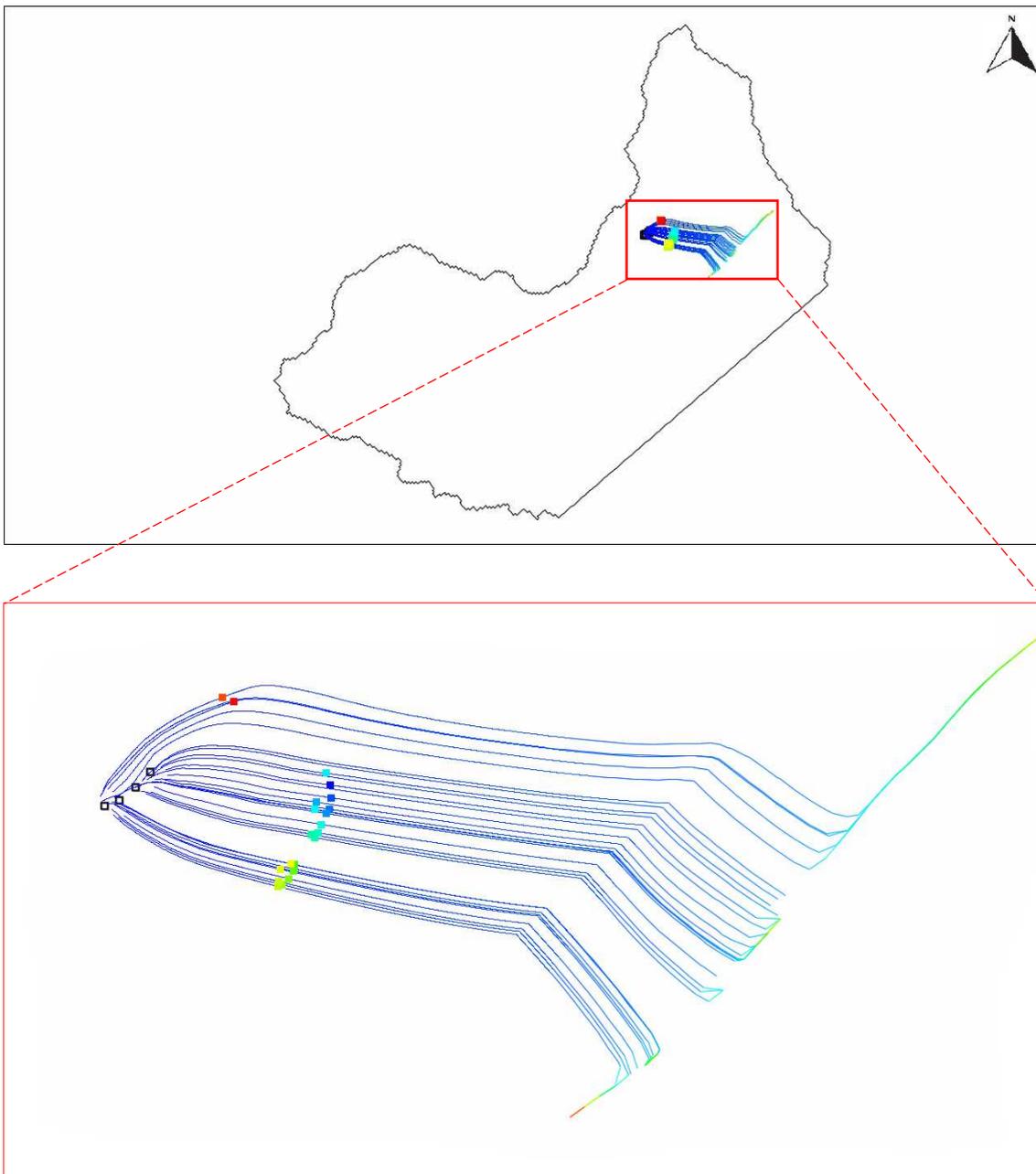


Figura 60 - Risultati delle simulazioni previsionali di trasporto advettivo, considerando una porosità del 25%, nei 4 punti di prelievo attualmente attivi delle Sorgenti Sampoi. Sono rappresentate le particelle di contaminante tracciate con il metodo backward tracking dopo 365 giorni e le pathlines di flusso sotterraneo.

Dalle simulazioni emerge chiaramente come la porosità influenzi la velocità di movimento delle particelle di contaminante all'interno dei depositi, ma non i percorsi di flusso che rimangono invariati. Ad esempio, nella simulazione con una porosità efficace del 15% (Figura 58), le particelle, dopo 365 giorni, si trovano molto più

lontane dalle sorgenti rispetto a quelle con porosità maggiore, indicando una maggiore velocità di flusso. Questo dato fornisce un'indicazione del tempo necessario affinché il contaminante possa raggiungere le sorgenti dalla zona in cui è stato immesso nell'acquifero.

Nella zona in cui, durante la calibrazione, sono stati modificati i valori di ricarica e di conducibilità idraulica, le linee di flusso hanno subito notevoli variazioni, fino a cambiare drasticamente direzione, seguendo parallelamente il versante.

Le simulazioni, inoltre, indicano che l'area ipotizzata come fonte di contaminazione primaria difficilmente può aver contribuito all'alimentazione delle Sorgenti Sampoi. Il solo trasporto advettivo nei depositi non sembra sufficiente a giustificare il passaggio del contaminante attraverso tale area, soprattutto per effetto dell'alto piezometrico che si trova al centro dell'area di studio che svolge una funzione di spartiacque idrogeologico.

Di seguito sono riportati i percorsi di migrazione delle particelle di inquinante nel layer 1, il più superficiale, ottenute utilizzando i valori di porosità del 15% (*Figura 61*), del 20% (*Figura 62*) e del 25% (*Figura 63*), con la seconda configurazione quella che prevede tutti e 7 i punti di prelievo delle Sorgenti Sampoi, anche con i punti ad oggi in disuso.

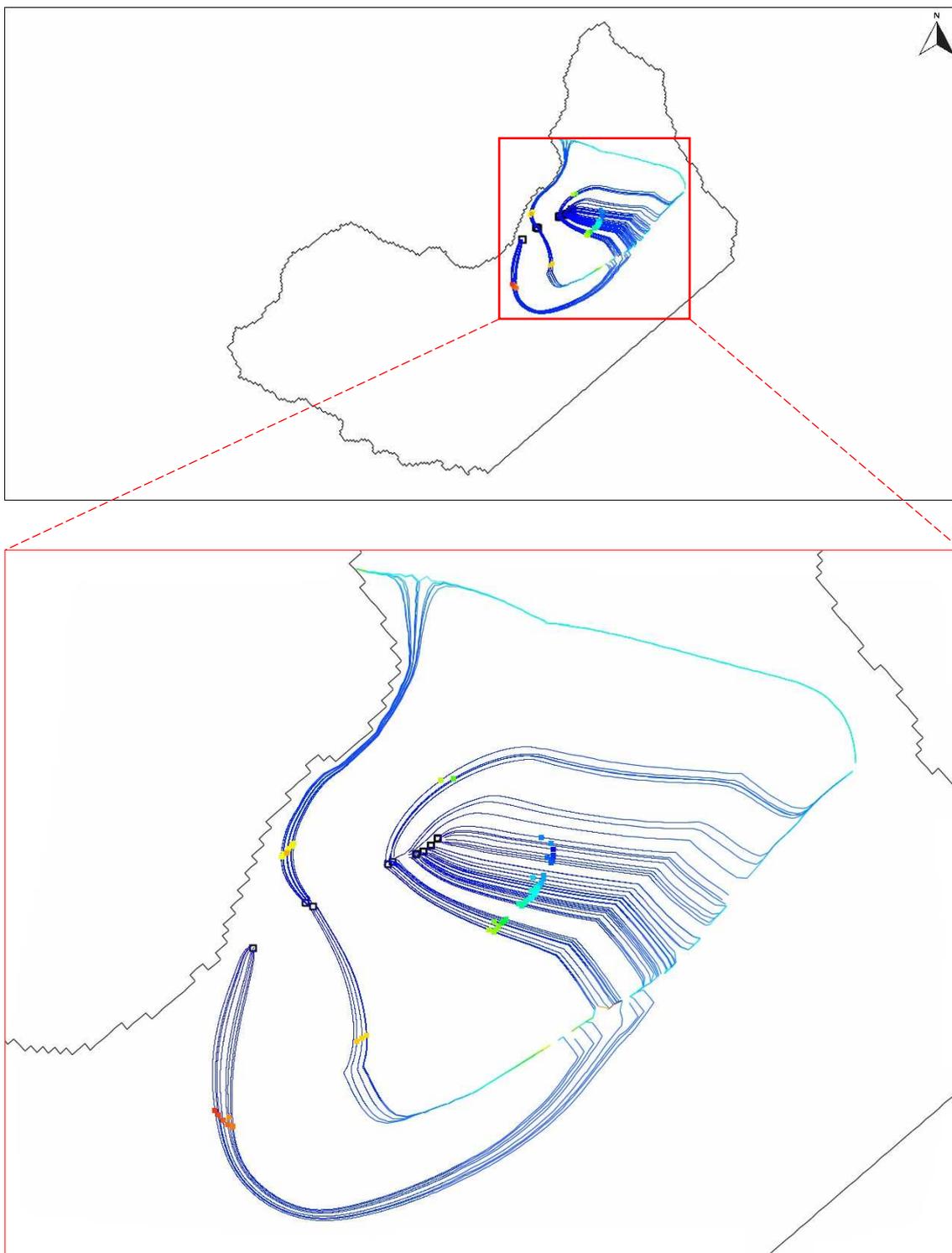


Figura 61 - Risultati delle simulazioni previsionali di trasporto advettivo, considerando una porosità del 15%, nei 7 punti di prelievo sia attivi che in disuso delle Sorgenti Sampoi. Sono rappresentate le particelle di contaminante tracciate con il metodo backward tracking dopo 365 giorni e le pathlines di flusso sotterraneo.

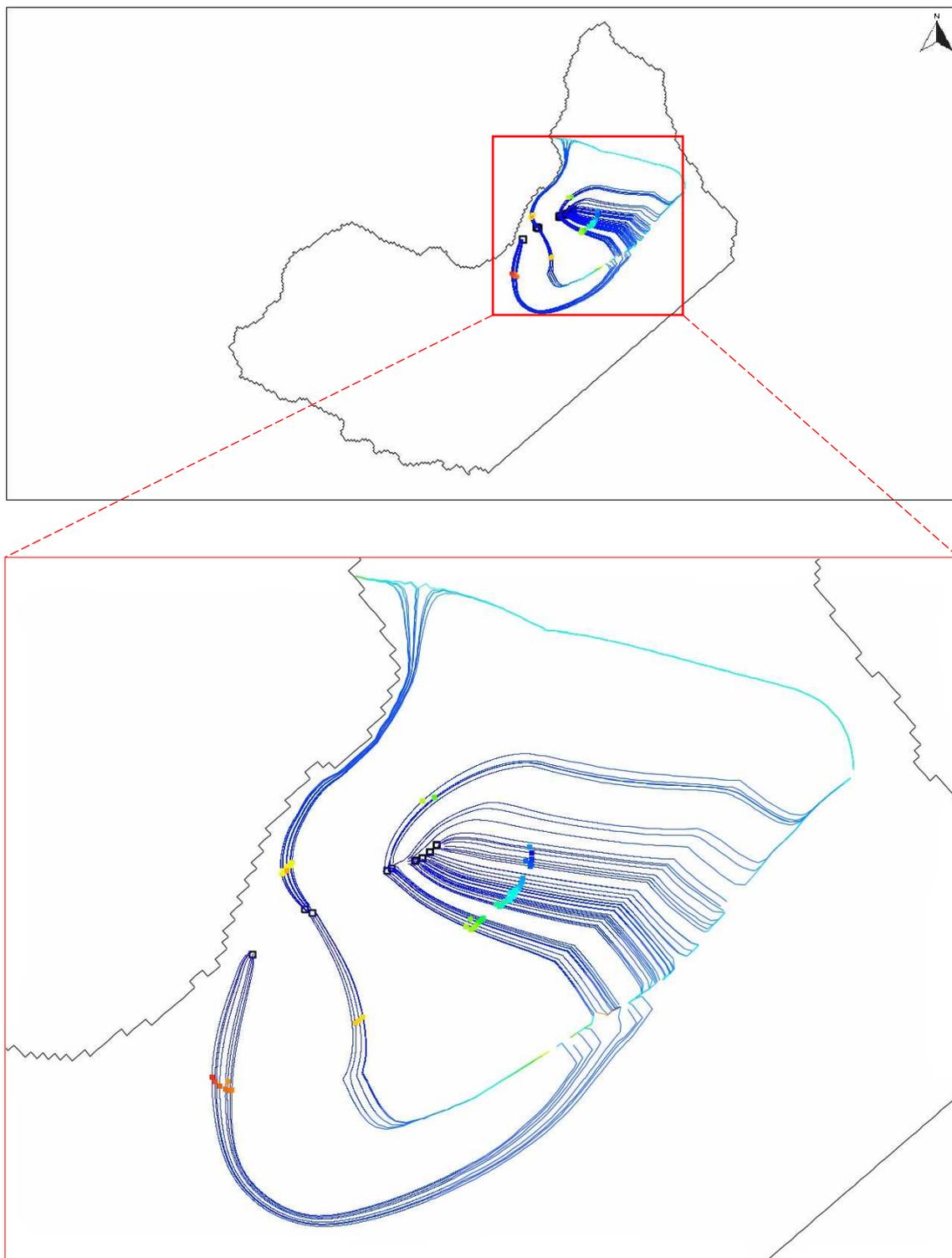


Figura 62 - Risultati delle simulazioni previsionali di trasporto advettivo, considerando una porosità del 20%, nei 7 punti di prelievo sia attivi che in disuso delle Sorgenti Sampoi. Sono rappresentate le particelle di contaminante tracciate con il metodo backward tracking dopo 365 giorni e le pathlines di flusso sotterraneo.

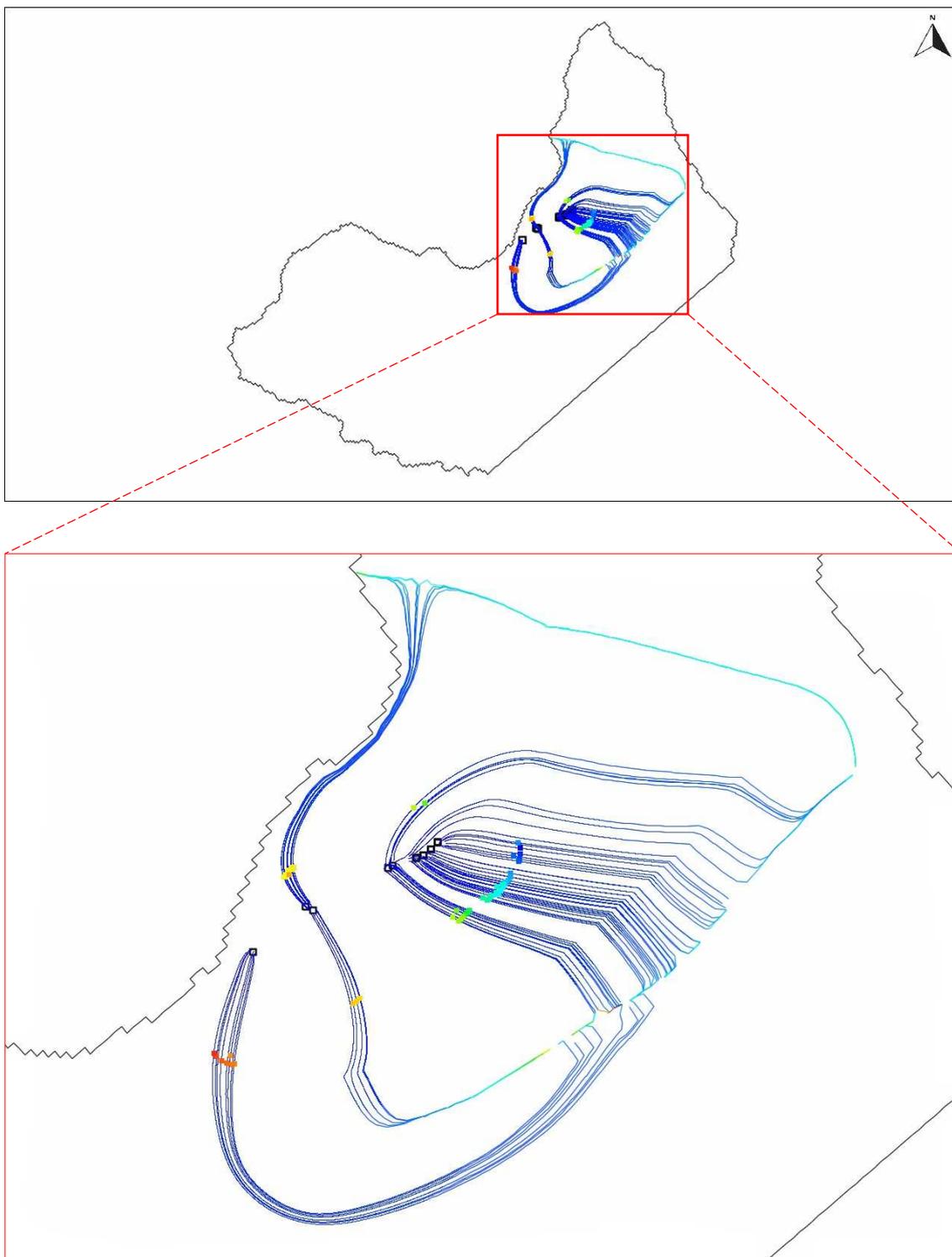


Figura 63 - Risultati delle simulazioni previsionali di trasporto advettivo, considerando una porosità del 25%, nei 7 punti di prelievo sia attivi che in disuso delle Sorgenti Sampoi. Sono rappresentate le particelle di contaminante tracciate con il metodo "backward tracking" dopo 365 giorni e le pathlines di flusso sotterraneo.

Analogamente alle simulazioni precedenti, è sempre evidente come la porosità influenzi significativamente la velocità di flusso all'interno del dominio di modellazione, ma non la direzione di deflusso delle acque sotterranee. L'influenza della zona di discontinuità nella conducibilità idraulica, quella in cui è presente l'alto morfologico della superficie potenziometrica, è particolarmente marcata, con le linee di flusso che sembrano originarsi quasi esclusivamente da essa. È inoltre evidenziato il fatto che alcune sorgenti ricevono un apporto idrico marginale dal flusso proveniente dal Fiume Piave.

Con l'aggiunta dei nuovi punti di recapito nella simulazione, diventa ancora più evidente che la fonte di contaminazione difficilmente possa aver alimentato le Sorgenti Sampoi esclusivamente attraverso il trasporto advettivo nei depositi, come inizialmente ipotizzato.

## **7 Conclusione**

Gli studi sono stati condotti sul territorio del Comune di Limana, un'area molto vasta, di estensione pari a circa 10 km<sup>2</sup>, potenzialmente contaminata in seguito ad uno sversamento nel sottosuolo o nelle acque superficiali di solventi clorurati. È stato quindi realizzato un modello numerico per simulare l'andamento del flusso delle acque sotterranee all'interno dell'acquifero freatico ospitato all'interno dei depositi inconsolidati di fondovalle, con l'obiettivo di identificare i percorsi di migrazione del contaminante e determinarne la possibile origine. La fase iniziale dello studio ha riguardato la raccolta e l'analisi preliminare di tutti i dati geologici ed idrogeologici disponibili. In particolare, per determinare l'assetto geo-litologico sono stati utilizzati i dati di bibliografia ed i dati delle stratigrafie ottenuti dai sondaggi fatti tra il 2003 ed il 2013, in seguito ad un finanziamento della Regione Veneto per l'attuazione del Piano di Caratterizzazione. Da questa ricostruzione risulta che l'abitato di Limana poggia su depositi quaternari di materiale sciolto di granulometria prevalentemente grossolana: ghiaie e sabbie. Questi depositi possono essere suddivisi in due orizzonti, entrambi di origine glaciale e fluvio-glaciale, e caratterizzati rispettivamente da: ghiaia e sabbia limosa ad argillosa, con elementi grossolani come ciottoli e blocchi

per il primo strato, e da limi sabbiosi più o meno argillosi con ghiaie per il secondo strato. I depositi poggiano su un bedrock costituito da calcareniti ed arenarie del Flysch di Belluno. In occasione della realizzazione dei sondaggi sono state condotte anche delle prove di permeabilità a carico variabile tipo Lefranc per definire il valore di conducibilità idraulica del sottosuolo saturo/insaturo.

Oltre a ciò, sono stati analizzati i dati meteorologici per ricostruire i valori di infiltrazione e surplus (*Par. 4.3*). In seguito, i dati idrogeologici sono stati elaborati al fine di ottenere informazioni sulla distribuzione del carico idraulico e ricostruire l'andamento della superficie potenziometrica dell'acquifero freatico (*Par. 4.1*). Infine, sono stati esaminati i dati relativi alla contaminazione delle sorgenti e i campioni d'acqua prelevati nei piezometri (*Par. 4.4*). L'analisi ha mostrato una significativa riduzione delle concentrazioni di contaminanti nel tempo, con valori scesi al di sotto del limite di legge (D.Lgs. 152/06) e, in alcuni casi, anche al di sotto del limite di rilevabilità strumentale, ad eccezione di alcuni punti, come i piezometri S9 ed S11, dove le concentrazioni di PCE rimangono superiori al limite normativo.

Tutte queste informazioni sono state necessarie per la definizione, da prima di un modello idrogeologico concettuale, e successivamente per l'implementazione del modello numerico. Dopo aver individuato e discretizzato il dominio di modellazione (*Par.5.2*), aver definito le condizioni al contorno(*Par. 5.4*) e parametrizzato i materiali (*Par. 5.3*), è stata effettuata la calibrazione di una simulazione di flusso allo stato stazionario, ottimizzando i valori di conducibilità idraulica e di ricarica zenitale per riprodurre in modo sufficientemente realistico le misure sperimentali di carico idraulico e flusso alle sorgenti (*Par. 5.6*). Sebbene il valore di riferimento per un modello ben calibrato sia inferiore al 10%, la calibrazione eseguita ha comunque fornito una buona approssimazione dei dati sperimentali, con un nRMS pari a circa l'11%, che permette di riprodurre una portata in uscita dalle sorgenti dello stesso ordine di grandezza dei dati disponibili.

Infine, tramite il codice MODPATH, sono stati tracciati i percorsi di migrazione delle particelle per individuare l'origine del flusso che alimenta le Sorgenti Sampo, attraverso l'implementazione di due configurazioni principali: nella prima, il tracciamento è stato avviato dai punti corrispondenti alle quattro sorgenti attualmente

attive, mentre nella seconda è stato esteso a tutti e sette i punti di captazione delle sorgenti Sampoï, inclusi quelli attualmente non attivi. In assenza di dati specifici sulla porosità efficace dei materiali che costituiscono il sottosuolo dell'area di studio, sono stati valutati tre scenari distinti, corrispondenti a valori di porosità efficace del 15%, 20% e 25%. Tutte le simulazioni hanno prodotto risultati analoghi. Dal punto di vista quantitativo, il bilancio idrogeologico suggerisce che l'alimentazione delle sorgenti attraverso i depositi sia teoricamente possibile, in virtù dei valori di conducibilità idraulica che favoriscono una portata pari al doppio di quella misurata. Tuttavia, l'analisi dei percorsi di flusso rende questa ipotesi poco plausibile. L'osservazione dei dati suggerisce quindi l'ipotesi che le sorgenti siano alimentate da due circuiti idrici distinti: uno localizzato nei depositi quaternari e l'altro nel Flysch di Belluno, entrambi alimentati principalmente dalle precipitazioni. Sebbene il modello utilizzato non sia stato in grado di riprodurre questa dinamica, la presenza di una circolazione all'interno del Flysch rappresenta l'ipotesi più plausibile per spiegare il fenomeno di contaminazione. Tuttavia, a causa della complessità intrinseca degli ammassi rocciosi fratturati e dell'elevata eterogeneità della distribuzione della conducibilità idraulica, non è stato possibile eseguire simulazioni accurate all'interno del Flysch. In mancanza di altre fonti di contaminazione nell'area delle Sorgenti Sampoï, allo stato attuale, l'ipotesi più credibile è quindi che il contaminante sia giunto alle sorgenti attraverso il flusso nel fratturato del Flysch, che agisce in sinergia con la circolazione nei depositi.

## **BIBLIOGRAFIA**

AGI (1977) “Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche”. Associazione Geotecnica Italiana, SGE, Padova.

AMANTI M., BERTOLINI G., CARA P., CHIESSI V., DE NARDO M.T., MARTINI M.G., RAMASCO M., VENTURA R. (2001) Allegato Tecnico per la Realizzazione del Progetto IFFI (Inventario Italiano dei Fenomeni Franosi).

ANDERSON M.P. & WOESSNER W.W (1992) “Applied Groundwater Modeling – Simulation of flow and advective transport”, San Diego, Calif., Academic Press, 381 p.

ANDERSON M.P., WOESSNER W.W., HUNT R.J. (2015) “Applied Groundwater Modeling - Simulation of flow and advective transport”. San Diego, California: Elsevier, <https://doi.org/10.1016/C2009-0-21563-7>

ANTOLINI P. (1940) “Sui Campi di battaglia”. Consociazione turistica italiana (CTI), 5a ed., Milano.

ANTONELLI R., GARBIERI G., DAL PIAZ G.V, DAL PRÀ A., DE ZANCHE V., GRANDESSO P., MIETTO P., SEDEA R., ZANFERRARI A. (1988) “Carta geologica del Veneto”, scala 1: 250.000. Università degli Studi di Padova – Istituto di Geologia

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.

BOSCOLO C., MION F. (2008) “Le acque sotterranee della pianura veneta - I risultati del Progetto SAMPAS”. Agenzia Regionale per La Prevenzione E Protezione Ambientale Del Veneto (ARPAV).

BOSELLINI A., HSU K.J. (1973) “Mediterranean Plate Tectonics and Triassic Palaeogeography”. Nature, v. 249, n.5412, 144-146.

- BOSELLINI A., MASETTI D., SARTI M. (1981) "A Jurassic «Tongue of the ocean» infilled with oolitic sands: the Belluno Trough, Venetian Alps, Italy". *Mar. Geol.*, vol. 44, pp.59 – 95
- 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)
- CARLSON, R.E., AND FOLEY, T.A. (1991a) "Radial Basis Interpolation Methods on Track Data". Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-JC-1074238.
- CARLSON, R. E., AND FOLEY, T. A. (1991b) "The Parameter  $R^2$  in Multiquadric Interpolation". *Computers Math. Applic.*, v. 21, n. 9, p. 29-42.
- CASATI P., TOMAI M. (1969) "Il Giurassico ed il Cretacico del versante settentrionale del Vallone Bellunese e del gruppo del Monte Brandol". *Riv. Ital. Paleont. Strat.*, vol. 75, n. 2, pp. 205-340, Milano
- CASTELLARIN A., (1981) "Carta tettonica delle Alpi Meridionali alla scala 1:200000". CNR, pubbl. 441, pp. 1-220, Tecnoprint, Bologna
- CASTIGLIONI B. (1923) "Le tracce glaciali del Col Visentin presso Belluno". *Atti Acc. Sc. Ven.-Trent.-Istr.*, 14.
- CASTIGLIONI B. (1940) "L'Italia nell'età quaternaria. Carta delle Alpi nel Glaciale (scala 1:200000)". Tav. 3 dell'Atlante Fisico-economico d'Italia, a cura di G. Dainelli, C.T.I., Milano
- CAU A., FANTI F. (2010) "Evolutionary patterns of Cretaceous terrestrial vertebrates". *Journal of Vertebrate Paleontology*"
- CAVINATO A., DE BONI A. (2012) "Relazione annuale sul monitoraggio della qualità delle acque sotterranee in Provincia di Belluno". Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto (ARPAV)
- CELICO P. (1988) "Prospezioni idrogeologiche". Vol.2, Liguori Editore, Napoli

COLLESELLI E., PADOVAN T. (2015) “Carta Geologica in scala 1:10000 del Comune di Limana”. Aggiornamento del Piano di Caratterizzazione (PdC) per siti inquinati da solventi clorurati in località Sampoi e Baorche – Provincia di Belluno.

COLLESELLI E., PETITTA M. (2015) “Relazione sull'utilizzo degli isotopi ambientali per l'approfondimento del quadro di circolazione idrica sotterranea e di inquinamento in località Sampoi e Baorche”.

COSTA V., DOGLIONI C., GRANDESSO P., MASETTI D., PELLEGRINI G.B., TRACANELLA E. (1992) “Note illustrative del F° 063 BELLUNO”. Presidenza del Consiglio dei ministri, Dipartimento per i Servizi Tecnici Nazionali ed il Servizio Geologico d'Italia.

DAVIS J.C. (2002) “Statistics and data analysis in geology” (Third Edition). John Wiley & Sons.

DE BIASIO E., SERAFINI M. (2012) “Carta Geolitologica dei Comuni di Limana e Trichiana, scala 1:15000”. P.A.T.I. (Piano di assetto del territorio intercomunale) - Comuni di Limana e Trichiana

DE BIASIO E., SERAFINI M. (2012) “Relazione Geologica e Valutazione di Compatibilità Geologica”. P.A.T.I. (Piano di assetto del territorio intercomunale) - Comuni di Limana e Trichiana

DOGLIONI C. (1988) “Structure of the Venetian Southern Alps”. Tectonic Studies Group Abstract, Cambridge

FILECCIA A. (2011) “Le carte piezometriche (Teoria e pratica nella costruzione e interpretazione)”. Acque Sotterranee Italian Journal of Groundwater. Pagepress Publ, Meditgroup, Via G Belli, 4, Pavia, Italy, 27100

GIANDON P. et al. (2020) “Rapporto sullo Stato dell'Ambiente del Veneto”. Agenzia Regionale per La Prevenzione E Protezione Ambientale Del Veneto (ARPAV)

GNACCOLINI M., (1968) “Caratteristiche sedimentologiche del Flysch del Vallone Bellunese”. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 74: 63-70

GRANDESSO P. (1976) “Biostratigrafia delle formazioni terziarie del Vallone Bellunese”. *Boll. Soc. Geol. It.*, vol. 94 (1975), pp. 1323-1348

HAMMER Ø., HARPER D.A.T., RYAN P.D. (2001) “PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis”. *Palaeontologia Electronica* 4(1): 9.

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”. U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 p.,

HARBAUGH, A.W. “MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16”. In *Modeling techniques*. Reston, Virginia, 2005.

ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (2024) “Carta Inventario dei Fenomeni Franosi”. Sistema Nazionale per la Protezione dell’Ambiente.

KENDALL M.G. (1975) “Rank Correlation Methods”. Griffin: London.

MANN H.B. (1945) “Nonparametric tests against trend. *Econometrica*”. 13: 245–259.

MASETTI D., BIANCHIN G. (1987) “Geologia del Gruppo della Schiara (Dolomiti Bellunesi)”. *Mem. Sc.Geol.* vol. XXXIX, pp.187-212, Padova.

PETTINE M. (2016) “LOD e LOQ”. Laboratorio di Idrochimica - Istituto di Ricerca sulle Acque (IRSA), Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

ROGHI G. (2013) “La Geologia dei Colli Euganei”. Istituto di Geoscienze e Georisorse (IGG) e Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

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>.

SEN P.K. (1968) “Estimates of the regression coefficient based on Kendall’s tau”. *Journal of American Statistical Association*, 63: 1379–1389.

STEFANI C., GRANDESSO P., (1991) “Studio preliminare di due sezioni del Flysch bellunese”. *Rendiconti Società Geologica Italiana*, 14: 157-162.

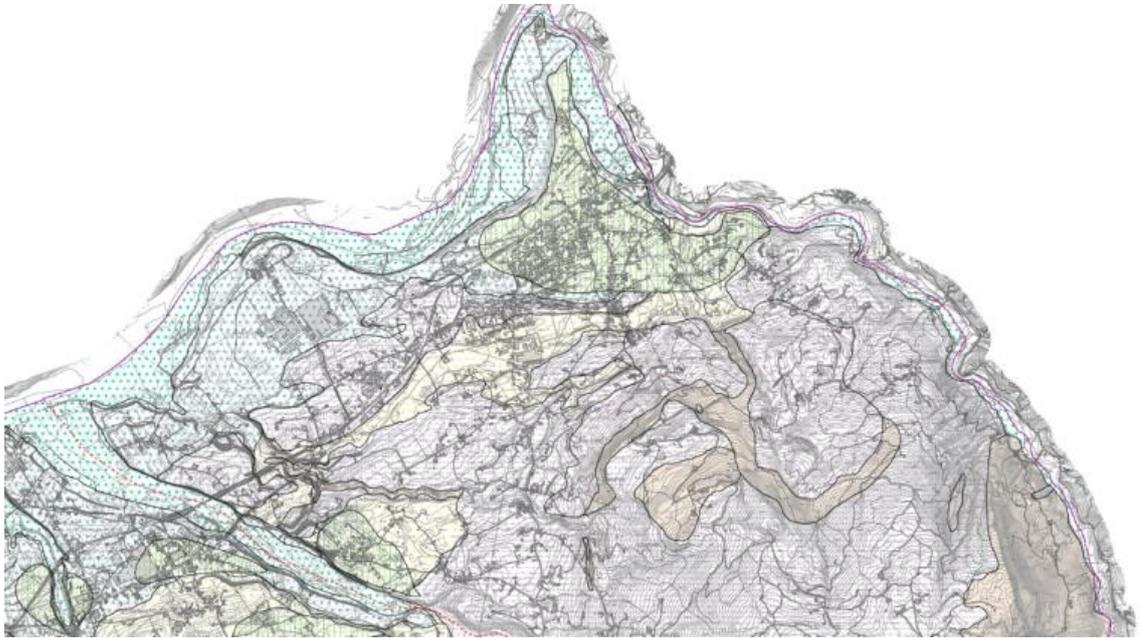
THORNTHWAITE C.W. & MATHER J.R. (1957) “Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance”. 10(3), C.W. Thornthwaite Associates, Laboratory of Climatology, Elmer, NJ, USA.

TORETI A., DESIATO F. (2008) “Temperature trend over Italy from 1961 to 2004”. *Theoretical and Applied Climatology*, 91: 51–58, <https://doi.org/10.1007/s00704-006-0289-6>.

UFFICIO IDROGRAFICO-MAGISTRATO ALLE ACQUE DI VENEZIA (1941) “Carta geologica delle Tre Venezie: Foglio 23-Belluno”. Studio Cartografico Giardi, Firenze.

US-EPA (2020). ProUCL Version 5.2.0 - User Guide. Statistical Software for Environmental Applications for Data Sets with and without Nondetect Observations. United States Environmental Protection Agency.

## ALLEGATI



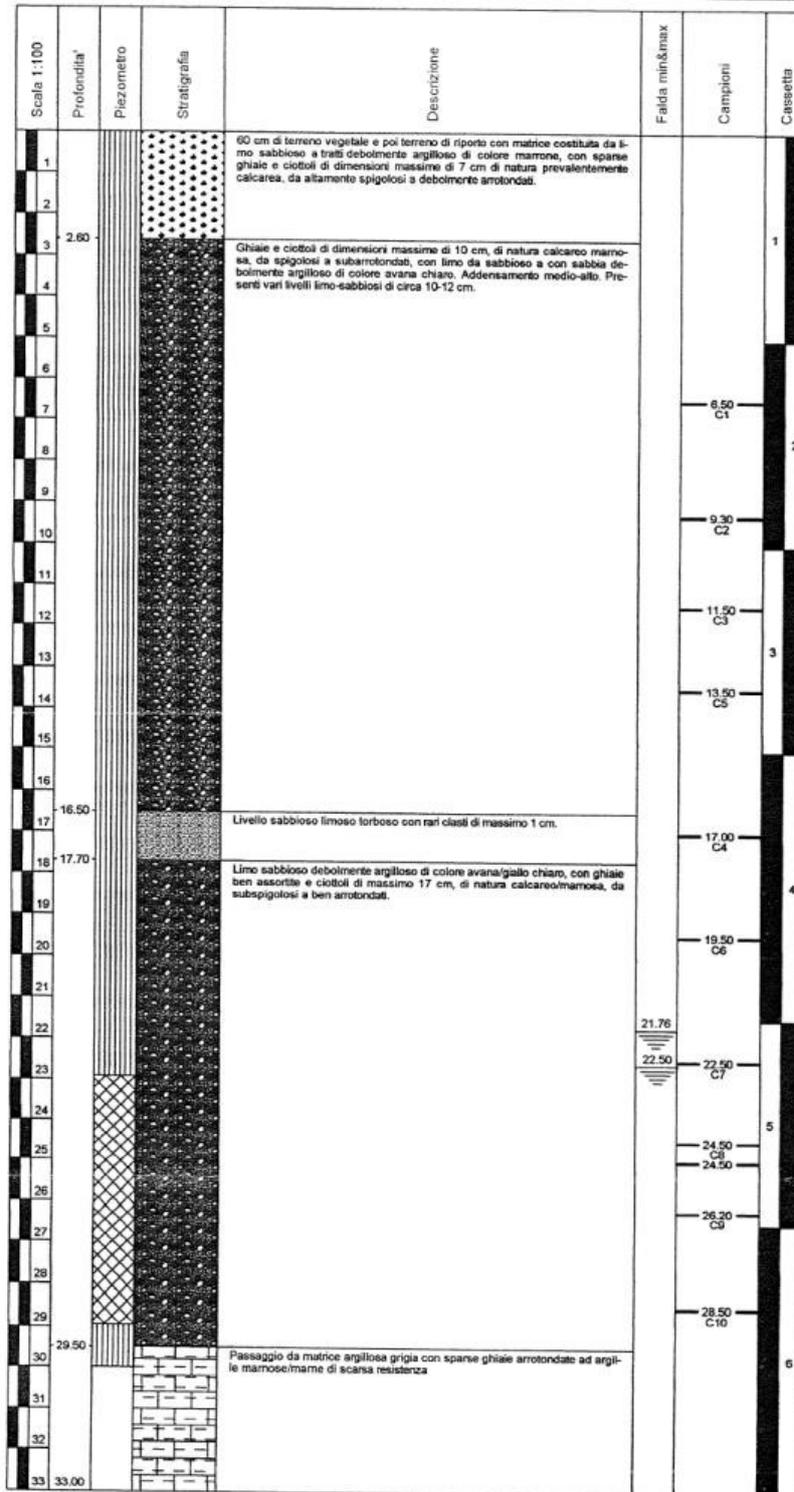
*Allegato 1 Stralcio Carta Geolitologica 1:15.000 del Piano di Assetto del Territorio Intercomunale (P.A.T.I.) di Limana e Trichiana.*



*Allegato 2 Stralcio Carta Geomorfologica 1:15.000 del Piano di Assetto del Territorio Intercomunale (P.A.T.I.) di Limana e Trichiana.*

GeoTevere S.r.l.c.  
Società di Geologia  
Via Piccolli 16  
00139 Roma

Cantiere: Limana (BL)	N. sondaggio: S12
Committente: Comune di Limana	Falda: 21.76-22.50
Perforatore: De Masi Francesco	Quota (b.p.):
Sonda: MD710 EGT	Data ultimazione: 19/02/2004
Metodo perf.: carotaggio continuo	



 Tubo cieco
  Tubo fessurato

Allegato 3 Sondaggio a carotaggio continuo numero S.12



S12 – da mt 10.0 a mt 15.0



S12 – da mt 5.0 a mt 10.0



S12 – da mt 0.0 a mt 5.0

*Allegato 4 - Carota di terreno prelevate dal sondaggio S.12 da 0 a 15 m di profondità dal piano campagna*



S12 – da mt 26.5 a mt 33.0



S12 – da mt 21.5 a mt 26.5



S12 – da mt 15.0 a mt 21.5

Allegato 5 - Carota di terreno prelevate dal sondaggio S.12 da 15 a 33 m di profondità dal piano campagna