



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

SCUOLA DI SCIENZE
Dipartimento di Geoscienze
Direttore Prof.ssa Cristina Stefani

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN GEOLOGIA E
GEOLOGIA TECNICA

**MODELLAZIONE NUMERICA DEL
FLUSSO NELL'ACQUIFERO FREATICO
DELL'ALTA PIANURA VENETA PER
LA DEFINIZIONE DEL BILANCIO
IDROGEOLOGICO**

Relatore: Prof. Leonardo Piccinini

*Laureando: Vincenzo Critelli
Matricola: 1330848*

ANNO ACCADEMICO 2016/2017

Indice

1	ABSTRACT.....	5
2	INTRODUZIONE	7
3	INQUADRAMENTO DELL'ALTA PIANURA VENETA	9
3.1	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO	9
3.2	INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO	10
3.3	INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO	14
4	DATI IDROGEOLOGICI DI BASE	17
4.1	DATI METEO-CLIMATICI	17
4.2	PORTATE E LIVELLI IDROMETRICI	26
4.3	IRRIGAZIONE E PRELIEVI	32
4.3.1	<i>Irrigazione</i>	33
4.3.2	<i>Prelievi acquedottistici e privati</i>	34
4.4	LIVELLI FREATICI	41
4.5	BILANCIO IDROGEOLOGICO	48
4.5.1	<i>Afflussi</i>	48
4.5.2	<i>Deflussi</i>	51
5	MODELLAZIONE IDROGEOLOGICA	53
5.1	MODELLO IDROGEOLOGICO CONCETTUALE	53
5.2	CODICI DI CALCOLO E TIPOLOGIA DI SIMULAZIONI REALIZZATE	54
5.3	SIMULAZIONI IMPLEMENTATE	56
5.4	DISCRETIZZAZIONE SPAZIALE	57
5.5	PARAMETRIZZAZIONE	59
5.6	CONDIZIONI AL CONTORNO	59
5.7	APPROCCIO METODOLOGICO ALLA CALIBRAZIONE	63
5.8	CALIBRAZIONE ALLO STAZIONARIO	67
5.8.1	<i>Risultati della calibrazione allo stazionario</i>	70
5.9	SIMULAZIONI PREVISIONALI	81
5.9.1	<i>Implementazione</i>	82
5.9.2	<i>Risultati</i>	84
6	CONCLUSIONI	89
	BIBLIOGRAFIA	91

1 Abstract

A 3D groundwater flow model was developed, with MODFLOW-2005 code (Harbaugh, 2005), to assess and validate the current water balance for the unconfined aquifer in the High Venetian Plain, through inverse modeling performed by using an automatic optimization software (PEST; Doherty, 2015).

The automatic calibration approach was developed implementing three different scenarios for the hydraulic conductivity distribution and was aimed to minimize the residual between observed and simulated hydraulic head in the least squared sense by adjusting the values of the calibration parameters.

The highly parameterized inversion turned out to be the best way to minimize the objective function, providing a model consistent with the current water balance for the aquifer estimated by previous studies (Cambruzzi et al., 2010; Fabbri et al., 2016), except for the Brenta and Piave rivers dispersion and the outflow from the southern margin of the model domain.

Starting from the calibrated model and the results obtained from a climate model developed for the area (Baruffi et al., 2012), three predictive simulations were also performed for the period 2070-2100, considering different irrigation policies.

The results of the predictive simulations suggest that the surface irrigation system could be a valuable way to avoid further withdrawal of the water table, which the aquifer has been experiencing through the last decades.

2 Introduzione

L'acquifero alluvionale dell'Alta Pianura Veneta è sede di abbondanti risorse idriche da tempo sfruttate per scopi acquedottistici, irrigui e privati. Tale abbondanza è giustificata sia dalle caratteristiche del mezzo che lo costituisce, sia dagli stretti rapporti con le acque superficiali che rendono possibile la sua efficiente alimentazione. Questi stessi fattori, tuttavia, rendono l'acquifero, oltre che strategicamente importante, anche vulnerabile: l'ottima comunicazione idraulica che lo lega alla superficie topografica lo espone a contaminazioni, fenomeni resi più problematici dai rapporti geometrici che tale serbatoio ha con gli acquiferi confinati intensamente sfruttati della Media pianura, essendo questi il principale recapito delle sue acque. Oltre agli aspetti qualitativi delle acque sotterranee, diventano sempre più evidenti le problematiche che interessano gli aspetti quantitativi della risorsa: le recenti siccità che hanno colpito il territorio veneto, hanno messo in luce gli impatti che i cambiamenti climatici avranno sulle risorse idriche, spingendo gli Enti Pubblici verso una più responsabile e sostenibile gestione delle acque sotterranee attraverso la pianificazione di nuove strategie mirate alla loro salvaguardia.

In questo specifico contesto, il presente studio si inserisce con l'obiettivo di validare, ed eventualmente rivedere, il bilancio idrogeologico dell'acquifero freatico dell'Alta Pianura Veneta attraverso la modellazione numerica inversa con i codici MODLFLOW-2005 e PEST (Harbaugh, 2005; Doherty, 2015). L'area oggetto di studio è la porzione di Alta Pianura compresa tra i fiumi Brenta, ad est, e Piave ad ovest. Su tale area sono stati raccolti ed elaborati dati meteorologici e idrogeologici insieme ad informazioni riguardanti l'attività antropica (irrigazione e prelievi) che sono stati utilizzati come riferimento per una serie di simulazioni numeriche di calibrazione che hanno permesso di ottimizzare la conducibilità idraulica (K) dell'acquifero ed alcuni termini del bilancio (ricarica zenitale, dispersioni in alveo dei fiumi, deflusso dalle risorgive e verso gli acquiferi confinati).

Infine, sono stati simulati alcuni scenari previsionali che riproducono le condizioni climatiche previste per il periodo 2070-2100 sull'intera Pianura Veneto-Friulana, ipotizzando l'adozione di diverse politiche in materia di distribuzione irrigua.

3 Inquadramento dell'Alta Pianura Veneta

3.1 Inquadramento geografico

La porzione di territorio esaminato nel presente studio si estende per un'area di circa 740 km² e ricade interamente all'interno dell'Alta Pianura Veneta, il settore centro-orientale del Veneto delimitato dal fronte meridionale dai rilievi prealpini (a nord) e dalla fascia delle *risorgive* (a sud) che a sua volta la separa dalla Media e Bassa Pianura; i fiumi Brenta e Piave ne costituiscono, invece, rispettivamente il margine occidentale e quello orientale (Figura 3.1).

Il rilievo dell'area in oggetto è generalmente pianeggiante, con gradienti topografici che si mantengono al di sotto di 1.5% di pendenza, in graduale diminuzione procedendo da N-W verso S-E (Rinaldi et al., 2005).

È inoltre presente una sviluppata rete idrografica rappresentata sia da corsi d'acqua di origine montana, tra i quali si annoverano il Brenta, il Musone e il Piave, sia da fiumi di risorgiva come il Sile e lo Zero.

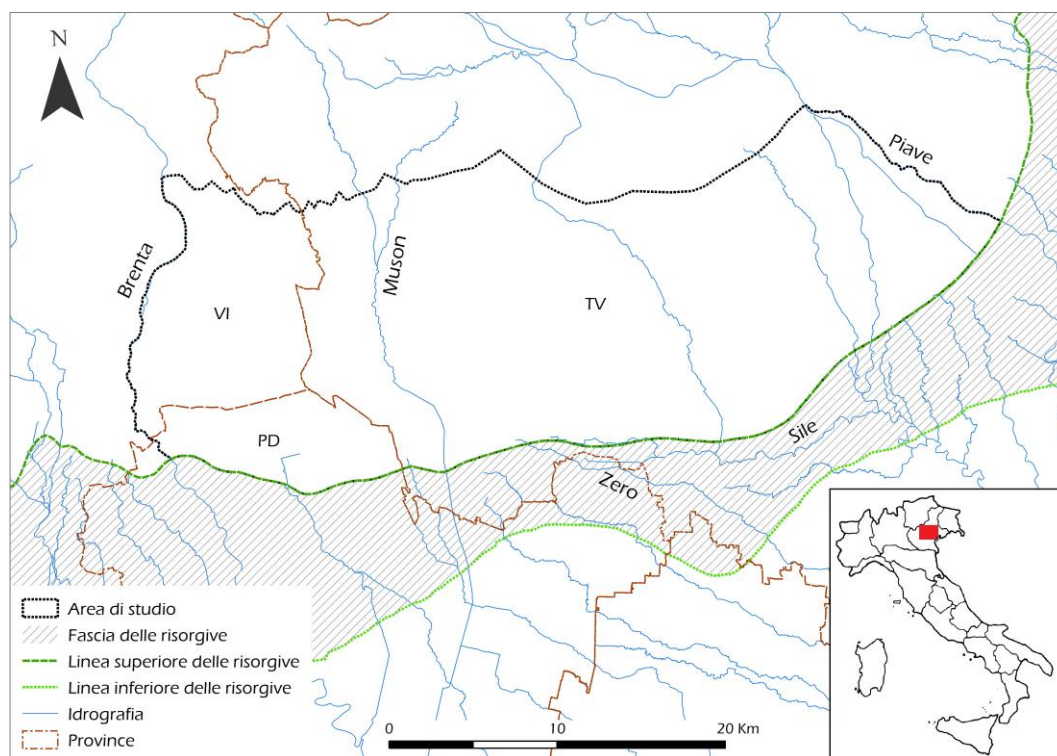


Figura 3.1 – Inquadramento geografico dell'area di studio.

A questa idrografia si aggiunge anche una fitta rete di rogge e canali di derivazione adibiti a scopi irrigui.

Dal punto di vista amministrativo, l'area di studio ricade nelle provincie di Vicenza, Treviso e in parte in quella di Padova.

3.2 Inquadramento geologico e geomorfologico

L'origine dell'Alta Pianura Veneta risale alla fine del Terziario a seguito della formazione di un bacino di avampaese a ridosso della catena Alpina e dal suo successivo riempimento verificatosi a partire dal Quaternario mediante il progressivo accumulo di depositi di origine alluvionale e fluvioglaciale intervallati da sedimenti deposti durante le fasi di trasgressione marina.

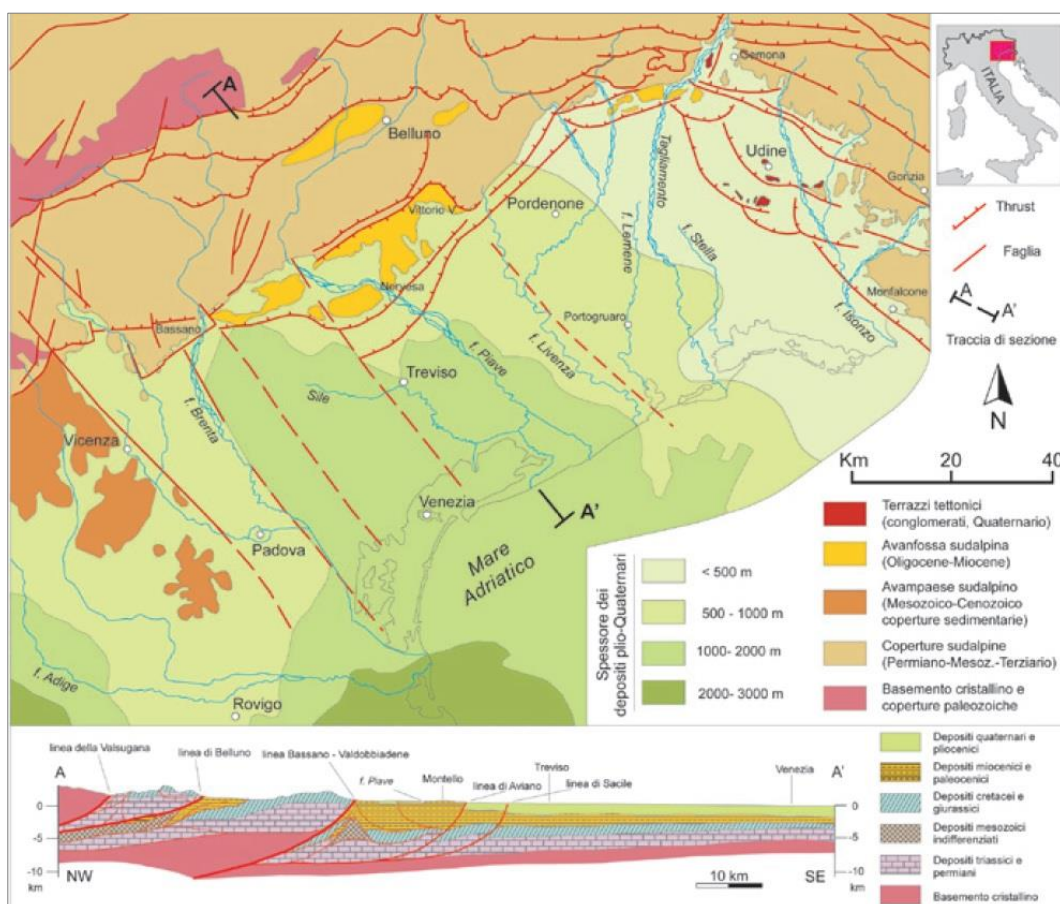


Figura 3.2 - Schema geologico-strutturale della pianura veneto-friulana, con profilo geologico del settore centrale (da Bondesan et al., 2016).

I principali lineamenti tettonici presenti in quest'area (Figura 3.2) sono rappresentati da faglie orientate secondo la direttrice NNW-SSE, la maggior parte delle quali non hanno esercitato una rilevante influenza durante il Quaternario fatta eccezione per la faglia Schio-Vicenza (Bondesan et al., 2016).

L'evoluzione plio-quadernaria della pianura è stata condizionata dal drastico abbassamento del livello del mare avvenuto nel Messiniano, a seguito della chiusura dello Stretto di Gibilterra, che ha causato l'emersione di vasti territori e la loro successiva erosione alluvionale; il processo portò alla riorganizzazione del reticolo fluviale e alla formazione delle principali valli alpine e delle maggiori depressioni del substrato della pianura (Bondesan et al., 2016).

Successivamente, la dinamica fluviale e la sua risposta ai cambiamenti climatici e del livello del mare ha guidato l'evoluzione della pianura dal tardo Pleistocene all'attuale (ultimi 150.000 anni). L'evento morfogenetico più importante in questo periodo, comune a tutto il N-E italiano, è stato senz'altro l'Ultimo Massimo Glaciale (LGM) compreso tra 30.000 e 17.000 anni fa, durante il quale i ghiacciai alpini ebbero la loro massima espansione, occupando le principali valli alpine e portando le loro fronti in pianura o in prossimità di essa (Bondesan et al., 2016). Durante il LGM le condizioni ambientali favorirono una notevole produzione di detrito veicolato poi, verso valle, dai sistemi fluvioglaciali, che lo distribuirono sulle ampie superfici disponibili, generando così sistemi sedimentari che si estendono fino a mare, riconoscibili, in pianta, grazie alla loro morfologia a ventaglio: nonostante la netta somiglianza morfologica ai più comuni *conoidi*, è ormai uso corrente, nella letteratura scientifica, riferirsi a questa tipologia di corpi con il termine “*megafan alluvionale*”, in analogia con i sistemi sedimentari descritti per la prima volta nell'area pede-himalayana e tipici delle aree di avampaese delle catene a *thrust* (Figura 3.3). La principale differenza tra megafan e conoidi è la tipica selezione granulometrica, presente nei primi, che è riscontrabile longitudinalmente al loro allungamento procedendo dalle zone di apice a quelle più distali: le prime decine di chilometri dallo sbocco vallivo sono caratterizzate da omogenei depositi grossolani; proseguendo verso valle, invece, col diminuire della capacità di trasporto dei corsi d'acqua viene

inibita la mobilitazione di sedimenti grossolani in favore di quelli più fini che infatti ne contraddistinguono le porzioni distali.

Questa differenziazione longitudinale ha condotto alla genesi di fasce ben distinguibili da monte verso valle, e dal momento che il processo di formazione dei megafan è stato attivo durante tutto il Quaternario (Bondesan et al., 2016) è plausibile estendere questa suddivisione anche al sottosuolo nel quale possono essere presenti, quindi, in successione verticale, diverse generazioni di megafan, sebbene possano differire tra loro per forma, direzione ed estensione.

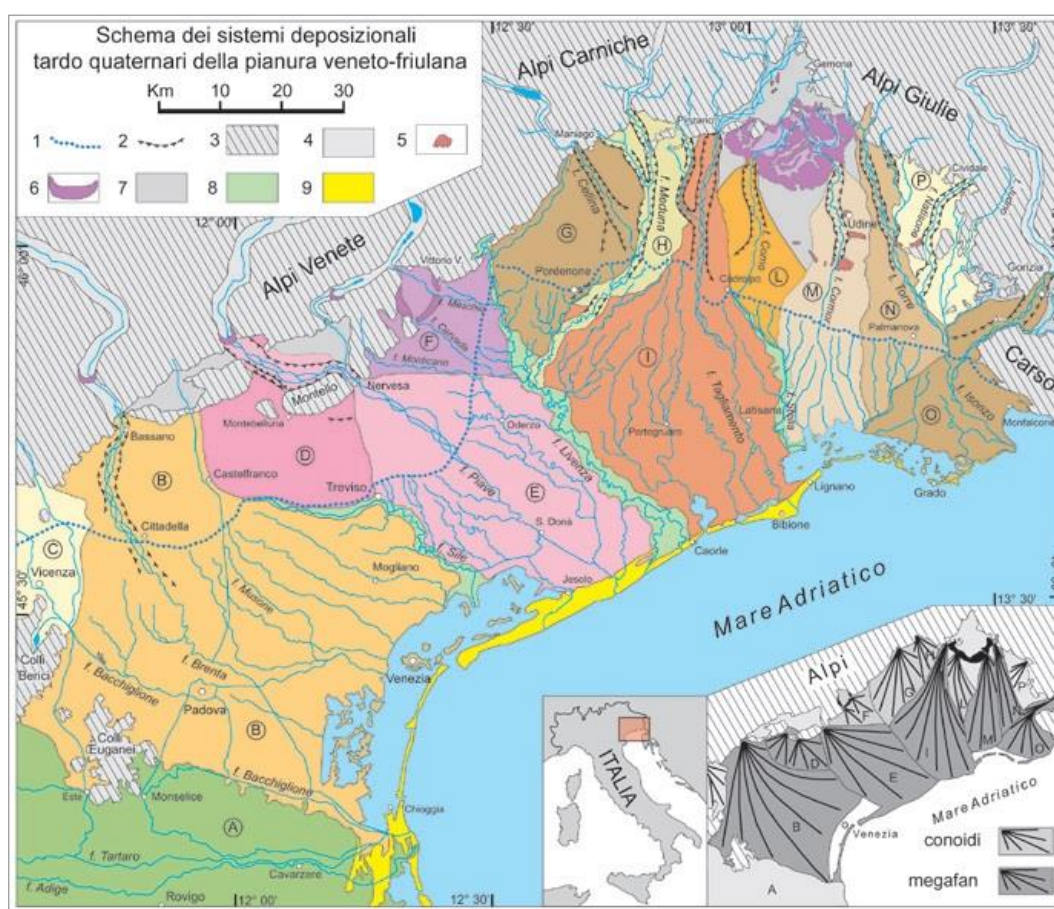


Figura 3.3 - Schema dei sistemi deposizionali tardo quaternari della pianura veneto-friulana. Nel riquadro in basso a destra uno schema semplificato dei conoidi e dei megafan. Simboli: (1) limite superiore delle risorgive; (2) orlo di terrazzo fluviale; (3) aree montuose e collinari; (4) principali valli alpine; (5) terrazzi tettonici; (6) cordoni morenici; (7) depositi di interconoide e delle zone intermontane; (8) depositi dei principali fiumi di risorgiva; (9) sistemi costieri e deltizi. Lettere: (A) pianura dell'Adige, (B) megafan del Brenta, (C) conoide dell'Astico, (D) megafan di Montebelluna, (E) megafan di Nervesa, (F) conoide del Monticane-Cervada-Meschio, (G) conoide del Cellina, (H) conoide del Meduna, (I) megafan del Tagliamento, (L) conoide del Natisone. (da Bondesan et al., 2016).

A partire dalle caratteristiche appena descritte si può suddividere il sottosuolo della pianura veneta in tre zone che si susseguono da monte verso valle. L'Alta Pianura, che si estende per una decina di chilometri dal margine prealpino, è costituita dalla coalescenza delle zone di apice dei megafan del Brenta, di Montebelluna e di Nervesa ed è quindi caratterizzata da depositi prevalentemente ghiaiosi con la presenza di alcuni livelli più o meno cementati. Più a valle, nella Media Pianura, i depositi diventano progressivamente più fini e fanno la loro comparsa le digitazioni con livelli limosi e argillosi. Questa fascia si estende per circa 5-10 km e nella porzione più meridionale gli spessori dei livelli ghiaiosi vanno ad esaurirsi gradualmente in favore di quelli a granulometria più fine. La Bassa Pianura, infine, ha una larghezza di circa 20 km e si protrae fino all'Adriatico, è caratterizzata da materiale generalmente fine (argille e limi con livelli sabbiosi), essendo questa l'area in cui ricadono le terminazioni dei megafan che a loro volta vengono intervallate dai sedimenti depositi durante le fasi di trasgressione marina.

La successiva evoluzione della pianura è stata controllata dalle condizioni climatiche successive all'ultimo acme glaciale: l'innalzamento delle temperature ha provocato l'arretramento delle lingue glaciali dalle valli prealpine con conseguente diminuzione del volume di materiale detritico messo a disposizione dei sistemi alluvionali. Da ciò deriva una nuova fase morfogenetica contraddistinta da processi di terrazzamento e incisione fluviale, accompagnati dai processi pedogenetici anch'essi resi possibili dal clima generalmente più caldo.

Infine è degno di nota l'impatto che le attività antropiche negli ultimi decenni hanno lasciato soprattutto sulla morfologia delle aste fluviali. Sono diverse le tipologie di intervento a cui sono stati sottoposti i corsi d'acqua o i loro bacini idrografici, in particolare, attività come la creazione di dighe, briglie e cave in alveo hanno ridotto sensibilmente la portata solida mobilizzata, innescando processi di incisione e restringimento dei corsi d'acqua, fenomeni a cui è stato particolarmente soggetto il fiume Brenta (Surian & Cisotto, 2007).

3.3 Inquadramento idrogeologico

Sulla base della struttura geologica descritta nel precedente paragrafo è possibile delineare i caratteri idrogeologici della Pianura Veneta.

La porzione di Alta Pianura, a ridosso dei rilievi montuosi, è costituita, come già accennato, da materiale prevalentemente ghiaioso-sabbioso per uno spessore di oltre 300 m. Questi depositi sono caratterizzati da una permeabilità elevata, dell'ordine di $10^{-3} - 10^{-4}$ m/s, e una porosità compresa tra il 10% il 20% e sono sede di un'unica falda libera in comunicazione idraulica con la superficie topografica ed il reticolo idrografico.

In prossimità della Media Pianura si riscontra la suddivisione delle ghiaie in livelli sub-orizzontali che vedono il loro spessore diminuire gradualmente verso Sud per poi esaurirsi, a distanze diverse, entro materiale più fine tipico delle aree di Bassa Pianura. Si vengono a così a creare diversi orizzonti acquiferi confinati, in successione verticale (sistema multi-falda), collegati all'acquifero indifferenziato presente nell'Alta Pianura che ne rappresenta, quindi, l'area di ricarica (Figura 3.4). Nell'ambito di questo lavoro, l'attenzione sarà d'ora in avanti rivolta all'acquifero freatico indifferenziato presente nel settore di Alta Pianura.

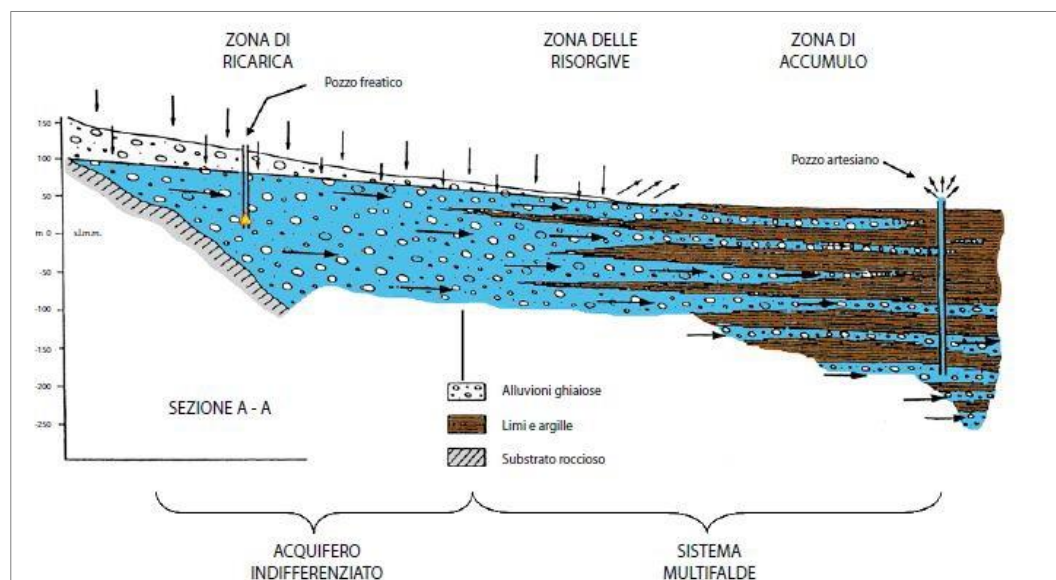


Figura 3.4 - Schema idrogeologico dell'Alta e Media Pianura Veneta (Dal Prà, 1978).

Le principali fonti di alimentazione dell'acquifero freatico indifferenziato sono: [1] le precipitazioni, [2] l'irrigazione, [3] le dispersioni dei corsi d'acqua e [4] il contributo di alimentazione proveniente dagli acquiferi fratturati carsici situati a monte dell'area di studio.

La falda può assestarsi a quote molto variabili, ma è possibile notare una generale diminuzione della soggiacenza (e del carico idraulico) procedendo dalle aree adiacenti ai rilievi montuosi verso valle, con una direzione prevalente di flusso da N-W verso S-E (Figura 3.5). La falda, inoltre, trova la sua naturale emergenza in prossimità della zona delle risorgive (Media Pianura), una fascia di larghezza compresa tra i 2 e i 10 km, delimitata dall'intersezione della superficie freatica con la superficie topografica (limite superiore) e dall'affioramento più settentrionale dei corpi argillosi (limite inferiore). Mentre la posizione del limite inferiore è fissa, quella superiore può variare nel tempo, migrando periodicamente verso valle o verso monte in funzione delle oscillazioni piezometriche.

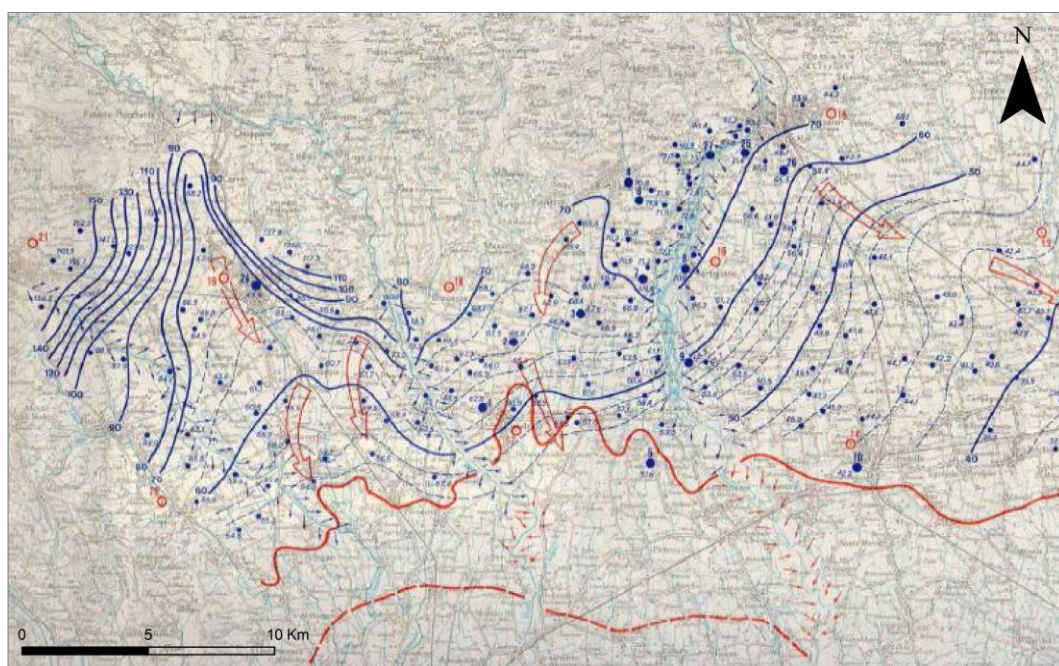


Figura 3.5 - Carta isopotenziometrica dell'acquifero freatico indifferenziato dell'Alta Pianura Veneta tra i corsi dei fiumi Astico e Brenta (Dal Prà, 1983).

4 Dati idrogeologici di base

Per una corretta definizione del modello idrogeologico concettuale, in relazione agli obiettivi di questo studio, è necessario considerare i dati idrogeologici che fanno riferimento a tutti i fattori che concorrono al bilancio idrogeologico dell'area analizzata. I dati raccolti fanno quindi riferimento a:

- *dati meteo - climatici* di temperatura e precipitazione, con lo scopo di definire il regime climatico e gli afflussi sull'area;
- *portate e livelli idrometrici* delle principali aste fluviali che attraversano il territorio in esame;
- dati riguardanti *l'irrigazione* e i *prelievi* a scopo idropotabile;
- *livelli freatici* dell'acquifero.

4.1 Dati meteo-climatici

Per la caratterizzazione del regime climatico dell'area, i dati sono stati reperiti dal *Geoportale* della Regione Veneto (<http://idt.regione.veneto.it/app/metacatalog/>), che mette a disposizione l'altezza di precipitazione (mm), il numero di giorni piovosi, la radiazione solare globale (MJ/m²), la temperatura dell'aria a 2 metri (°C), l'umidità relativa a 2 metri (%), la velocità del vento a 5 metri (m/s), la direzione del vento prevalente a 5 metri. I dati si riferiscono alle 178 stazioni di rilevazione in Veneto e sono forniti su base mensile o annua, dal 1 gennaio 1994 al 31 dicembre 2016.

Per gli scopi di questo lavoro sono stati considerati solo i dati di temperatura media mensile e precipitazione media mensile nel periodo compreso tra il 2010 e il 2015 relativi alle stazioni poste entro circa 10 km dai limiti dell'area esaminata, prediligendo quelle che acquisiscono entrambi i parametri.

Le singole stazioni sono descritte in Tabella 4-1 mentre la loro ubicazione è mostrata in Figura 4.1 e in Figura 4.2.

ID	Nome	X_GBO_m	Y_GBO_m	Quota_mslm	Comune	Prov.	Parametro
232	Bassano del Grappa	1712258	5073804	128	Bassano Del Grappa	VI	T-h
577	Breda di Piave Via Bovon	1762883	5069049	17	Breda Di Piave	TV	T-h
147	Breganze	1700519	5066236	182	Breganze	VI	T-h
102	Castelfranco Veneto	1729544	5064403	50	Castelfranco Veneto	TV	T-h
110	Cittadella	1717437	5060795	56	Cittadella	PD	T-h
100	Conegliano	1754728	5086125	83	Conegliano	TV	T-h
156	Crespano del Grappa	1720610	5080406	401	Crespano Del Grappa	TV	T-h
195	Farra di Soligo	1740846	5087888	172	Farra Di Soligo	TV	T-h
177	Grantorto	1714504	5052654	31	Grantorto	PD	T-h
139	Lusiana	1701210	5073345	772	Lusiana	VI	T-h
197	Maser	1728768	5073708	101	Maser	TV	T-h
83	Montecchio Precalcino	1698530	5059290	74	Montecchio Precalcino	VI	T-h
82	Pove del Grappa - Costalunga	1712940	5076113	675	Pove Del Grappa	VI	T-h
153	Quinto Vicentino	1705283	5049560	33	Quinto Vicentino	VI	T-h
187	Roncade	1764703	5059832	6	Roncade	TV	T-h
144	Rosa'	1716095	5066330	85	Rosa'	VI	T-h
122	Trebaseleghe	1736015	5054913	23	Trebaseleghe	PD	T-h
220	Treviso	1750868	5063692	20	Treviso	TV	T-h
189	Valdobbiadene - Bigolino	1733368	5085364	222	Valdobbiadene	TV	T-h
185	Vazzola - Tezze	1759626	5078592	40	Vazzola	TV	T-h
188	Villorba	1751649	5071267	41	Villorba	TV	T-h
183	Volpago del Montello	1742000	5074920	125	Volpago Del Montello	TV	T-h
184	Zero Branco	1747685	5053500	12	Zero Branco	TV	T-h

Tabella 4-1 – Descrizione delle stazioni meteo gestite dall'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Regione Veneto (ARPAV) selezionate per le successive elaborazioni. Abbreviazioni: (ID) codice identificativo della stazione; (Nome) nome della stazione; (X_GBO_m; Y_GBO_m) coordinate X e Y del sistema di riferimento utilizzato (Roma 1940, Gauss-Boaga fuso Ovest); (Quota_mslm) quota altimetrica della stazione; (Comune, Prov.) comune e provincia di appartenenza; (Parametro) parametro acquisito (T, temperatura; h, altezza di precipitazione).

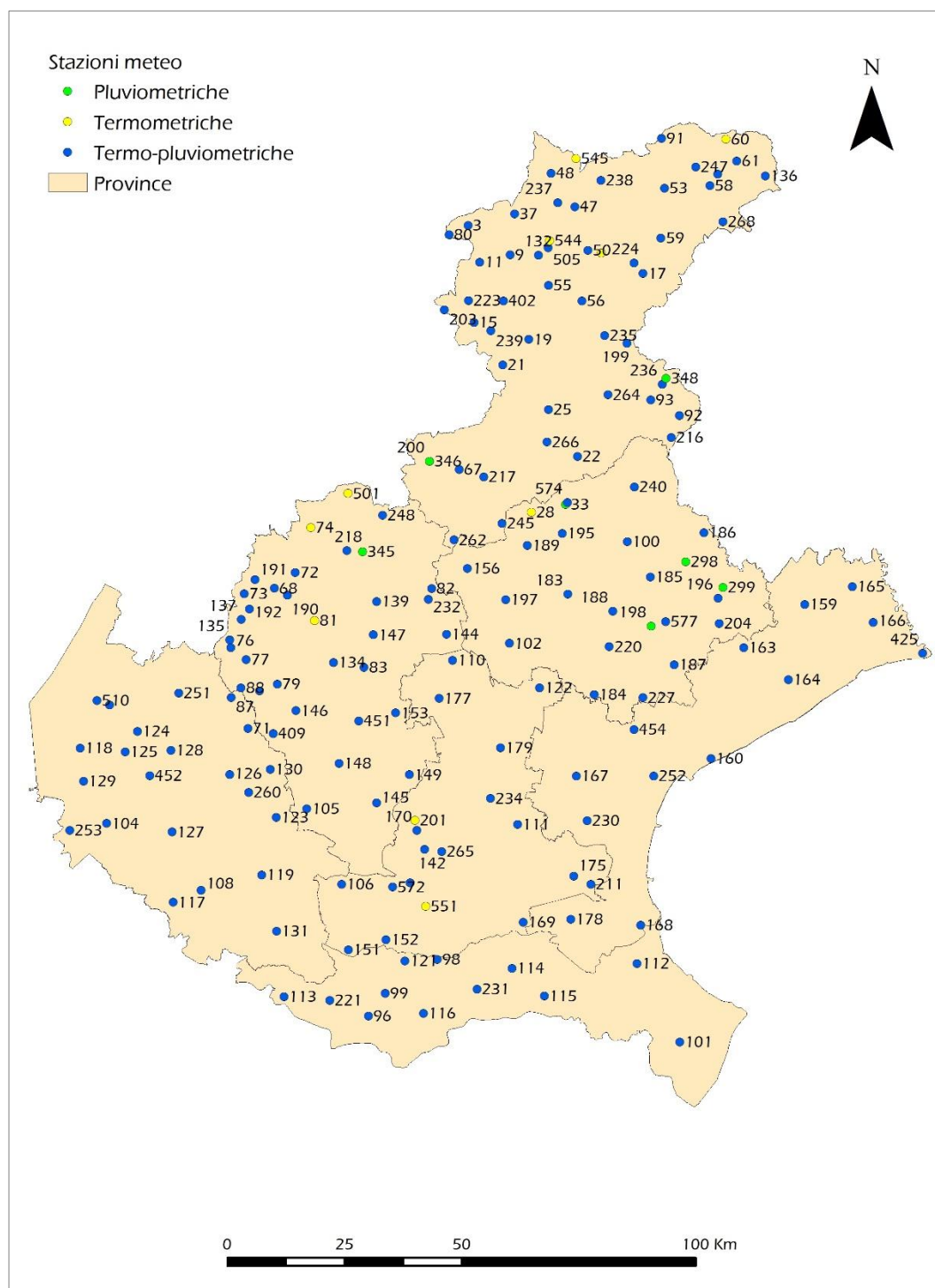


Figura 4.1 – Ubicazione delle stazioni meteo della Regione Veneto.

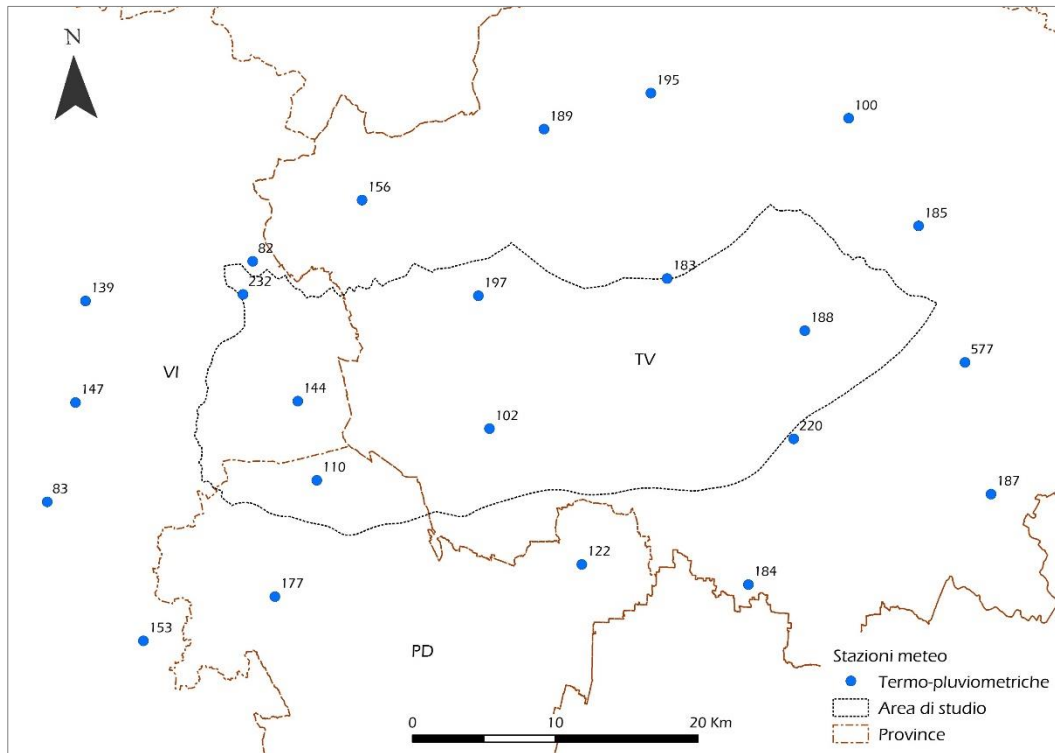


Figura 4.2 – Ubicazione delle stazioni meteo selezionate.

Successivamente sono stati calcolati i valori medi mensili (Tabella 4-2, Figura 4.3) e medi annui (Tabella 4-3, Figura 4.4) di temperatura e precipitazione utilizzando tutti i dati acquisiti da ogni stazione selezionata nel periodo 2010-2015.

Parallelamente a queste analisi, è stato effettuato il calcolo dell'evapotraspirazione per poter decurtare dal volume d'acqua precipitata, l'aliquota che ritorna in atmosfera. In questa fase è stata utilizzata la formulazione empirica di *Turc* (Strauhal et al., 2015), espressa come segue:

$$EVTr [mm/anno] = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P}{I}\right)^2}} \quad 4-1$$

$$I = 300 + 25T_A + 0.05T_A^3 \quad 4-2$$

dove P è la precipitazione annua in millimetri, mentre T_A è la temperatura media annua. Questa formulazione fornisce il valore dell'evapotraspirazione reale ($EVTr$),

su base annua, a partire esclusivamente dai valori di precipitazione e temperatura, per cui il calcolo è stato effettuato partendo dai valori medi annui, relativi a ogni stazione, di queste due grandezze meteorologiche. Di seguito (Tabella 4-4) vengono riportati i valori medi del periodo 2010-2015 di precipitazione, temperatura ed evapotraspirazione reale relativi a tutte le stazioni selezionate.

<i>Mese</i>	<i>Avg_h [mm]</i>	<i>Avg_T [°C]</i>
Gennaio	99.2	3.5
Febbraio	105.6	4.7
Marzo	112.4	9.1
Aprile	74.6	13.4
Maggio	147.3	17.1
Giugno	108.6	21.4
Luglio	108.1	23.8
Agosto	97.5	23.1
Settembre	113.2	18.9
Ottobre	131.5	13.6
Novembre	187.6	9.1
Dicembre	80.8	4.3

Tabella 4-2 – Valori medi mensili di precipitazione e temperatura ottenuti a partire dai dati acquisiti da tutte le stazioni selezionate per il periodo compreso tra il 2010 e il 2015. Abbreviazioni: (Avg_h [mm]) altezza di precipitazione media espressa in millimetri; (Avg_T [°C]) temperatura media espressa in gradi centigradi.

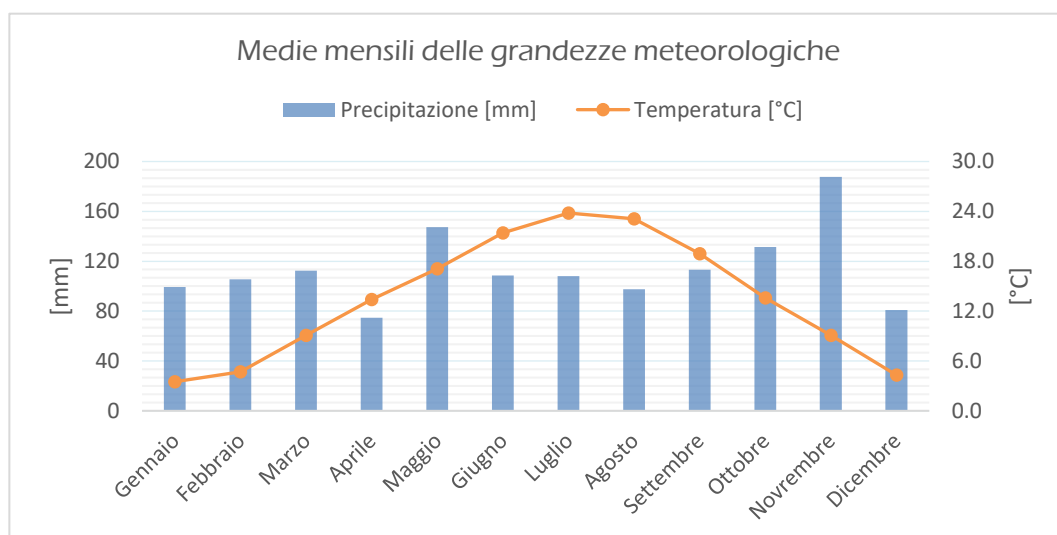


Figura 4.3 – Grafico del regime termo-pluviometrico mensile per il periodo 2010-2015 ottenuto mediando i valori medi relativi ad ogni stazione selezionata.

Anno	Avg_h [mm]	Avg_T [°C]
2010	1766.2	12.6
2011	1071.8	13.7
2012	1155.2	13.5
2013	1394.7	13.3
2014	1929.6	14.1
2015	881.4	13.8

Tabella 4-3 – Valori medi annui di precipitazione e temperatura ottenuti a partire dai dati acquisiti da tutte le stazioni selezionate per il periodo compreso tra il 2010 e il 2015. Abbreviazioni: (Avg_h [mm]) altezza di precipitazione media espressa in millimetri; (Avg_T [°C]) temperatura media espressa in gradi centigradi.

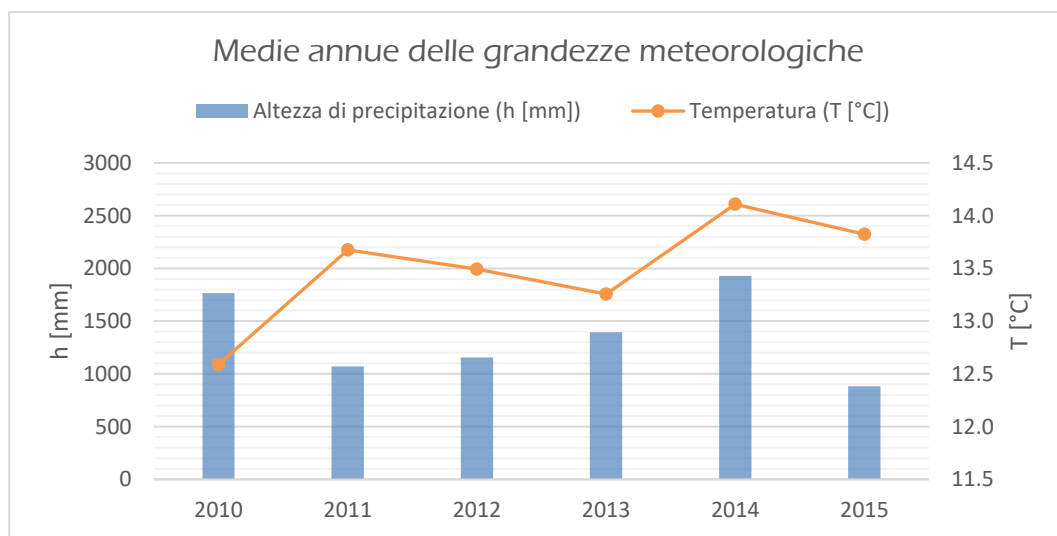


Figura 4.4 – Grafico del regime termo-pluviometrico annuo per il periodo 2010-2015 ottenuto mediando i valori medi di ogni stazione selezionata.

<i>ID</i>	<i>Avg_h [mm/y]</i>	<i>Avg_T [°C]</i>	<i>Avg_EVTr [mm/y]</i>
82	1613.7	11.8	619.5
83	1486.5	13.8	682.8
100	1413.5	14.6	701.4
102	1285.8	13.7	655.0
110	1264.9	14.1	659.9
122	1090.4	13.6	622.1
139	1760.2	10.7	586.9
144	1304.0	14.3	678.3
147	1525.9	14.1	699.8
153	1207.9	13.8	641.5
156	1770.7	12.0	636.4
177	1175.8	13.6	633.4
183	1327.7	13.9	665.2
184	1082.3	13.7	614.9
185	1265.0	13.6	646.4
187	1098.9	13.5	614.3
188	1257.0	13.4	642.7
189	1666.4	13.5	687.1
195	1678.1	13.5	687.7
197	1329.5	13.6	660.7
220	1210.2	13.8	645.7
232	1515.5	14.1	698.8
577	1099.5	13.6	623.6
Medie	1366.5	13.5	652.3

Tabella 4-4 – Valori medi di precipitazione, temperatura ed evapotraspirazione relativi a tutte le stazioni selezionate per il periodo 2010-2015. Abbreviazioni: (ID) codice identificativo della stazione; (Avg_h [mm/y]) precipitazione media annua in millimetri; (Avg_T [°C]) temperatura media annua; (Avg_EVTr [mm/y]) evapotraspirazione reale media annua in millimetri.

Osservando il primo grafico (Figura 4.3) si evince che, mediamente durante l'anno, il regime pluviometrico dell'area in esame presenta un carattere prevalentemente bimodale, mostrando un massimo relativo a maggio, con 146 mm di precipitazione, e un massimo assoluto a novembre con 185 mm di precipitazione; i minimi relativi si registrano, invece, nei mesi di aprile, agosto e dicembre. L'andamento delle temperature, invece, mostra un graduale aumento fino al raggiungimento del picco nel corso del mese di luglio (23.8 °C), per poi diminuire nei mesi successivi.

Considerando l'intero periodo temporale di riferimento (Figura 4.4), il *trend* delle precipitazioni mostra un massimo durante il 2014 (1929.6 mm), seguito dall'anno più secco dell'arco temporale con soli 881.4 mm di precipitazione registrati nel 2015. Dal punto di vista termico, sebbene si sia assistito ad un generale aumento delle temperature, è da evidenziare come queste siano diminuite nel biennio 2012-2013 con un minimo relativo di 13.3 °C proprio durante quest'ultimo anno.

Infine, è stato effettuato un confronto a più ampio respiro, reperendo dati meteo-climatici dalla letteratura di settore che fanno capo a serie temporali antecedenti a quella presa come riferimento nell'ambito di questo lavoro.

Di seguito (Tabella 4-5, Figura 4.5, Figura 4.6, Figura 4.7) vengono confrontati i valori medi di precipitazione, evapotraspirazione e temperatura per i periodi 2010-2015 e 1996-2007 (Fabbri et al., 2016) relativi alle stazioni meteo comuni ad entrambe le serie.

ID	2010-2015			1996-2007		
	Avg_h [mm/y]	Avg_T [°C]	Avg_EVTr [mm/y]	Avg_h [mm/y]	Avg_T [°C]	Avg_EVTr [mm/y]
102	1285.8	13.7	655.0	1036.0	12.9	607.0
110	1264.9	14.1	659.9	1069.0	13.2	621.0
144	1304.0	14.3	678.3	1190.0	13.6	631.0
183	1327.7	13.9	665.2	1125.0	13.2	631.0
188	1257.0	13.4	642.7	1057.0	12.5	599.0
197	1329.5	13.6	660.7	1107.0	12.9	619.0
220	1210.2	13.8	645.7	1063.0	13.9	641.0
232	1515.5	14.1	698.8	1217.0	14.0	671.0

Tabella 4-5 – Confronto dei dati meteo-climatici per le serie temporali 2010-2015 e 1996-2007. Abbreviazioni: (ID) codice identificativo della stazione; (Avg_h [mm/y]) altezza di precipitazione media annua in millimetri; (Avg_T [°C]) temperatura media annua; (Avg_EVTr [mm/y]) evapotraspirazione media annua in millimetri.

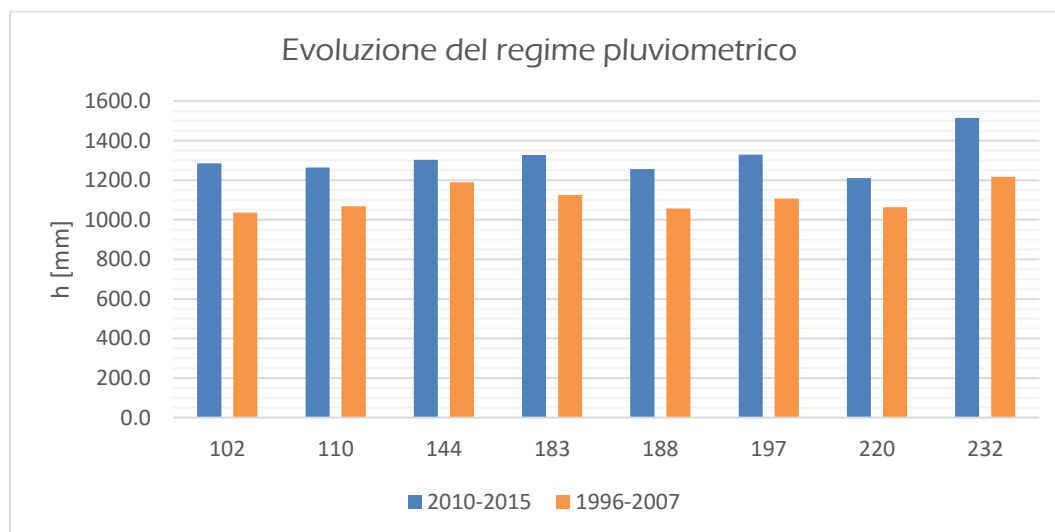


Figura 4.5 – Regime pluviometrico medio per i periodi 2010-2015 e 1996-2007. Sulle ascisse è riportato il codice identificativo delle stazioni meteo usate per effettuare il confronto.

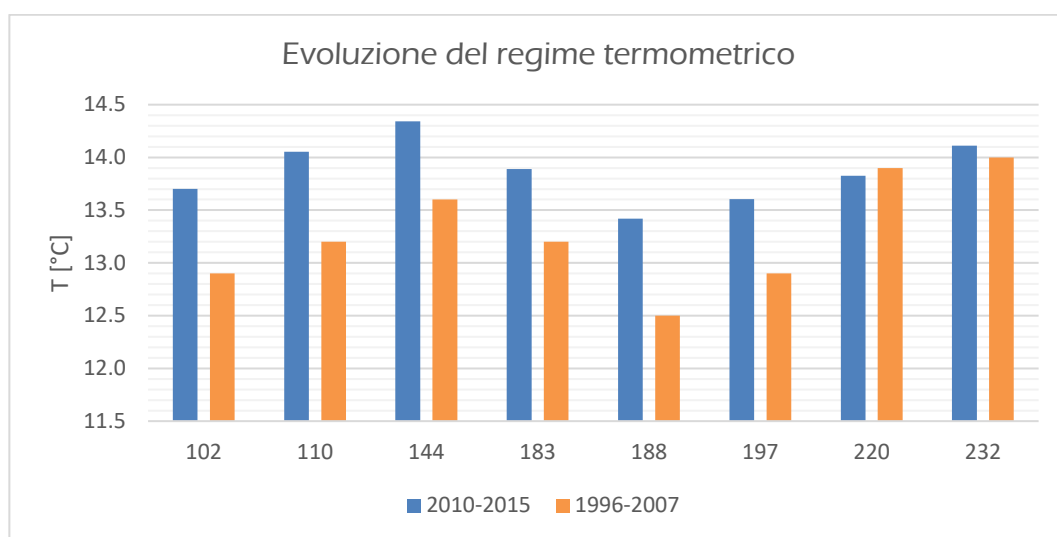


Figura 4.6 – Regime termometrico medio per i periodi 2010-2015 e 1996-2007. Sulle ascisse è riportato il codice identificativo delle stazioni meteo usate per effettuare il confronto.

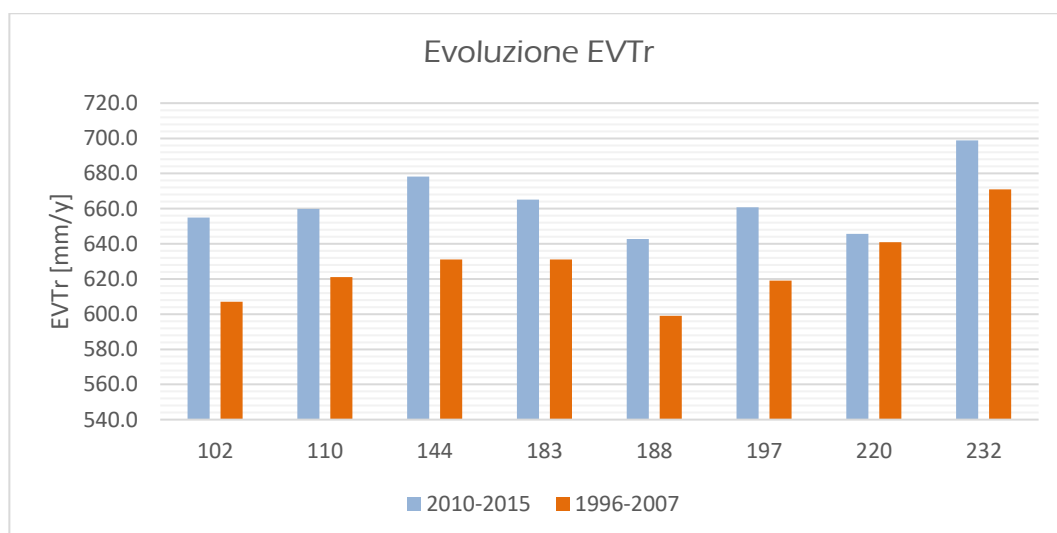


Figura 4.7 – Evapotraspirazione media per i periodi 2010-2015 e 1996-2007. Sulle ascisse è riportato il codice identificativo delle stazioni meteo usate per effettuare il confronto.

Dai grafici è possibile constatare come l'area sia stata soggetta ad un'intensificazione, talvolta anche significativa, sia del regime pluviometrico che di quello termometrico. In particolare, analizzando le altezze di precipitazione, si nota come, rispetto al periodo 1996-2007, si sia verificato un aumento percentuale medio della lama di precipitazione del +18% circa (+200 mm); sul lato termico invece, fatta eccezione per le stazioni di Bassano del Grappa (ID 232) e Treviso (ID 220), che

non hanno rilevato variazioni significative, si è assistito ad un aumento percentuale medio della temperatura del +6% circa (+0.7°C).

Nonostante le precipitazioni si siano mantenute sui livelli del decennio precedente, l'incremento delle temperature ha comportato un aumento medio del volume di acqua restituita in atmosfera per evapotraspirazione del +5.8% circa, corrispondente ad un incremento della lama d'acqua evapotraspirata di +36 mm/anno.

4.2 Portate e livelli idrometrici

Un'altra componente a fornire un importante contributo alla ricarica della falda è costituita dalle dispersioni provenienti dall'alveo dei corsi d'acqua, fenomeno che è favorito, nell'area in esame, dalla presenza di materiale ghiaioso idraulicamente molto conduttivo, e si verifica nel caso in cui il livello idrometrico del fiume si trovi ad una quota superiore a quella del livello freatico; in una configurazione opposta, invece, sarà la falda ad alimentare il fiume che di conseguenza manifesterà un comportamento drenante.

Per poter rappresentare fedelmente la relazione tra corsi d'acqua e acquifero, sono stati raccolti dati relativi sia ai livelli idrometrici che alle portate per il periodo 2010-2015 di tutte le stazioni di monitoraggio dei principali corsi d'acqua presenti nell'area di studio, reperendoli dal sito dell'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Regione Veneto (ARPAV) nell'apposita sezione dedicata (http://www.arpa.veneto.it/bollettini/storico/Mappa_2017_LIVIDRO.htm?t=RG).

La descrizione delle stazioni è riportata in Tabella 4-6, la loro ubicazione è mostrata in Figura 4.8 mentre in Figura 4.9 è riportata l'ubicazione delle stazioni selezionate.

<i>ID</i>	<i>Nome</i>	<i>X_GBO_m</i>	<i>Y_GBO_m</i>	<i>Quota_mslm</i>	<i>Zero_idro_mslm</i>	<i>Parametro</i>
283	Brenta a Barziza	1712266	5073017	125.00	105.31	H-Q
302	Brenta a Limena	1720833	5043497	52.00	14.11	H
292	Muson dei Sassi a Castelfranco Veneto	1727493	5061659	47.00	38.28	H-Q
309	Piave a Nervesa della Battaglia	1749151	5080322	90.00	78.30	H
316	Piave a Ponte di Piave	1769204	5066443	11.00	2.42	H

Tabella 4-6 – Descrizione delle stazioni idrometriche gestite dall'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Regione Veneto (ARPAV) selezionate per le successive elaborazioni. Abbreviazioni: (ID) codice identificativo della stazione; (Nome) nome della stazione; (X_GBO_m; Y_GBO_m) coordinate X e Y del sistema di riferimento adottato (Roma 1940, Gauss-Boaga fuso Ovest); (Quota_mslm) quota altimetrica della stazione; (Zero_mslm) quota altimetrica dello zero idrometrico; (Parametro) parametro acquisito (H, livello idrometrico; Q, portata).

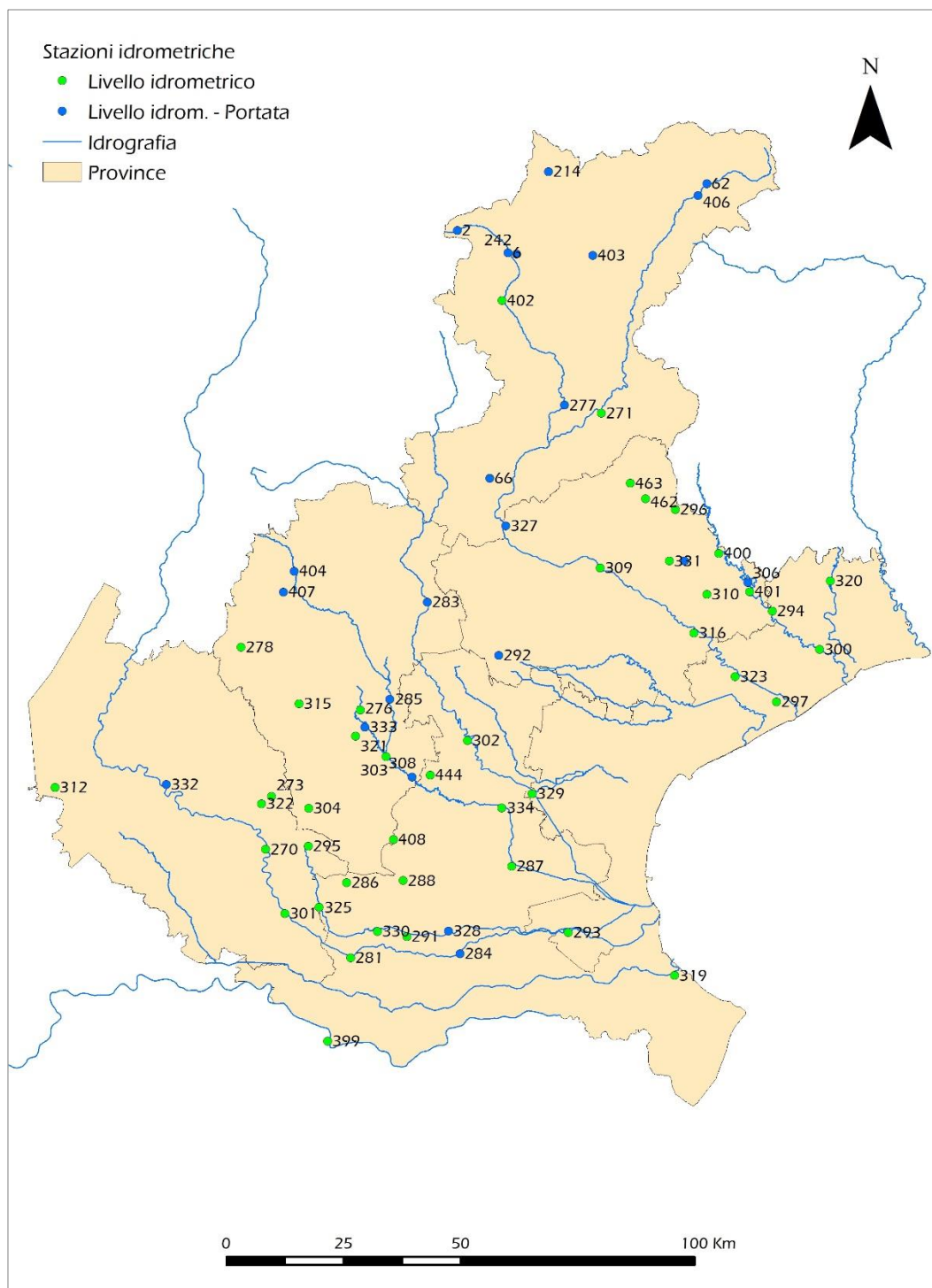


Figura 4.8 – Ubicazione delle stazioni idrometriche della Regione Veneto.

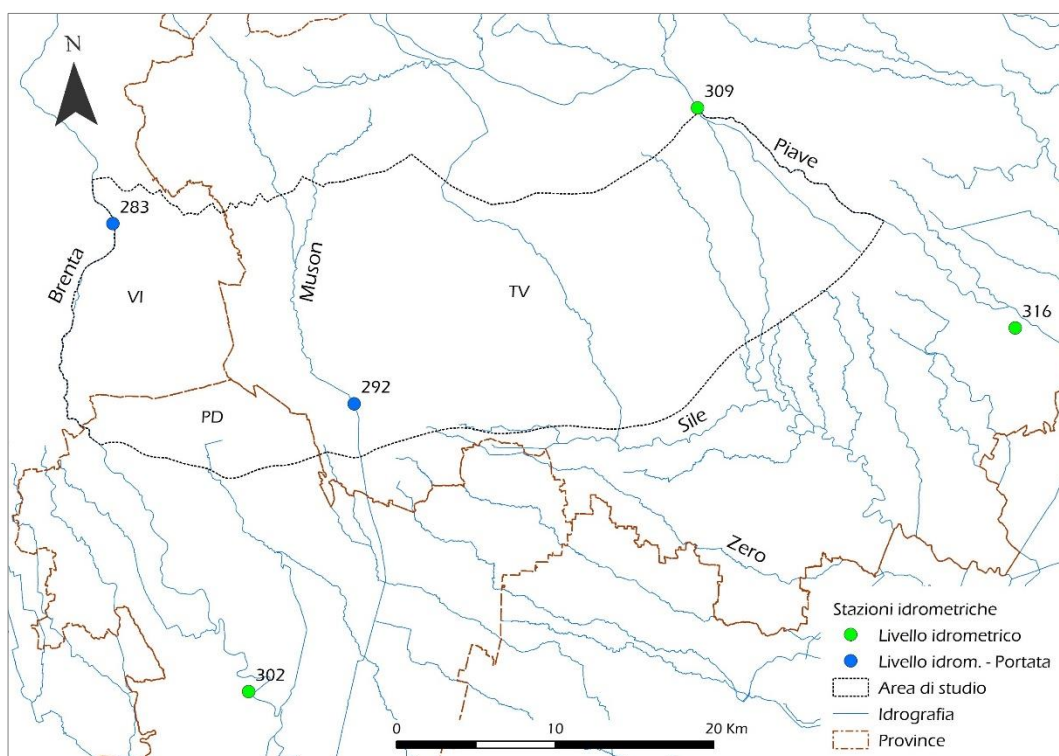


Figura 4.9 – Ubicazione delle stazioni idrometriche selezionate.

Come per i dati meteo-climatici, sono stati calcolati i valori medi mensili (Tabella 4-7) ed annui (Tabella 4-8) per il periodo 2010-2015 dei livelli idrometrici (rilevati rispetto allo zero idrometrico) relativi alle cinque stazioni selezionate.

Mese	Avg_H [m]				
	ID 283	ID 302	ID 309	ID 316	ID 292
Gennaio	1.06	0.94	0.31	0.78	0.35
Febbraio	1.01	0.80	0.32	0.86	0.39
Marzo	1.04	0.79	0.34	0.77	0.34
Aprile	1.20	0.98	0.38	0.76	0.33
Maggio	1.37	1.22	0.56	1.12	0.37
Giugno	1.20	0.84	0.42	0.77	0.32
Luglio	1.03	0.33	0.27	0.53	0.26
Agosto	0.97	0.24	0.26	0.54	0.26
Settembre	0.97	0.61	0.29	0.57	0.28
Ottobre	1.02	0.71	0.36	0.67	0.29
Novembre	1.44	1.41	0.66	1.63	0.46
Dicembre	1.08	0.88	0.37	0.90	0.34

Tabella 4-7 - Valori medi mensili dei livelli idrometrici rilevati rispetto allo zero idrometrico nelle stazioni idrometriche selezionate. Abbreviazioni: (Avg_H [m]) livello idrometrico medio espresso in metri.

<i>Avg_H [m]</i>					
<i>Anno</i>	ID 283	ID 302	ID 309	ID 316	ID 292
2010	1.23	1.05	0.33	0.92	0.44
2011	1.05	0.73	0.18	0.66	0.30
2012	0.96	0.28	0.21	0.72	0.22
2013	1.16	0.99	0.31	0.83	0.32
2014	1.40	1.39	0.77	1.28	0.43
2015	0.89	0.42	0.48	0.53	0.28

Tabella 4-8 - Valori medi annui dei livelli idrometrici rilevati rispetto allo zero idrometrico nelle stazioni idrometriche selezionate. Abbreviazioni: (Avg_H [m]) livello idrometrico medio espresso in metri.

Analogamente ai dati meteo, la stessa analisi è stata eseguita anche per le portate registrate nelle stazioni idrometriche di Barziza (ID 283) e di Castelfranco Veneto (ID 292), mettendole in relazione ai regimi pluviometrici mensili ed annui discussi in precedenza (Tabella 4-9, Tabella 4-10; Figura 4.10, Figura 4.11).

<i>Portate medie mensili [m³/s]</i>		
<i>Mese</i>	ID 283	ID 292
Gennaio	63.25	3.07
Febbraio	62.41	3.65
Marzo	65.10	2.89
Aprile	86.53	2.54
Maggio	122.23	3.22
Giugno	82.51	2.57
Luglio	58.83	1.83
Agosto	52.28	1.92
Settembre	50.14	1.95
Ottobre	59.87	2.30
Novembre	145.81	5.01
Dicembre	74.82	3.04

Tabella 4-9 – Valori medi mensili di portata registrati nelle stazioni di Barziza (283) e Castelfranco Veneto (292).

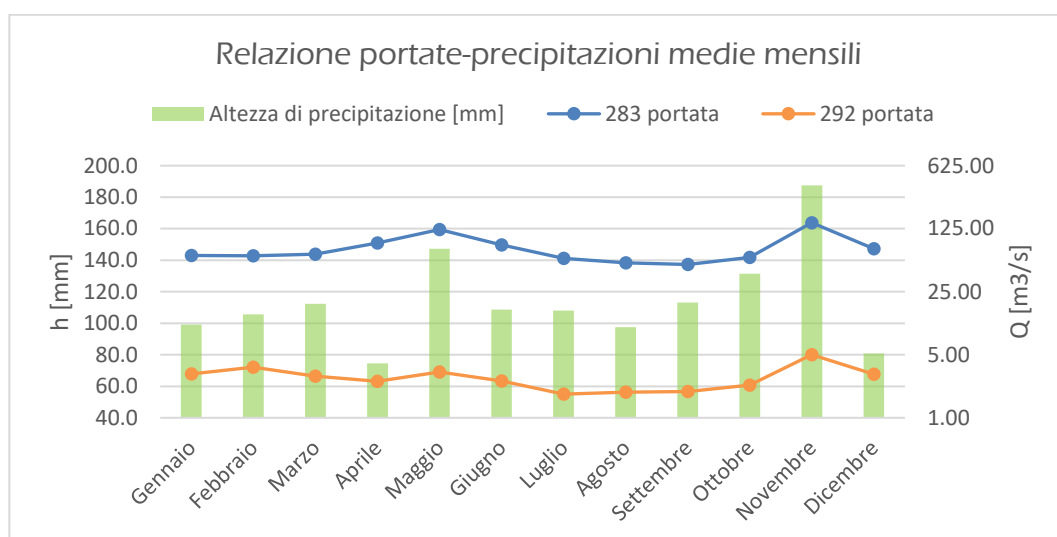


Figura 4.10 – Confronto tra le portate medie mensili registrate nelle stazioni di Barziza (283) e Castelfranco Veneto (292) con le medie mensili delle precipitazioni.

Portate medie annue [m^3/s]		
Anno	ID 283	ID 292
2010	92.49	3.68
2011	61.81	2.25
2012	55.62	1.83
2013	83.17	3.17
2014	120.14	4.40
2015	48.4	1.61

Tabella 4-10 – Valori medi annui delle portate registrate nelle stazioni di Barziza (283) e Castelfranco Veneto (292).

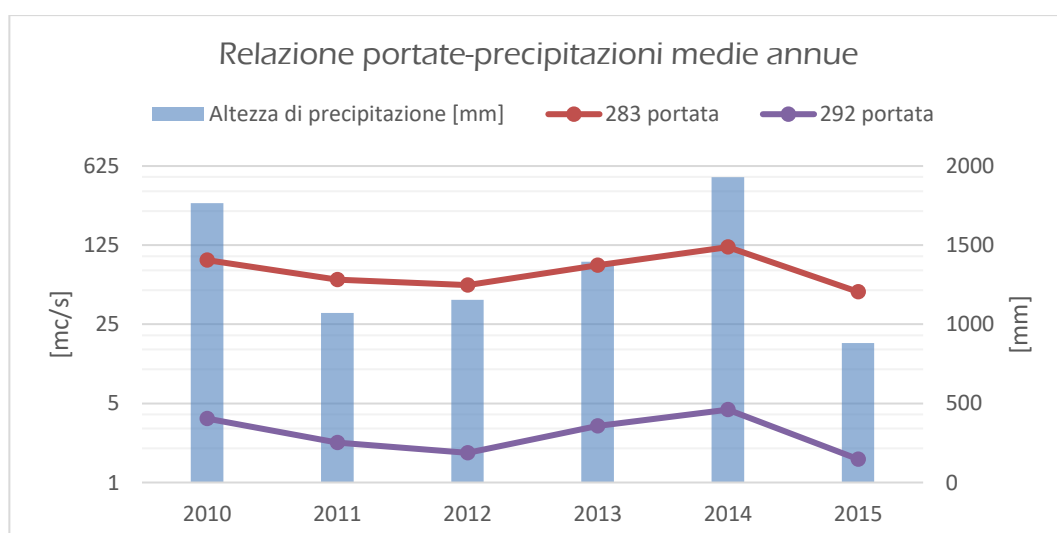


Figura 4.11 – Confronto tra le portate medie annue registrate nelle stazioni di Barziza (283) e Castelfranco Veneto con le medie annue delle precipitazioni.

Osservando i grafici, appare evidente, nonostante il regime pluviometrico dell'area in esame non rappresenti quello dei bacini di drenaggio dei corsi d'acqua che attraversano l'Alta Pianura, come ci sia una diretta corrispondenza tra l'andamento delle piogge e le portate in alveo, sia su base annua, dove si può notare la risposta dei corsi d'acqua al picco di precipitazione avvenuto nel 2014, sia su base mensile dove il regime delle portate rispecchia fedelmente il carattere bimodale delle precipitazioni.

In Tabella 4-11, infine, sono riportati i valori medi di livello idrometrico e portata delle cinque stazioni idrometriche selezionate per l'intero periodo 2010-2015.

ID	Zero_idro [mslm]	Avg_H [m]	Avg_Q [m ³ /s]
283	105.31	1.12	76.95
302	38.28	0.81	-
292	14.11	0.33	2.82
309	78.3	0.38	-
316	2.42	0.82	-

Tabella 4-11 - Livelli idrometrici e portate medie delle stazioni selezionate per l'intero periodo di riferimento 2010-2015. Abbreviazioni: (ID) codice identificativo della stazione; (Zero_idro [mslm]) quota dello zero idrometrico in metri sul livello del mare; (Avg_H [m]) livello idrometrico medio; (Avg_Q [m³/s]) portata media in metri cubi al secondo.

Per sopperire alla mancanza di valori di portata sono stati considerati, inoltre, dati relativi alla portata dispersa in alveo dai fiumi Brenta e Piave da lavori precedentemente svolti in questa stessa area (Fabbri et al., 2016; Cambruzzi et al., 2010).

Dai lavori citati è emerso come il fiume Brenta manifesti un doppio comportamento nell'area in esame: disperdente nel tratto superiore fino a Friola, drenante nel tratto immediatamente a valle, drenando una portata pari a $1.31\text{E}+08 \text{ m}^3/\text{anno}$ ($4.1 \text{ m}^3/\text{s}$).

Per quanto riguarda le dispersioni i valori stimati dagli studi sono qui riassunti:

- Portata dispersa dal fiume Brenta: $2.48\text{E}+08 \text{ m}^3/\text{anno}$ ($7.86 \text{ m}^3/\text{s}$).
- Portata dispersa dal fiume Piave: $3.11\text{E}+08 \text{ m}^3/\text{anno}$ ($9.86 \text{ m}^3/\text{s}$).

4.3 Irrigazione e prelievi

Le ultime componenti da considerare nel bilancio idrogeologico sono quelle di origine antropica, ovvero gli afflussi derivanti dalla pratica irrigua e lo sfruttamento delle acque sotterranee per l'approvvigionamento idropotabile e per gli usi industriale e privato.

4.3.1 Irrigazione

La distribuzione irrigua gestita dai Consorzi di Bonifica costituisce il principale contributo antropico all'alimentazione dell'acquifero in Alta Pianura, ed è generalmente considerato superiore all'apporto derivante dalle precipitazioni (Progetto TRUST, 2009). Nell'area oggetto di studio sono presenti tre enti: il Consorzio di Bonifica del Brenta, quello del Piave e il Consorzio Acque Risorgive, anche se quest'ultimo occupa un'area più marginale rispetto ai primi due (Figura 4.12). L'adacquamento irriguo nell'area si avvale sia della tecnica tradizionale per espansione superficiale (o scorrimento), poco efficiente dal punto di vista irriguo per via delle notevoli perdite d'acqua, destinate comunque ad alimentare la falda, sia di quella per asperzione (o pluvirriguo) sfruttando sia il carico idraulico determinato dalla topografia sia impianti di sollevamento. È tuttora in atto un processo di trasformazione irrigua che vedrà una riduzione delle aree adacquate per espansione superficiale in favore delle aree gestite con impianti pluvirrigui.

Per ottenere un valore di infiltrazione derivante dall'irrigazione da sommare, in fase di implementazione del modello, al contributo delle piogge, si è partiti dai dati reperibili in letteratura, che vedono il volume d'acqua totale impiegato nell'area ammontare a $1.51\text{E}+09 \text{ m}^3/\text{anno}$, a cui vanno sottratti l'aliquota persa per evapotraspirazione, determinata attraverso un coefficiente pari a 0.9, per gli impianti ad asperzione, e a 0.4 per la tecnica ad espansione superficiale (Fabbri et al., 2016). La portata infiltrata in tutta l'area ammonta quindi a circa $6.03\text{E}+08 \text{ m}^3/\text{anno}$ a cui corrisponde una lama d'acqua di circa 815 mm/anno (Tabella 4-12).

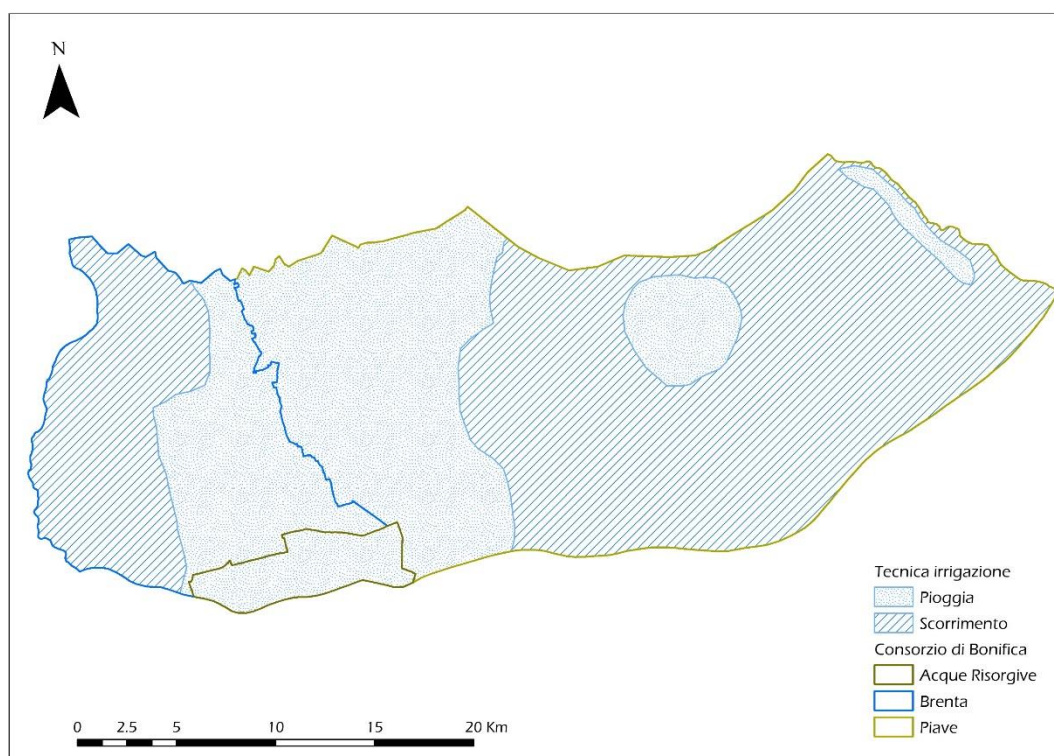


Figura 4.12 – Aree di competenza dei Consorzi di Bonifica e distribuzione areale delle principali tecniche di adacquamento. (Modificato da Fabbri et al., 2016).

Consorzio	Tecnica_irrig	EVT [%]	A [km ²]	Q_in [m ³ /s]	Q_EVT [m ³ /s]	Q_inf [m ³ /s]
Acque Risor.	Aspersione	90%	27.76	1.79	1.61	0.18
Brenta	Aspersione	90%	77.47	5.00	4.50	0.50
Brenta	Espansione sup.	40%	104.49	6.74	2.70	4.04
Piave	Espansione sup.	40%	340.57	21.97	8.79	13.18
Piave	Aspersione	90%	191.52	12.35	11.12	1.24
SOMMA			741.81	47.85	28.71	19.14

Tabella 4-12 – Calcolo della portata infiltrata derivante dalla pratica irrigua. Abbreviazioni: (Tecnica_irrig) tecnica di irrigazione; (EVT [%]) coefficiente di evapotraspirazione applicato; (A [km²]) estensione areale del settore considerato; (Q_in [m³/s]) portata in ingresso; (Q_EVT [m³/s]) portata in uscita per evapotraspirazione; (Q_inf [m³/s]) portata infiltrata. I diversi settori si riferiscono a quelli mostrati in Figura 4.12.

4.3.2 Prelievi acquedottistici e privati

La notevole disponibilità della risorsa idrica nell'acquifero dell'Alta Pianura ha indotto un intenso sfruttamento delle sue acque sotterranee, sia con lo scopo di rifornire la rete acquedottistica, sia per scopi irrigui che industriali o privati.

Per quantificare il deflusso dell'acquifero derivante dalle captazioni idriche, sono stati raccolti i dati dell'indagine ISTAT sulle fonti di approvvigionamento degli

acquedotti ad uso potabile del 2007, reperiti presso il Consiglio di Bacino della Laguna di Venezia. I pozzi ricadenti nell'area di studio afferiscono a due diverse ATO (Ambito Territoriale Ottimale), quella del Brenta e quella del Veneto Orientale; l'elenco di tutti i pozzi censiti nell'indagine e la loro descrizione è riportato in Tabella 4-13, la loro ubicazione è mostrata nella Figura 4.13. La portata totale di acqua captata all'interno dell'area di studio ammonta a $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0.17 \text{ m}^3/\text{s}$ nella provincia di Vicenza, $0.22 \text{ m}^3/\text{s}$ nella provincia di Padova, $0.41 \text{ m}^3/\text{s}$ nella provincia di Treviso).

Per quanto riguarda gli approvvigionamenti privati e irrigui non è stato possibile reperire nessun dato se non quelli disponibili in letteratura (Fabbri et al., 2016), che riportano un valore di $4.6\text{E}+07 \text{ m}^3/\text{anno}$ ($1.46 \text{ m}^3/\text{s}$) di portata estratta dai pozzi privati e $5.5\text{E}+07 \text{ m}^3/\text{anno}$ ($1.74 \text{ m}^3/\text{s}$) per la distribuzione irrigua. La portata totale è stata divisa per i 152 pozzi privati provenienti da un database del Dipartimento di Geoscienze (Figura 4.14) ad ognuno dei quali è stato associato un valore di portata pari a circa $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$.

<i>ATO</i>	<i>ID</i>	<i>X_GBO_m</i>	<i>Y_GBO_m</i>	<i>Quota [mslm]</i>	<i>Avg_Q [m³/d]</i>	<i>Comune</i>	<i>Prov.</i>
VO	P018	1728207.0	5062512.0	42.70	5313.60	Castelfranco Veneto	TV
VO	P019	1728152.0	5062532.0	42.70	2937.60	Castelfranco Veneto	TV
VO	P020	1728259.0	5062559.0	42.70	2376.00	Castelfranco Veneto	TV
VO	P021	1728249.0	5062520.0	42.70	155.52	Castelfranco Veneto	TV
VO	P022	1728156.0	5062493.0	42.70	43.20	Castelfranco Veneto	TV
VO	P047	1742661.0	5064034.0	37.62	2073.60	Istrana	TV
VO	P048	1740963.0	5065915.0	55.40	1036.80	Istrana	TV
VO	P049	1722191.0	5068924.0	75.00	2592.00	Loria	TV
VO	P069	1745350.0	5063389.0	33.00	924.48	Paese	TV
VO	P070	1742446.0	5066285.0	53.00	302.40	Paese	TV
VO	P071	1744771.0	5069163.0	60.00	1442.88	Paese	TV
VO	P073	1747767.0	5068456.0	46.00	17.28	Ponzano Veneto	TV
VO	P074	1747750.0	5068488.0	46.00	17.28	Ponzano Veneto	TV
VO	P075	1750633.0	5067793.0	31.00	535.68	Ponzano Veneto	TV
VO	P077	1726406.6	5068113.7	65.00	4320.00	Riese Pio X	TV
VO	P078	1722191.1	5068924.5	75.00	2592.00	Riese Pio X	TV
VO	P079	1726406.0	5068113.0	65.00	4320.00	Riese Pio X	TV
VO	P122	1749421.0	5063090.0	21.40	518.40	Treviso	TV
VO	P133	1750914.0	5065426.0	25.30	2937.60	Treviso	TV
VO	P134	1735540.0	5063902.0	45.00	1002.24	Vedelago	TV
BR	P003	1713193.5	5069900.8		1555.20	Bassano Del Grappa	VI
BR	P004	1713205.2	5069821.7		691.20	Bassano Del Grappa	VI
BR	P005	1711761.8	5070397.2		777.60	Bassano Del Grappa	VI
BR	P006	1712899.8	5073956.2		518.40	Bassano Del Grappa	VI
BR	P007	1713198.8	5069873.6		864.00	Bassano Del Grappa	VI
BR	P008	1712869.7	5073971.1		518.40	Bassano Del Grappa	VI
BR	P013	1709928.9	5065715.0		1036.80	Cartigliano	VI
BR	P014	1716366.0	5069563.3		259.20	Cassola	VI
BR	P015	1716369.6	5069551.0		345.60	Cassola	VI
BR	P040	1719450.1	5062959.3	59.00	3456.00	Galliera Veneta	PD

Tabella 4-13 – Elenco dei pozzi censiti nell'indagine ISTAT del 2007 selezionati per le successive elaborazioni. Abbreviazioni: (ATO) Ambito Territoriale Ottimale (VO, Veneto Orientale; BR, Brenta); (ID) indice progressivo; (X_GBO_m; Y_GBO_m) coordinate X e Y del sistema di riferimento adottato (Roma 1940, Gauss-Boaga fuso Ovest); (Quota_mslm) quota altimetrica; (Avg_Q [m³/d]) portata media estratta; (Comune, Prov.) comune e provincia di appartenenza. (Continua).

<i>ATO</i>	<i>ID</i>	<i>X_GBO_m</i>	<i>Y_GBO_m</i>	<i>Quota [mslm]</i>	<i>Avg_Q [m³/d]</i>	<i>Comune</i>	<i>Prov.</i>
<i>BR</i>	P041	1719690.6	5062985.6	60.50	5184.00	Galliera Veneta	PD
<i>BR</i>	P085	1714491.5	5068598.3		691.20	Rosa'	VI
<i>BR</i>	P086	1711653.0	5066847.5		864.00	Rosa'	VI
<i>BR</i>	P087	1711658.9	5067291.6		0.00	Rosa'	VI
<i>BR</i>	P088	1713671.8	5065143.5		345.60	Rosa'	VI
<i>BR</i>	P089	1714965.7	5067124.9		1296.00	Rosa'	VI
<i>BR</i>	P090	1717958.1	5065133.7	95.79	518.40	Rossano Veneto	VI
<i>BR</i>	P091	1717909.8	5065156.9	75.80	432.00	Rossano Veneto	VI
<i>BR</i>	P092	1717574.2	5066994.8		691.20	Rossano Veneto	VI
<i>BR</i>	P096	1720008.9	5063004.1	59.60	5184.00	San Martino Di Lupari	PD
<i>BR</i>	P097	1720207.3	5062829.7	58.70	5184.00	San Martino Di Lupari	PD
<i>BR</i>	P107	1710866.7	5064423.7		216.00	Tezze Sul Brenta	VI
<i>BR</i>	P108	1716221.6	5064137.5		777.60	Tezze Sul Brenta	VI
<i>BR</i>	P109	1713258.3	5062556.6	70.03	2160.00	Tezze Sul Brenta	VI

Tabella 4-13 – Elenco dei pozzi censiti nell'indagine ISTAT del 2007 selezionati per le successive elaborazioni. Abbreviazioni: (*ATO*) Ambito Territoriale Ottimale (*VO*, Veneto Orientale; *BR*, Brenta); (*ID*) indice progressivo; (*X_GBO_m*; *Y_GBO_m*) coordinate *X* e *Y* del sistema di riferimento adottato (Roma 1940, Gauss-Boaga fuso Ovest); (*Quota_mslm*) quota altimetrica; (*Avg_Q [m³/d]*) portata media estratta; (*Comune*, *Prov.*) comune e provincia di appartenenza.

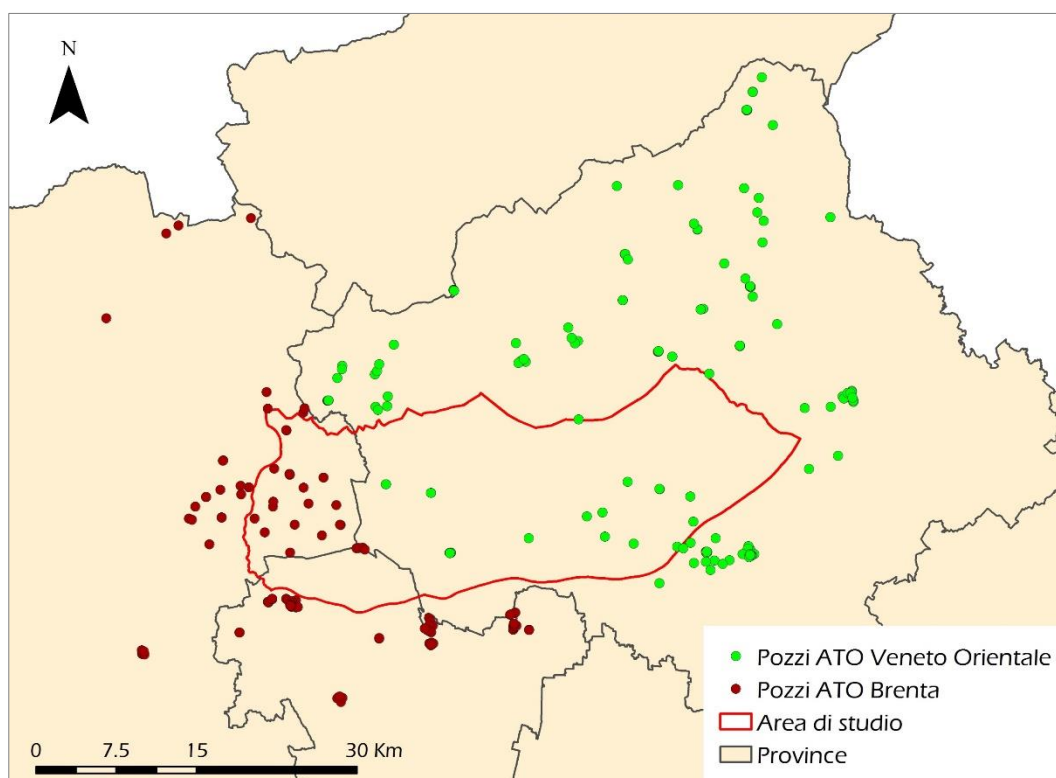


Figura 4.13 – Ubicazione dei pozzi acquedottistici censiti nell'indagine ISTAT del 2007 afferenti alle ATO del Brenta e del Veneto Orientale.

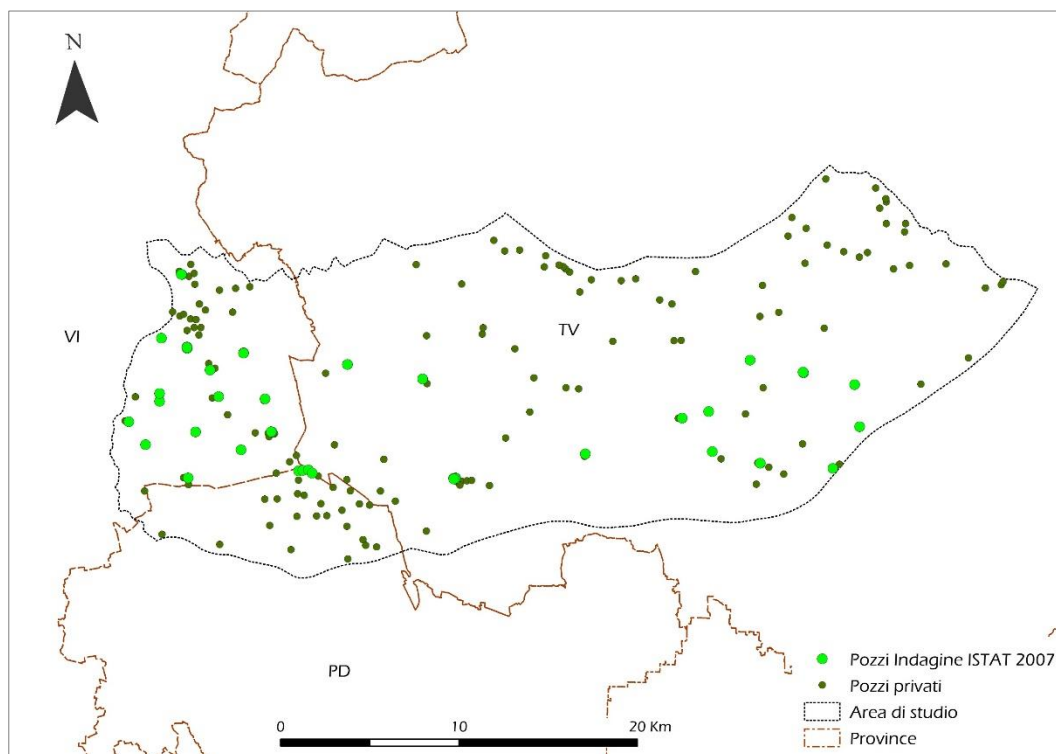


Figura 4.14 – Ubicazione dei pozzi acquedottistici censiti nell'indagine ISTAT del 2007 e privati provenienti dal database del Dipartimento di Geoscienze (UNIPD) ricadenti nell'area di studio.

Successivamente è stato eseguito un confronto tra i prelievi acquedottistici censiti nell'indagine del 2007 e l'ultimo censimento che si è riusciti a reperire, risalente al 1989 (Bullo & Dal Prà; 1990; Figura 4.15). Considerando l'intera area di studio, nel 2007 sono stati registrati 0.8 m³/s di portata totale captata attraverso 44 pozzi, mentre nel 1989, dai 46 pozzi presenti in quell'anno, si registravano 0.97 m³/s. In questo settore di Alta Pianura si è vista quindi una diminuzione dei prelievi acquedottistici del 17.4% corrispondenti a 0.168 m³/s. Questa diminuzione è possibile apprezzarla anche considerando le porzioni dei territori provinciali ricadenti nell'area di studio (Figura 4.16) sebbene il settore afferente alla provincia di Padova rappresenti l'unica eccezione, essendo caratterizzato da un incremento della portata totale prelevata di 0.095 m³/s (+76% rispetto al 1989).

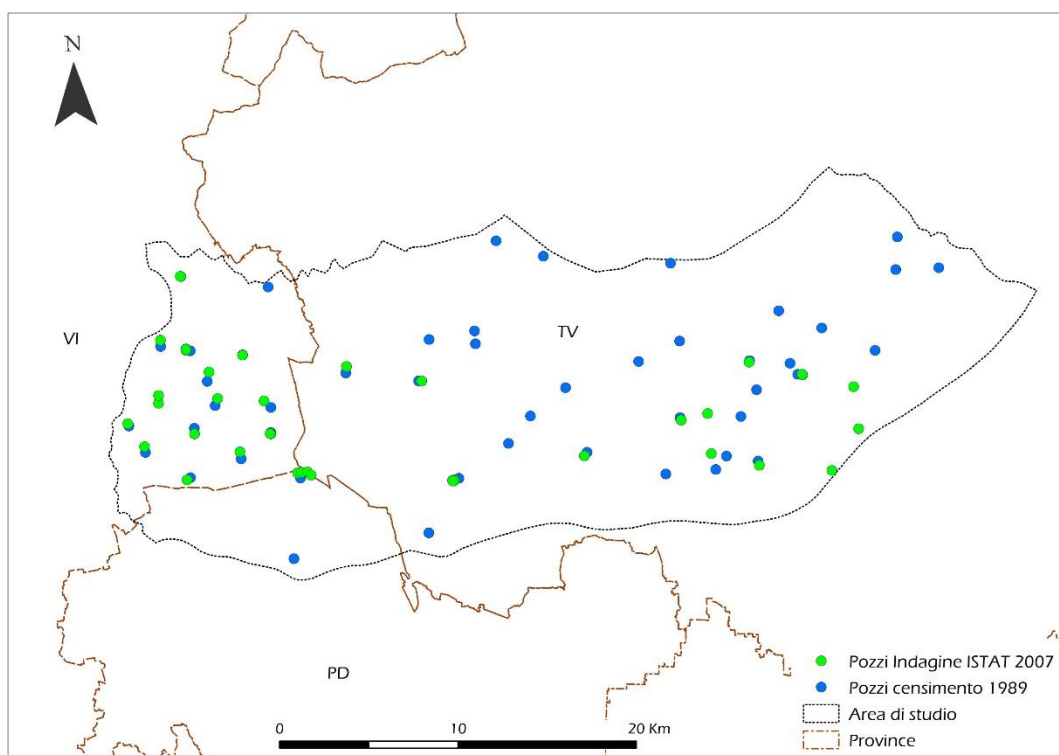


Figura 4.15 – Ubicazione dei pozzi acquedottistici relativi all'indagine ISTAT del 2007 e del censimento del 1989 ricadenti nell'area di studio.

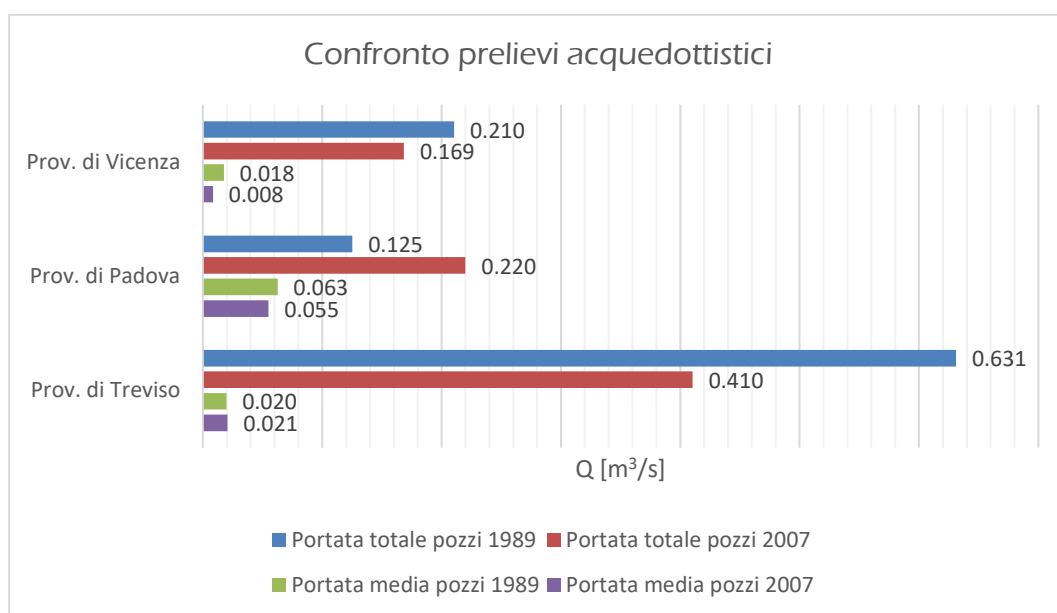


Figura 4.16 – Confronto delle portate totali e medie dei pozzi tra il censimento del 1989 e quello del 2007.

Osservando la distribuzione spaziale dei punti di prelievo, è possibile constatare come la posizione dei pozzi censiti nel 2007 coincida, nella maggioranza dei casi, con quella relativa ai pozzi del 1989; inoltre, nell'ambito della provincia di Treviso, relativamente all'anno 2007, sono assenti punti di prelievo nel settore settentrionale dell'area di studio, presenti invece nel 1989. Queste considerazioni lasciano supporre che negli anni sia avvenuta una sostituzione della vecchia rete di approvvigionamento probabilmente resa necessaria dal progressivo abbassamento del livello della falda avvenuto nelle ultime decadi (Passadore et al., 2012; Baruffi et al., 2012).

4.4 Livelli freatici

Infine, l'ultimo elemento da prendere in analisi è il record delle oscillazioni del livello freatico. I dati sono stati reperiti dal *Geoportale* della Regione Veneto (<http://idt.regione.veneto.it/app/metacatalog/>) che mette a disposizione i valori di soggiacenza e carico idraulico di ogni stazione (Tabella 4-15, Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.), acquisiti con frequenza trimestrale dal 1997 al 2015. Anche per i livelli freatici è stato preso come riferimento il periodo 2010-2015, del quale sono riportati i valori medi di ogni pozzo/piezometro ricadente nell'area analizzata (Tabella 4-14; Figura 4.18).

<i>ID</i>	<i>Avg_Head [mslm]</i>	<i>ID</i>	<i>Avg_Head [mslm]</i>
23	34.40	519	65.58
95	65.06	521	62.20
99	16.04	523	52.78
149	62.86	524	57.51
162	84.47	526	63.78
224	41.81	529	43.35
225	40.46	531	36.89
230	36.91	545	38.16
235	53.24	552	33.46
236	38.82	732	37.22
239	40.36	735	27.26
241	45.84	738	28.23
244	71.76	739	25.25
248	41.22	741	33.40
271	32.86	742	31.17
501	66.17	750	24.56
502	58.96	761	30.12
504	53.48	762	20.52
506	48.87	763	24.59
507	43.54	765	32.07
509	39.92	766	24.78
513	40.43	771	38.63
514	39.19	772	34.33
515	38.46	773	30.03
518	37.97	815	28.14

Tabella 4-14 - Carico idraulico medio relativo al periodo 2010-2015 dei pozzi di osservazione selezionati. Abbreviazioni: (*ID*) codice identificativo del pozzo; (*Avg_Head [mslm]*) carico idraulico medio.

ID	X_GBO_m	Y_GBO_m	Quota_PR [mslm]	Quota_PC [mslm]	Comune	Prov.	Tipo_falda	Prof [m]
23	1729759.1	5070504.6	84.75	86.38	Altivole	TV	falda libera	86.0
95	1711760.0	5070393.0	106.42	106.18	Bassano Del Grappa	VI	falda libera	62.3
99	1747417.9	5060937.1	18.95	18.45	Quinto Di Treviso	TV	falda libera	6.0
149	1715633.0	5070324.0	111.72	111.69	Cassola	VI	falda libera	49.5
162	1714996.0	5073065.0	130.61	130.61	Romano D'Ezzelino	VI	falda libera	58.0
224	1717968.0	5065137.0	75.80	75.80	Rossano Veneto	VI	falda libera	78.2
225	1721632.9	5066950.7	70.75	71.95	Loria	TV	falda libera	59.0
230	1726286.8	5068138.1	65.43	65.03	Riese Pio X	TV	falda libera	150.0
235	1712479.0	5063459.0	71.72	75.37	Tezze Sul Brenta	VI	falda libera	78.0
236	1721175.5	5070903.5	84.60	85.45	San Zenone Degli Ezzelini	TV	falda libera	56.5
239	1722477.7	5059657.4	42.22	47.52	San Martino Di Lupari	PD	falda libera	7.8
241	1711933.6	5059413.7	48.00	52.09	Cittadella	PD	falda libera	6.0
244	1710444.0	5067469.0	99.22	99.22	Bassano Del Grappa	VI	falda libera	42.1
248	1731041.3	5075332.2	115.05	116.41	Maser	TV	falda libera	77.0
271	1732783.3	5068295.7	73.63	74.35	Vedelago	TV	falda libera	64.0
501	1709904.0	5065730.0		85.70	Cartigliano	VI	falda libera	70.0
502	1710874.0	5064446.0	78.43	78.43	Tezze Sul Brenta	VI	falda libera	80.0
504	1713241.0	5062607.0	70.03	70.03	Tezze Sul Brenta	VI	falda libera	70.0
506	1714969.0	5067132.0	95.79	95.71	Rosa'	VI	falda libera	73.0
507	1717326.8	5066304.4	83.70	83.71	Rossano Veneto	VI	falda libera	50.0
509	1718827.0	5063441.0	64.23	65.93	Rossano Veneto	VI	falda libera	72.2
513	1718209.8	5059012.2	47.11	47.20	Cittadella	PD	falda libera	13.0
514	1719783.3	5059252.8	41.33	46.32	Tombolo	PD	falda libera	12.6
515	1721774.2	5059941.3	45.95	44.72	San Martino Di Lupari	PD	falda libera	8.8
518	1722028.0	5060722.9	40.54	47.58	San Martino Di Lupari	PD	falda libera	13.7
519	1713179.0	5070770.0	117.73	117.73	Bassano Del Grappa	VI	falda libera	80.5
521	1713192.0	5069929.0	113.09	113.09	Bassano Del Grappa	VI	falda libera	70.3
523	1714480.0	5068599.0	105.95	105.95	Rosa'	VI	falda libera	84.0
524	1712603.3	5066450.2	92.52	92.36	Rosa'	VI	falda libera	60.0
526	1709794.0	5064623.0	80.13	80.06	Cartigliano	VI	falda libera	20.5
529	1717766.6	5063631.6	52.70		Rossano Veneto	VI	falda libera	22.0
531	1726622.5	5070566.1	76.34	76.84	Altivole	TV	falda libera	49.2

Tabella 4-15 – Lista dei pozzi di osservazione gestiti dalla Regione Veneto selezionati per le successive elaborazioni. Abbreviazioni: (ID) codice identificativo del pozzo; (X_GBO_m, Y_GBO_m) coordinate X e Y del sistema di riferimento adottato; (Quota_PR [mslm]) quota del piano di riferimento; (Quota_PC [mslm]) quota del piano campagna; (Comune, Prov.) comune e provincia di ubicazione; (Tipo_falda) tipologia della falda monitorata; (Prof [m]) profondità del pozzo. (Continua)

ID	X_GBO_m	Y_GBO_m	Quota_PR [mslm]	Quota_PC [mslm]	Comune	Prov.	Tipo_falda	Prof [m]
545	1723674.9	5064335.3	57.02	56.21	Castello Di Godego	TV	falda libera	27.9
552	1735153.7	5072970.5	99.97	99.80	Montebelluna	TV	falda libera	81.0
732	1744254.5	5075221.7		86.00	Volpago Del Montello	TV	falda libera	103.0
735	1744945.2	5071513.8		69.00	Volpago Del Montello	TV	falda libera	85.0
738	1739082.9	5068290.9	69.46		Trevignano	TV	falda libera	46.0
739	1742713.8	5067146.8	58.25	59.25	Trevignano	TV	falda libera	50.0
741	1751208.8	5077685.6	67.00	67.00	Nervesa Della Battaglia	TV	falda libera	45.0
750	1753768.7	5070464.0	36.59		Villorba	TV	falda libera	20.0
761	1746966.6	5076123.1		67.00	Giavera Del Montello	TV	falda libera	44.0
762	1748224.1	5065916.2	34.99		Ponzano Veneto	TV	falda libera	21.0
763	1749823.4	5069420.7	39.69		Ponzano Veneto	TV	falda libera	33.0
765	1731754.7	5064738.6	51.30	51.50	Castelfranco Veneto	TV	falda libera	30.0
766	1742328.0	5064637.0	46.57		Paese	TV	falda libera	35.0
771	1722560.4	5065860.4			Loria	TV	falda libera	38.0
772	1728354.0	5068498.0	69.96	70.00	Riese Pio X	TV	falda libera	39.0
815	1736386.0	5064062.0			Vedelago	TV	falda libera	24.1

Tabella 4-15 – Lista dei pozzi di osservazione gestiti dalla Regione Veneto selezionati per le successive elaborazioni. Abbreviazioni: (ID) codice identificativo del pozzo; (X_GBO_m, Y_GBO_m) coordinate X e Y del sistema di riferimento adottato; (Quota_PR [mslm]) quota del piano di riferimento; (Quota_PC [mslm]) quota del piano campagna; (Comune, Prov.) comune e provincia di ubicazione; (Tipo_falda) tipologia della falda monitorata; (Prof [m]) profondità del pozzo.

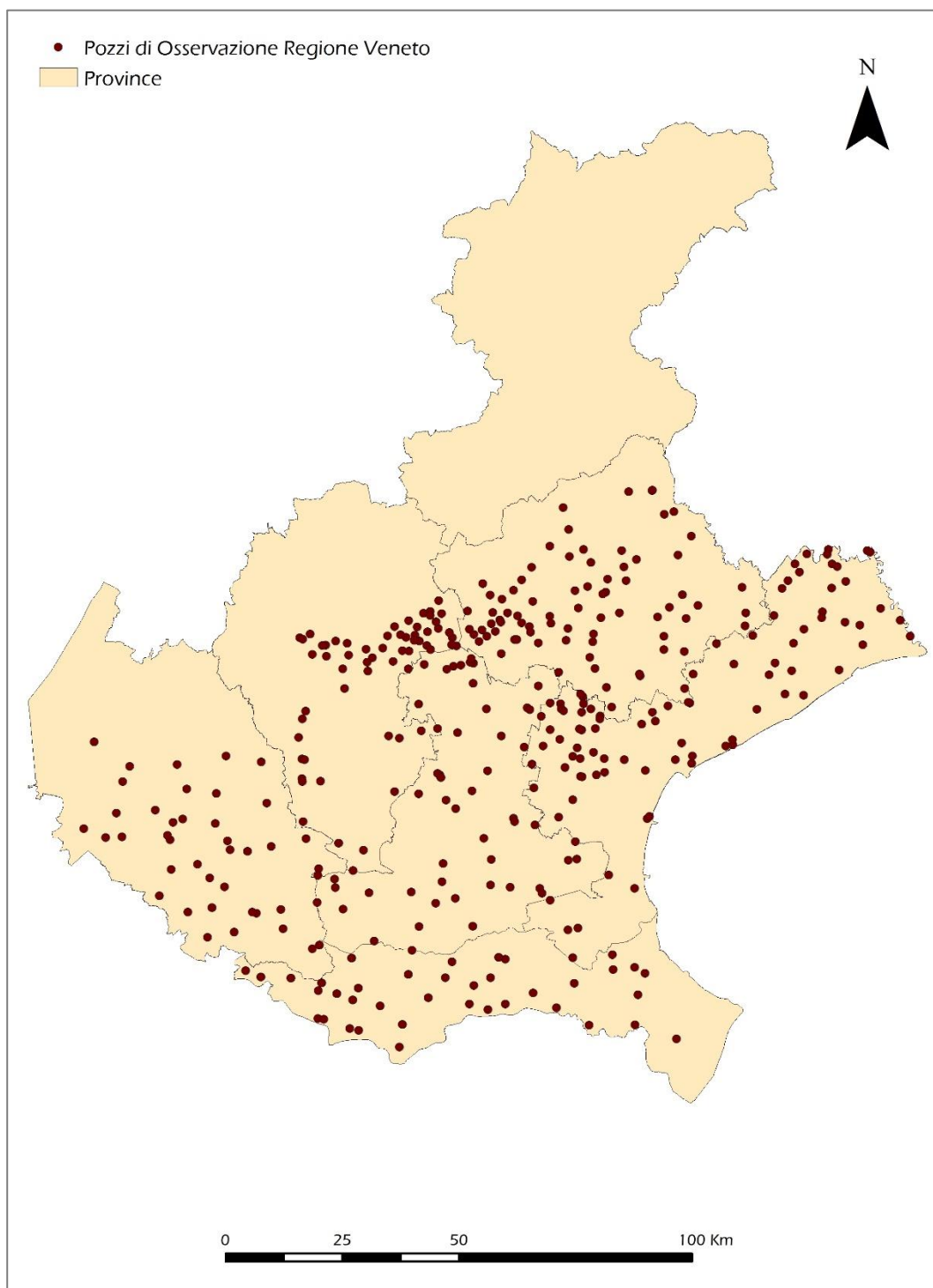


Figura 4.17 – Ubicazione dei pozzi/piezometri della rete di monitoraggio delle acque sotterranee della Regione Veneto.

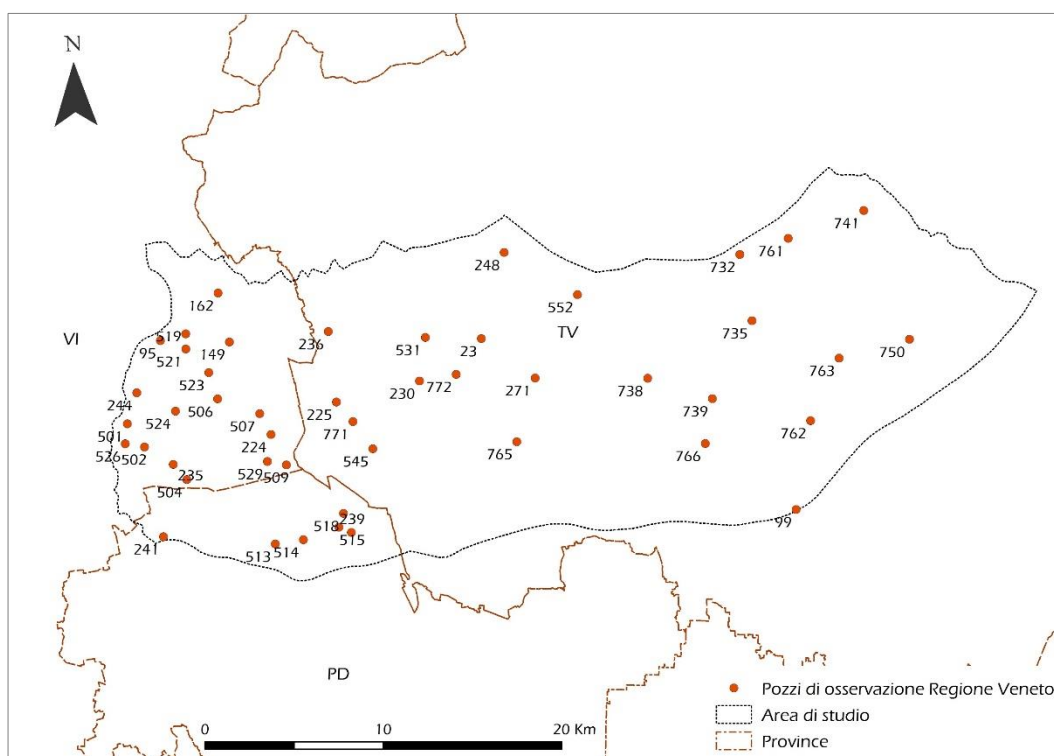


Figura 4.18 – Ubicazione dei pozzi/piezometri di osservazione ricadenti nell'area di studio.

Per descrivere il regime idrodinamico di questa porzione di acquifero, sono stati selezionati i record relativi ad alcuni dei pozzi ricadenti nell'area esaminata in relazione con le medie trimestrali delle precipitazioni registrate dalla stazione meteo più vicina (Figura 4.19 e Figura 4.20). Osservando i grafici, nonostante la ridotta frequenza di acquisizione dei dati freaticometrici, si nota che in quasi tutti i casi i picchi di precipitazione e di livello freatico coincidano, soprattutto nell'ultimo trimestre. Emergono tuttavia delle differenze, principalmente nei periodi relativi al terzo trimestre, durante il quale ad una diminuzione delle precipitazioni spesso corrisponde un aumento del livello freatico. Non a caso il terzo trimestre, proprio a causa della scarsa piovosità che lo caratterizza, coincide con l'inizio della stagione irrigua, pertanto l'innalzamento della falda durante questo periodo è da imputarsi alle dispersioni derivanti dagli adacquamenti irrigui.

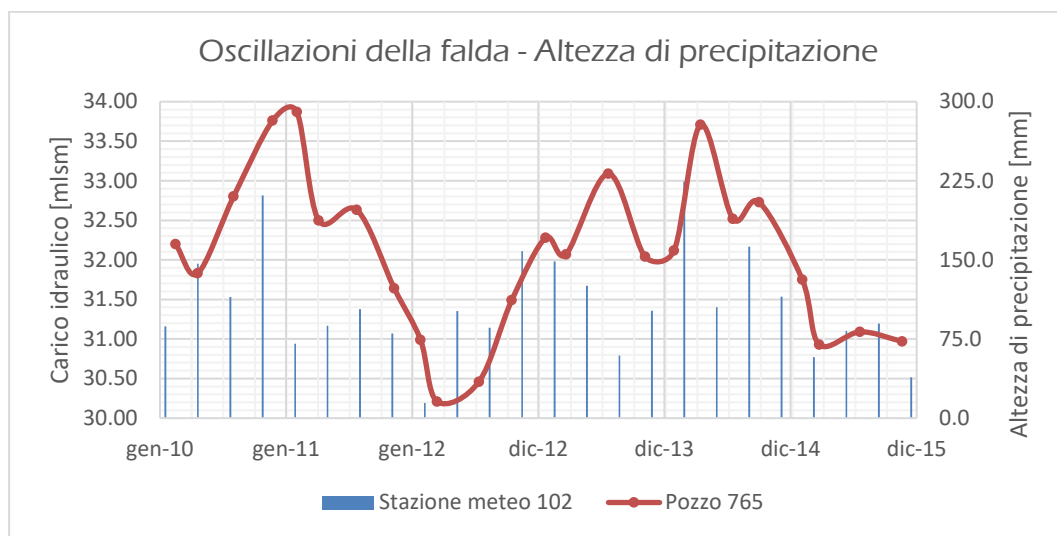


Figura 4.19 – Relazione tra le fluttuazioni della falda registrate nel pozzo 765 con il record delle precipitazioni rilevate nella stazione meteo più vicina (Castelfranco Veneto).

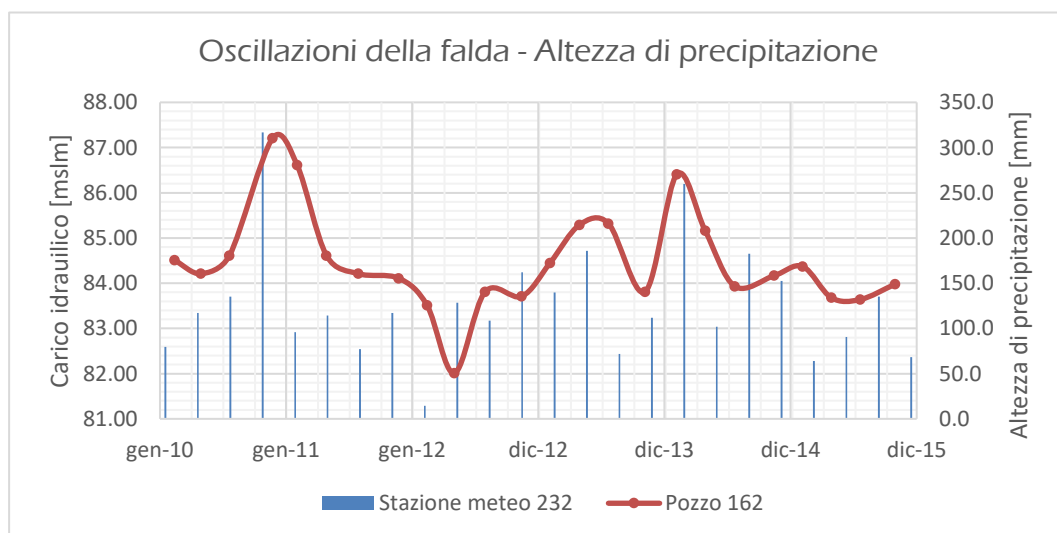


Figura 4.20 – Relazione tra le fluttuazioni della falda registrate nel pozzo 162 con il record delle precipitazioni rilevate nella stazione meteo più vicina (Bassano del Grappa).

Infine, i livelli medi di falda di ogni pozzo ricadente nell'area di studio per il periodo 2010-2015, sono stati interpolati con il metodo del *Natural Neighbor* (con funzione peso costante; Sibson, 1981) ricostruendo così l'andamento medio delle linee equipotenziali (Figura 4.21).

Osservando le isofreatiche ottenute, è possibile notare che la direzione prevalente del flusso è diretto da N-W verso S-E, e che i fiumi Brenta e Piave costituiscano i

principali assi di alimentazione del sistema acquifero; inoltre, nel settore nord occidentale, a ridosso dei rilievi prealpini, la falda è caratterizzata da forti gradienti. Si può altresì apprezzare la presenza di un asse di drenaggio con direzione NNW-SSE localizzato nella porzione orientale dell'area.

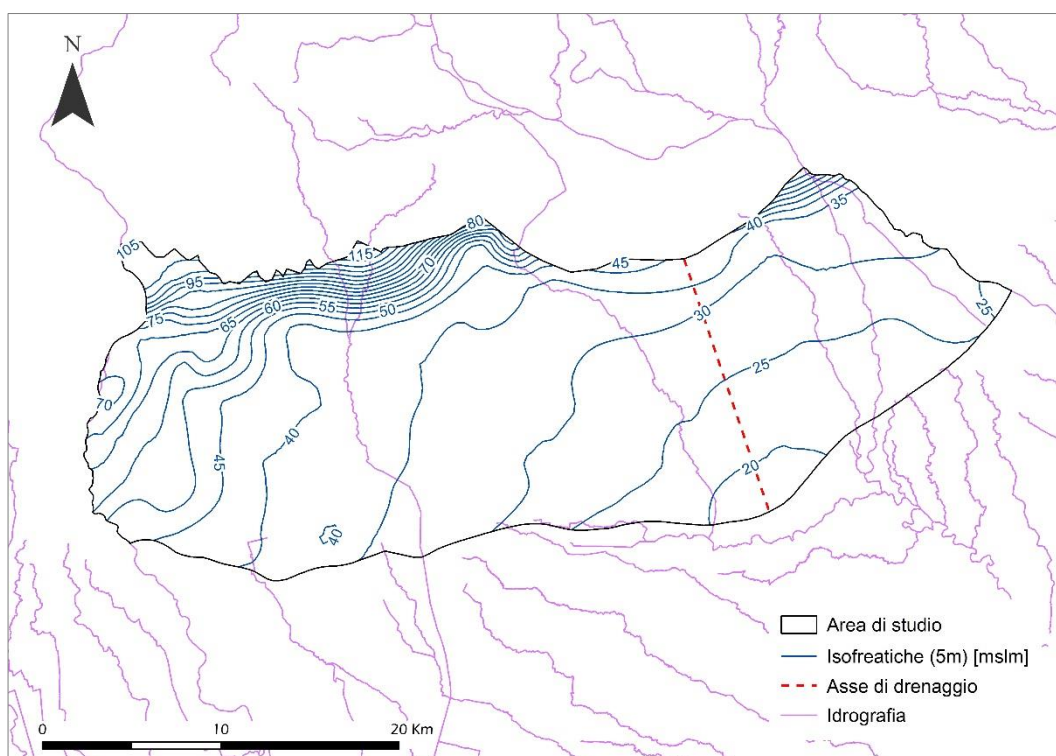


Figura 4.21 – Carta delle isofreatiche ottenute dall'interpolazione dei livelli medi di falda relativi a tutte le stazioni ricadenti nell'area di studio per il periodo 2010-2015.

4.5 Bilancio idrogeologico

In questa sezione vengono riassunti i deflussi da e gli afflussi verso l'area di studio integrandoli con dati relativi ad altre voci coinvolte nel bilancio idrogeologico.

4.5.1 Afflussi

Le componenti che contribuiscono alla ricarica dell'acquifero freatico sono, come già accennato, l'apporto meteorico, le dispersioni in alveo dei corsi d'acqua e la ricarica derivante dalla pratica irrigua, alle quali si deve ad aggiungere anche il probabile contributo proveniente dagli acquiferi fratturati posti immediatamente a monte dell'area esaminata.

In merito alle precipitazioni, dalle medie annue di altezza di precipitazione di ogni stazione meteo selezionata, è stata ricostruita la distribuzione spaziale delle piogge, mediante interpolazione in ambiente GIS (*Natural Neighbor*), su tutta l'area esaminata (Figura 4.22). Dall'interpolazione è stato stimato un valore di lama d'acqua al suolo pari a 1290 mm/anno. Da questo valore è stata decurtata l'aliquota di lama d'acqua persa per processi di evapotraspirazione (Figura 4.23) stimata, a partire dai valori ottenuti mediante la formulazione di Turc, con lo stesso metodo adottato per le piogge; il valore di lama d'acqua evapotraspirata ottenuto risulta quindi essere pari a 660 mm/anno. Infine, per tenere conto anche di un eventuale ruscellamento superficiale, la differenza ottenuta (630 mm/anno) è stata messa a prodotto con un coefficiente di infiltrazione pari a 0.8, ottenendo così un valore di lama d'acqua di 504 mm/anno che effettivamente contribuisce alla ricarica dell'acquifero. Analogamente, è stata poi ottenuta una carta relativa all'infiltrazione efficace nell'area (Figura 4.24).

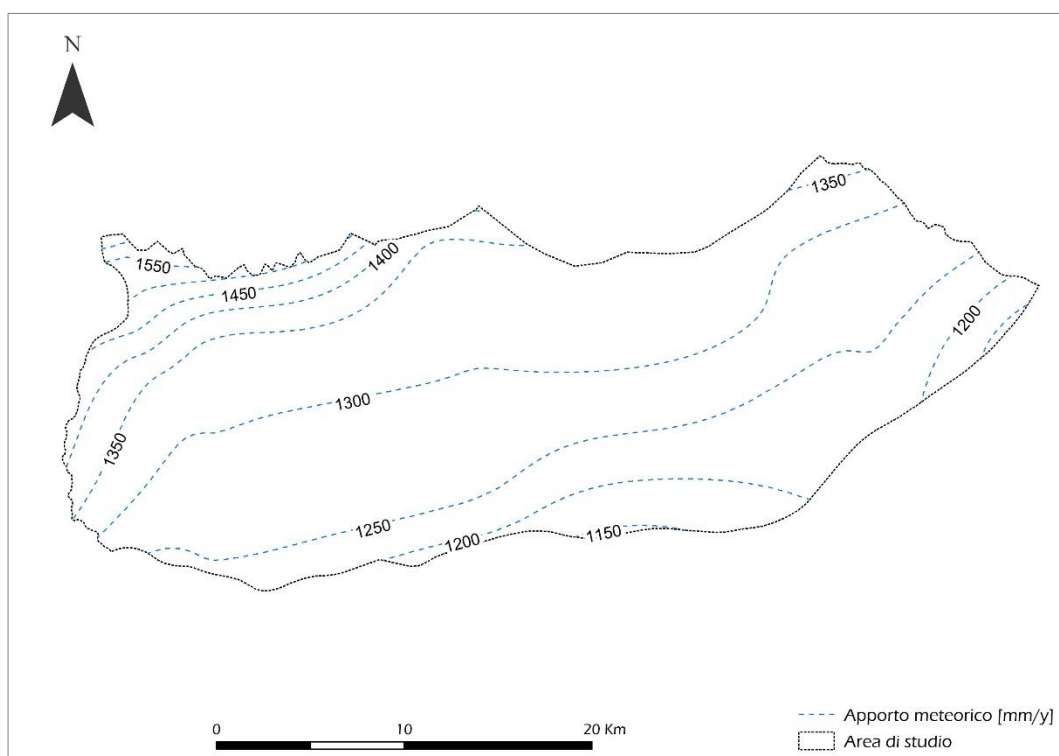


Figura 4.22 – Carta delle isoiete relativa all'area di studio.

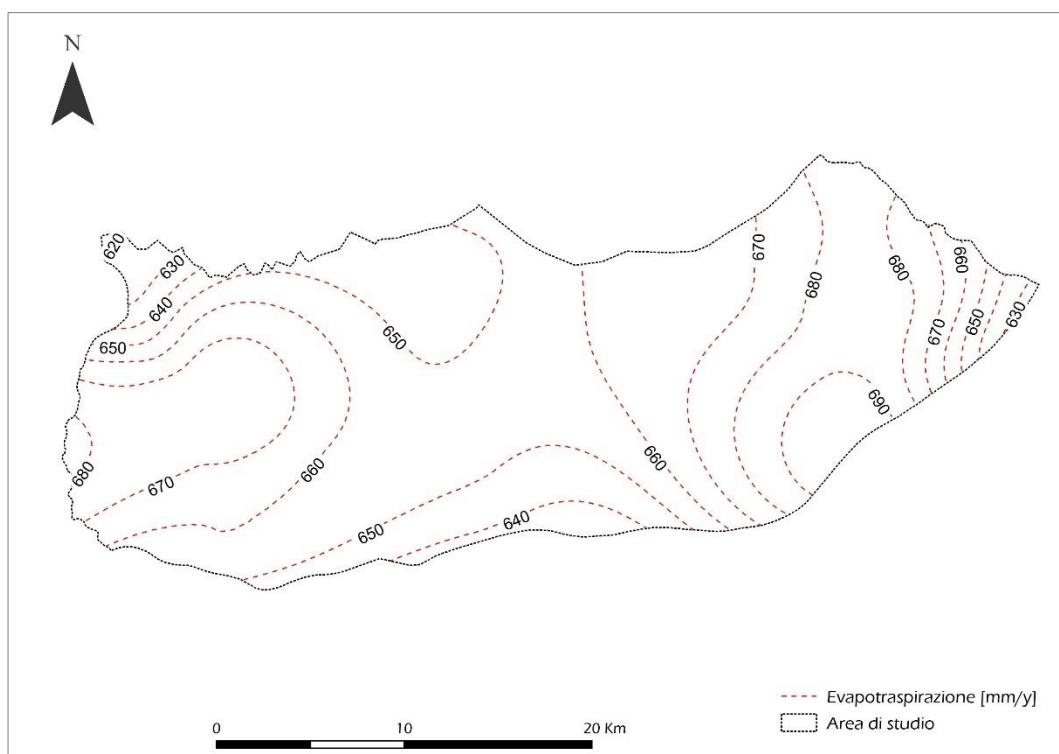


Figura 4.23 – Carta dell'evapotraspirazione reale (Turc) relativa all'area di studio.

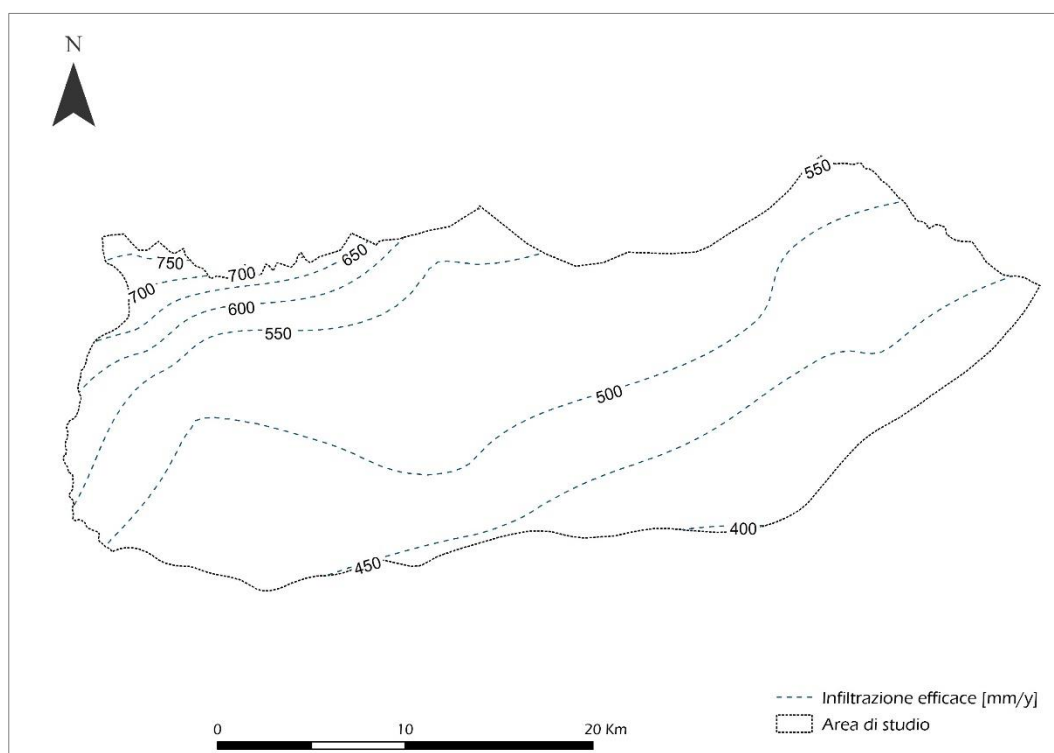


Figura 4.24 – Carta dell'infiltrazione relativa all'area di studio.

Riguardo i flussi entranti veicolati dai Consorzi di Bonifica per la distribuzione irrigua, in base alle stime riportate in Tabella 4-12 emerge che l'irrigazione fornisce un valore di ricarica all'acquifero pari a 815 mm/anno, principalmente concentrata nel trimestre luglio-settembre, e proveniente per la maggior parte dalle aree gestite con la tecnica a scorrimento (90%), in quanto le aree irrigate per aspersione, le quali fanno uso di un volume d'acqua significativamente minore rispetto alle prime, sono soggette ad una forte perdita per evapotraspirazione.

Per la stima della dispersione dall'alveo delle aste fluviali, sono stati presi a riferimento i valori già mostrati in precedenza (vedi paragrafo 4.2), reperiti da fonti di letteratura e relativi ai fiumi Brenta e Piave, dei quali viene stimata una portata dispersa rispettivamente di $2.48E+08$ e $3.11E+08$ m³/anno, determinate dimezzando l'apporto totale per rappresentare l'influenza nell'area di studio dei due corsi d'acqua (che ne costituiscono i margini laterali), considerando, quindi, che la portata stimata in alveo si ripartisca equamente tra la destra e la sinistra idrografica (Cambruzzi et al., 2010; Fabbri et al., 2016).

L'ultimo contributo alla ricarica dell'acquifero freatico, nonché il più difficile da valutare, è il flusso proveniente dagli acquiferi fratturati posti sul margine settentrionale dell'area esaminata. Ad oggi non esistono ancora stime dirette del flusso entrante da monte, il cui valore è stato reperito da precedenti studi sul bilancio idrogeologico dell'area. Il valore preso di riferimento è dunque pari a $8.54E+08$ m³/anno (Fabbri et al., 2016) ottenuto dalla differenza tra il flusso in entrata e quello in uscita.

4.5.2 Deflussi

Il volume d'acqua defluente l'acquifero è partizionato tra quello captato dai punti di prelievo, acquedottistici e privati, l'aliquota drenata dalle risorgive e il flusso alimentante gli acquiferi confinati a valle dell'area di studio nel sottosuolo della Media Pianura.

Il flusso totale emunto dagli acquedotti e dai pozzi privati è pari a circa 4 m³/s, 0.8 m³/s dei quali prelevati per scopo idropotabile.

Le risorgive costituiscono il volume naturalmente ceduto dall'acquifero alle acque superficiali, che sviluppano, a valle, un fitto reticolo idrografico in prossimità della fascia dei fontanili. Già in passato sono state condotte delle campagne di misura finalizzate a determinare le portate uscenti da questa fascia, quantificate nel 1980 in 31.62 m³/s fuoriuscenti nel tratto compreso tra il Brenta e il Piave (Dal Prà & Antonelli, 1980); da allora però si è vista una diminuzione del numero di emergenze di risorgiva del 30%, pertanto il valore preso di riferimento ammonta a circa 21.8 m³/s (Cambruzzi et al., 2010).

Altra componente da valutare è rappresentata dal flusso alimentante gli acquiferi confinati della Media e Bassa Pianura. I dati reperiti riguardo questa voce di bilancio si riferiscono ad analisi di dettaglio inizialmente effettuate per gli acquiferi ricadenti nel territorio ATO della Laguna di Venezia, poi estese in termini più generali a tutto il tratto della Media Pianura tra Brenta e il Piave in base alle caratteristiche idrogeologiche degli acquiferi confinati ricadenti in quelle aree. Il valore stimato di portata defluente tutto il margine meridionale dell'area considerata è pari a $11.05E+08$ m³/anno (Cambruzzi et al., 2010).

Di seguito (Tabella 4-16) vengono riportate tutte le componenti idrologiche considerate nell'ambito di questo lavoro.

<i>Componente idrologica</i>	<i>Afflussi</i>			<i>Deflussi</i>	
	<i>mm/anno</i>	<i>m³/d</i>	<i>%</i>	<i>m³/d</i>	<i>%</i>
Infiltrazione efficace	1319	2.66E+06	41%		
Precipitazioni	504	1.01E+06	15%		
Irrigazione	815	1.65E+06	25%		
Dispersioni in alveo		1.53E+06	23%		
Prelievi				3.46E+05	7%
Risorgive				1.88E+06	36%
Flusso sotterraneo uscente				3.03E+06	58%
Ricarica dagli acquiferi fratturati		2.34E+06	36%		
TOTALE		6.53E+06		5.26E+06	

Tabella 4-16 - Bilancio idrogeologico dell'area.

Tra gli afflussi, oltre al contributo proveniente dagli acquiferi fratturati delle Prealpi, che costituisce il fattore più influente alla ricarica della falda, il ruolo che l'attività irrigua riveste in questo ambito è comunque notevole, rappresentando il 25% del volume totale entrante nel sistema, ben superiore sia all'infiltrazione efficace derivante dalle precipitazioni (15%), sia alle dispersioni in alveo stimate per i fiumi Brenta e Piave (23%). Tuttavia è da tenere presente che il valore di ricarica laterale proveniente dagli acquiferi fratturati sia una stima indiretta ottenuta attraverso un bilancio analitico (Fabbri et al., 2016), di conseguenza il valore è affetto da un notevole margine di incertezza.

Gli acquiferi confinati costituiscono, invece, il principale recapito dell'acquifero dell'Alta Pianura, intercettando il 58% del volume totale in uscita; marginale è invece l'impatto dei punti di prelievo considerati (7%) sebbene sia da evidenziare che vi è solo una limitata conoscenza dei prelievi eseguiti da privati, per cui il valore riportato è da considerarsi una sottostima della portata reale.

5 Modellazione idrogeologica

5.1 Modello idrogeologico concettuale

In questa fase è necessario delineare il modello idrogeologico concettuale dell'acquifero esaminato; il modello concettuale insieme agli obiettivi prefissati guideranno la successiva progettazione e implementazione delle simulazioni numeriche. Sul piano orizzontale, per favorirne la rappresentazione numerica, i confini dell'area da simulare sono stati impostati su limiti idrogeologici ben definiti: il margine settentrionale coincidente con i rilievi prealpini, i margini laterali con il tracciato dei corsi d'acqua Brenta e Piave, rispettivamente ad est e ad ovest, e il margine meridionale posto in prossimità della linea superiore delle risorgive. Lungo la verticale, l'acquifero freatico è compreso tra il piano campagna e la superficie corrispondente alla base del Pliocene (Pola et al., 2014; Figura 5.3). Per via dello stile di sedimentazione (vedi paragrafo 3.2), che è all'origine della formazione del mezzo costituente l'acquifero, esso è prevalentemente composto da materiali porosi ad elevata conducibilità idraulica ($10^{-3} - 10^{-4}$ m/s) per i primi 300 metri di spessore; più in profondità è ragionevole supporre che la permeabilità subisca una diminuzione progressiva, in ragione della presenza di sedimenti più fini di origine marina. All'interno dell'acquifero il flusso di falda ha una direzione prevalente da N-W verso S-E.

L'alimentazione dell'acquifero è legata a 3 fenomeni prevalenti: l'infiltrazione derivante dalle piogge e dall'irrigazione, fenomeno più intenso in prossimità del settore settentrionale e quantificato, nel capitolo precedente, ad un valore medio di $2.66E+06$ m³/d (1319 mm/anno) su tutta l'area; le dispersioni in alveo, che contribuiscono invece con un flusso valutato in $1.53E+06$ m³/d; infine è da tenere in considerazione un eventuale alimentazione proveniente dagli acquiferi fratturati posti a monte, in via preliminare quantificata in $2.34E+06$ m³/d.

Il recapito finale della circolazione idrica sotterranea all'interno dell'acquifero freatico di Alta Pianura è rappresentato da due elementi principali: l'alimentazione verso gli acquiferi in pressione che costituiscono il sistema multi-falda presente nella Media e Bassa Pianura Veneta (circa $3.03E+06$ m³/d) e l'alimentazione del

reticolo idrografico attraverso l'affioramento della superficie freatica in prossimità della fascia delle risorgive, al limite tra Alta e Media Pianura (circa $1.88\text{E}+06 \text{ m}^3/\text{d}$). Un'altra via di recapito è rappresentata dai prelievi acquedottistici e privati che captano una portata totale pari a $3.46\text{E}+05 \text{ m}^3/\text{d}$.

5.2 Codici di calcolo e tipologia di simulazioni realizzate

Per la simulazione del flusso delle acque sotterranee è stato utilizzato il codice tridimensionale MODFLOW-2005 (Harbaugh, 2005), che risolve, attraverso l'approssimazione alle differenze finite, l'equazione di flusso allo stato stazionario e/o transitorio per un fluido monofase a densità costante in un mezzo continuo, poroso e completamente saturo. L'equazione considerata deriva a sua volta dall'equazione di continuità (o Principio di Conservazione della Massa) e dalla legge di Darcy (essa è dunque ritenuta valida fin tanto che nel sistema non siano presenti flussi turbolenti), e per un acquifero confinato è formulata come segue:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(K_{xx} \frac{\delta h}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(K_{yy} \frac{\delta h}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(K_{zz} \frac{\delta h}{\delta z} \right) + W = S_s \frac{\delta h}{\delta t} \quad 5-1$$

dove: x, y, z e t sono le dimensioni spaziali e temporali, K_{xx} , K_{yy} e K_{zz} sono le componenti principali del tensore della conducibilità idraulica $[\text{L}/\text{T}]$, h è il carico idraulico $[\text{L}]$, S_s è l'immagazzinamento specifico del mezzo poroso $[\text{L}^{-1}]$, mentre 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 $[\text{T}^{-1}]$. L'equazione 5-1, abbinata alle condizioni al contorno ed alle condizioni iniziali, rappresenta il modello matematico del sistema acquifero ed è in grado di descrivere il flusso sotterraneo in condizioni di equilibrio e/o non equilibrio attraverso un mezzo eterogeneo e anisotropo, assumendo che le componenti principali del tensore della conducibilità idraulica siano allineate lungo gli assi del sistema di riferimento utilizzato per la discretizzazione geometrica; inoltre l'equazione 5-1 impone che la somma di tutti i flussi in entrata e in uscita sia uguale alla variazione del volume di acqua immagazzinata.

L'equazione 5-1 può essere risolta sia per via analitica che numerica; tuttavia la risoluzione analitica è possibile solo in pochi casi e sotto forti semplificazioni, per

cui sono stati introdotti diversi metodi di approssimazione numerica tra cui il metodo alle differenze finite adottato in MODFLOW-2005. Tale metodo prevede la sostituzione delle derivate parziali con delle differenze misurabili (finite) e la risoluzione dell'equazione in punti specifici dello spazio (nodi) identificati con gli indici di riga (i), di colonna (j) e di *layer* (k).

Con riferimento la Figura 5.1, indicando con Δx la spaziatura dei nodi lungo le righe, l'approssimazione alle differenze finite dell'equazione 5-1 lungo tale direzione per un generico nodo (i, j, k) può essere formulata, considerando la spaziatura dei nodi costante, come di seguito riportato:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) = \\ = \frac{1}{\Delta x} \left(K_{x_{i+1/2,j,k}} \frac{h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}}{\Delta x} - K_{x_{i-1/2,j,k}} \frac{h_{i,j,k} - h_{i-1,j,k}}{\Delta x} \right) \end{aligned} \quad 5-2$$

dove il termine “1/2” sta ad indicare la regione di spazio posta tra due nodi; in particolare, quando associato alla conducibilità idraulica K_x , quest'ultima è il risultato della media armonica dei valori di conducibilità idraulica assegnati ad ogni nodo.

Analogamente, l'equazione 5-2 può essere formulata allo stesso modo anche per le altre due dimensioni spaziali; mentre la derivata temporale nella notazione alle differenze finite è formulata nel seguente modo:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{h_{i,j,k}^{n+1} - h_{i,j,k}^n}{\Delta t} \quad 5-3$$

dove gli apici n ed $n+1$, indicano rispettivamente il corrente e il successivo intervallo temporale.

Sebbene in MODFLOW-2005 sia stata sviluppata l'equazione in condizioni di non equilibrio (stato transitorio), è possibile comunque simulare lo stato stazionario ponendo la variazione di immagazzinamento nella parte destra dell'equazione pari a zero.

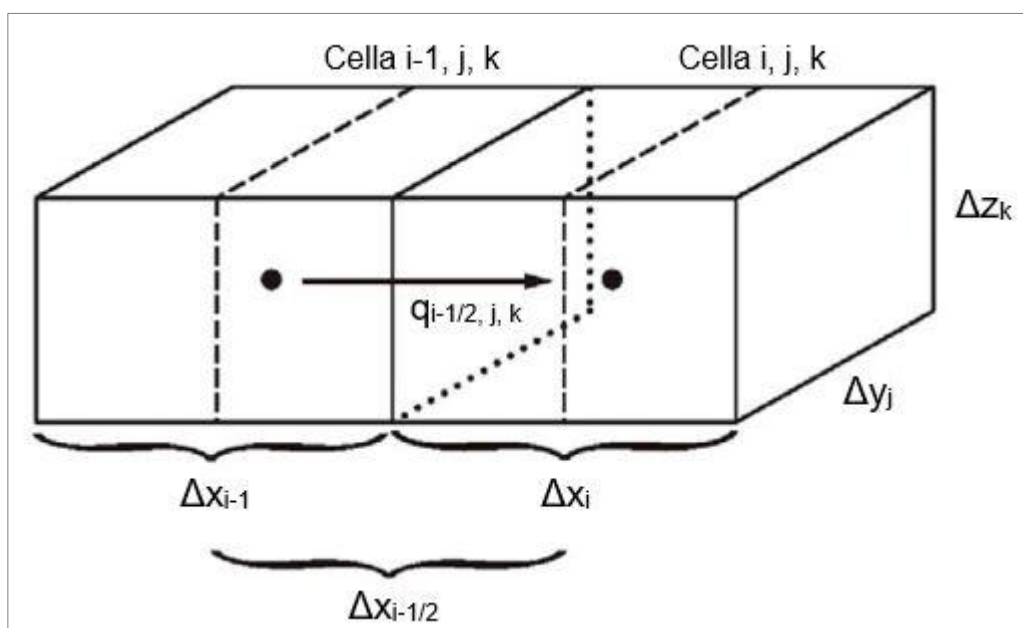


Figura 5.1 – Flusso monodimensionale tra due celle adiacenti.

5.3 Simulazioni implementate

Gli obiettivi del presente studio sono di quantificare i contributi provenienti dai fattori che concorrono al bilancio idrogeologico del sistema acquifero dell'Alta Pianura Veneta, riproducendone il comportamento entro uno spazio tridimensionale dalla geometria, caratteristiche idrauliche e stress applicati ben definiti; inoltre, particolare attenzione è stata rivolta alla definizione del contributo legato all'irrigazione, distinguendolo, per quanto possibile, dal contributo derivante dalle precipitazioni.

Per il raggiungimento degli obiettivi sono stati utilizzati due tipi di simulazioni: di calibrazione e previsionali, in entrambi i casi implementate allo stato stazionario.

Per quanto concerne la calibrazione sono state implementate 3 simulazioni che ottimizzano altrettante distribuzioni di carico idraulico all'interno dell'acquifero freatico (SC-1, SC-2 e SC-3).

Le simulazioni previsionali portate a termine consistono nel sottoporre il sistema acquifero alle nuove condizioni meteo-climatiche ipotizzate per il periodo 2070-2100 (Baruffi et al., 2012) e a nuovi stress derivanti dall'irrigazione, cercando di conseguenza di prevederne le reazioni nel lungo periodo.

Sono stati, quindi, riprodotti 3 scenari previsionali combinando le future condizioni meteo-climatiche dell'area con i possibili impatti derivanti dall'adozione di diverse strategie nella gestione delle acque in materia di distribuzione irrigua, simulati anch'essi allo stato stazionario (SP-1, SP-2, SP-3) dai quali è stato ricavato il nuovo bilancio idrogeologico dell'area in oggetto.

5.4 Discretizzazione spaziale

Una volta definito il modello concettuale e scelto il tipo di codice da adottare per la modellazione, è necessario progettare e discretizzare lo spazio entro cui simulare il comportamento del sistema acquifero (o dominio di modellazione).

La tipologia di cella utilizzata è di tipo *block-centered*, ossia con il nodo posizionato al centro della cella e con forma parallelepipedica (*structured grid*); sul piano orizzontale la spaziatura dei nodi è stata dimensionata con un passo costante di 100 m sia in *x* che in *y*.

Verticalmente, il volume compreso tra la superficie topografica al *top* del dominio (identificata dal DEM della Regione Veneto con maglia di 25 x 25 m; Figura 5.2) e la superficie rappresentante la base del Pliocene al suo *bottom* (Figura 5.3), è stato discretizzato con tre *layer* di spessore massimo pari a 300 m. Le superfici di separazione tra i layer 1 e 2 e tra i layer 2 e 3 sono due piani orizzontali ubicati rispettivamente a -265 e -565 m s.l.m. Infine, sono state disattivate tutte le celle che presentavano uno spessore inferiore a 50 m, presenti nel settore più settentrionale del dominio.

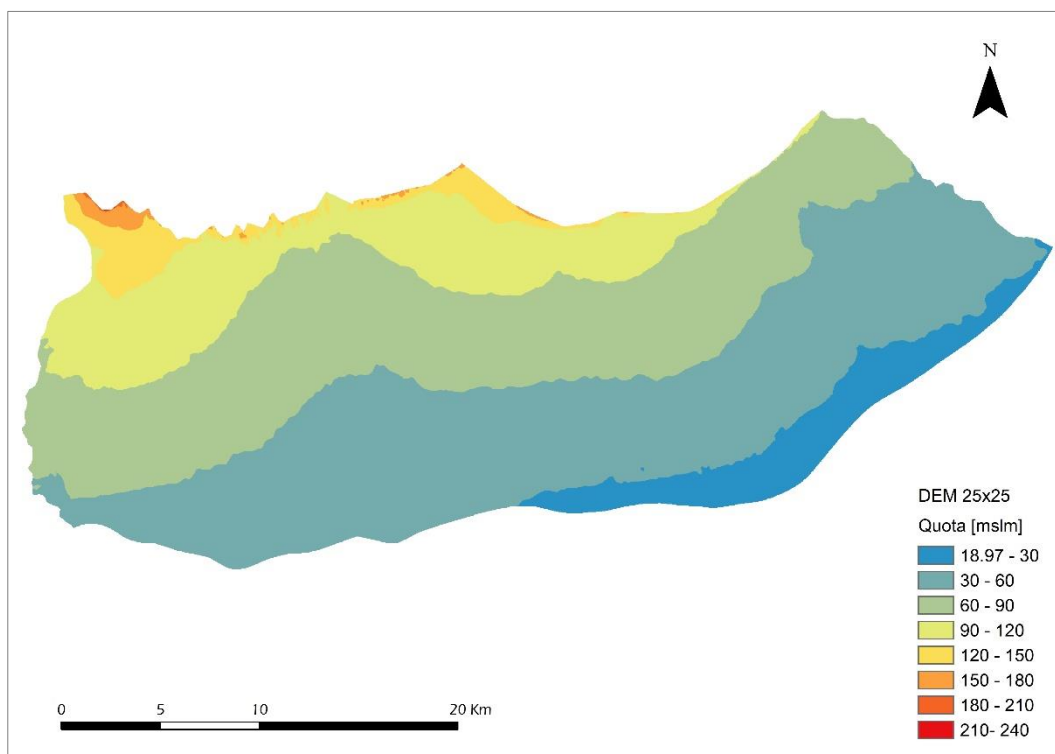


Figura 5.2 - Porzione del DEM della Regione Veneto di maglia 25 x 25 m utilizzato per la ricostruzione del top del dominio di modellazione.

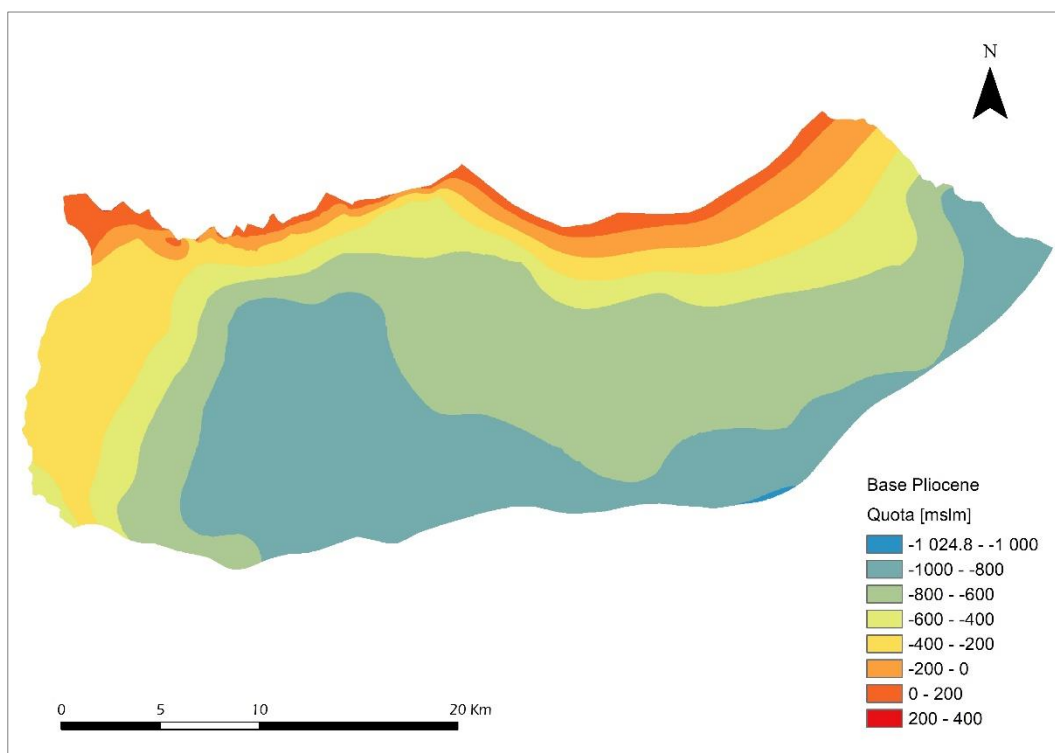


Figura 5.3 - Raster di maglia 25 x 25 m relativo alla base del Pliocene rappresentante la superficie di bottom del dominio di modellazione. (Modificato da Pola et al., 2014)

5.5 Parametrizzazione

Nelle simulazioni allo stato stazionario, gli unici parametri di input da immettere nel modello sono le componenti principali del tensore della conducibilità idraulica (K_{xx} , K_{yy} , K_{zz}). In MODFLOW-2005 questa operazione è effettuata immettendo il valore della conducibilità idraulica orizzontale (K_{xx}) e definendo i rapporti di anisotropia sul piano orizzontale (K_{xx}/K_{yy}) e verticale (K_{xx}/K_{zz}). In questo lavoro si è deciso di associare ad ogni layer del modello un tensore della permeabilità isotropo ($K_{xx} = K_{yy} = K_{zz}$), e di rappresentare le anisotropie verticali immettendo valori di K_{xx} progressivamente più bassi con la profondità. In particolare al primo layer è stato associato preliminarmente un valore di K_{xx} pari a 86.4 m/d, mentre al secondo e terzo layer sono stati associati, rispettivamente i valori di 8.64 m/d e 0.864 m/d. I valori riportati sono quelli immessi nel modello in via preliminare, essi sono stati ottimizzati a seguito del processo di calibrazione.

5.6 Condizioni al contorno

I flussi in entrata e in uscita dal modello vengono riprodotti mediante l'implementazione delle condizioni al contorno che vincolano la soluzione lungo il perimetro del modello o al suo interno. Matematicamente esistono 3 tipi di condizioni al contorno:

- *Tipo 1: carico assegnato (condizione di Dirichlet)*, dove il carico relativo ad una cella o ad un gruppo di celle è impostato ad un valore fisso. Questo tipo di condizione non dà alcun controllo sul flusso (gradiente) in entrata o in uscita dal sistema.
- *Tipo 2: flusso assegnato (condizione di Neumann)*, con la quale si assegna ad un valore specifico la derivata del carico in una determinata direzione (flusso).

Una particolare formulazione della condizione di *Neumann*, consiste nel porre il flusso pari a zero (limite impermeabile); questo tipo di condizione è stata assegnata al limite settentrionale del dominio di modellazione (Figura 5.4) ed in corrispondenza delle base del dominio.

- *Tipo 3: flusso dipendente dal carico (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 formulazione:

$$Q = CA(h_{bou} - h_{ijk}) \quad 5-4$$

dove: 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 da:

$$C = \frac{K_i}{b} \quad 5-5$$

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

In MODFLOW-2005 le boundaries vengono implementate attivando delle *subroutine* (pacchetti) al codice principale; ogni pacchetto simula uno specifico tipo di stress che viene applicato al sistema.

I pacchetti utilizzati nel modello in oggetto sono i seguenti:

- *Well (WEL)*, è un pacchetto concepito con lo scopo di simulare il prelievo o l'iniezione di acqua attraverso degli elementi puntuali (condizione di Tipo 2). Ogni elemento necessita di due parametri di input: il flusso volumetrico (Q) in entrata ($Q > 0$) o in uscita ($Q < 0$) dal sistema e il layer (profondità) a cui è applicato lo stress. Mediante questo pacchetto sono stati simulati i prelievi acquedottistici e privati nell'area in esame, associandoli tutti al primo layer, attraverso l'implementazione dei 44 pozzi acquedottistici (Tabella 4-13) e dei 192 pozzi privati ai quali è stata attribuita una portata media di 1820 m³/d, come descritto del paragrafo 4.3.2.

- *Recharge (RCH)*, è un pacchetto che simula la ricarica zenitale al sistema acquifero distribuita arealmente (condizione di tipo 2). L'unico parametro di input necessario per la sua implementazione è il valore di *recharge rate* (L/T) da applicare ad ogni cella. Il flusso in entrata è calcolato moltiplicando il valore di lama d'acqua per l'area della cella. Tramite questo pacchetto si è simulata la ricarica dell'acquifero derivante dalla precipitazione e dall'irrigazione. Il valore di input iniziale assegnato è pari a 3.6E-0.3 m/d (valore modificato a seguito della calibrazione) derivante dal bilancio idrogeologico analitico esposto nel paragrafo 4.5. La boundary *recharge* è stata applicata su tutte le celle del layer 1.
- *River (RIV)*, con il quale si riproduce la relazione tra le acque superficiali (corsi d'acqua in questo caso) e quelle sotterranee (condizione di Tipo 3). I fiumi interagiscono con l'acquifero drenando o apportando acqua al sistema, in funzione della differenza di carico tra il fiume e la falda. Il flusso in entrata ($Q_{Riv} > 0$) o in uscita ($Q_{Riv} < 0$) dal sistema ad opera della condizione *river* è determinato tramite la seguente relazione:

$$Q_{Riv} = C_{Riv}A(h_{Riv} - h_{ijk}) \quad 5-6$$

dove C_{Riv} è la conduttanza verticale rappresentativa delle caratteristiche idrauliche del letto del fiume (equazione 5-5), h_{Riv} è il livello idrometrico assegnato del fiume (*river stage*), A è l'area della cella attraverso cui la filtrazione, mentre h_{ijk} è il carico idraulico calcolato dal modello nella cella contenente la condizione *river*. Per la sua corretta implementazione è necessario immettere, oltre al valore del livello idrometrico (*river stage*), anche la quota del letto del fiume (*river bottom*) insieme ad un valore di conduttanza verticale. È necessario quindi descrivere il comportamento di questa condizione in funzione del carico idraulico calcolato al nodo della cella (h_{ijk}) rispetto alla quota del *river bottom*: per valori di h_{ijk} maggiori della quota del *river bottom*, il flusso varia linearmente, diventando negativo

quando h_{ijk} è maggiore rispetto al *river stage* (il fiume mostra un carattere drenante); quando il carico idraulico calcolato dal modello è al di sotto del *river bottom*, il flusso affluente al sistema dal fiume rimane costante (nell'equazione 5–6, h_{ijk} viene sostituito dalla quota assegnata di *river bottom*, di conseguenza la differenza di carico rimane costante). Con questo pacchetto sono stati implementati nel modello i corsi d'acqua principali che attraversano il dominio di modellazione (Brenta, Piave, Muson dei Sassi, Giavera e Caerano) tutti applicati al primo layer della griglia di discretizzazione (Figura 5.4).

Nel caso particolare i valori di *river stage* usati sono quelli mostrati nel paragrafo 4.2 (Tabella 4-8), il valore di conduttanza assegnato è pari a 46.2 m²/d per tutti i fiumi (valore modificato a seguito della calibrazione).

- *Drain (DRN)*, con questo pacchetto si applica un'azione drenante al sistema (Condizione di Tipo 3). Il flusso in uscita (Q_{out}) dalla condizione *drain* è calcolato attraverso una formulazione molto simile a quella della condizione *river*:

$$Q_{out} = C_{Drn}A(h_{ijk} - h_{Drn}) \quad 5-7$$

dove C_{Drn} è la conduttanza associata al dreno (equazione 5–5), h_{Drn} è la quota del dreno (*drain elevation*), A è l'area della cella attraverso cui la filtrazione, mentre h_{ijk} è il carico idraulico calcolato dal modello al nodo relativo alla cella contenente la condizione. Il dreno inoltre è attivo solo se il carico idraulico h_{ijk} è maggiore della *drain elevation*.

Nell'ambito di questo modello la condizione *drain* è stata usata nel primo layer per simulare sia il flusso sotterraneo uscente dal sistema nel limite meridionale (ricarica degli acquiferi confinati) sia la restituzione freatica alle risorgive. Tale condizione è stata applicata anche nei layer 2 e 3 (Figura 5.4). In tutti i casi la *drain elevation* è stata fissata pari alla quota della superficie topografica.

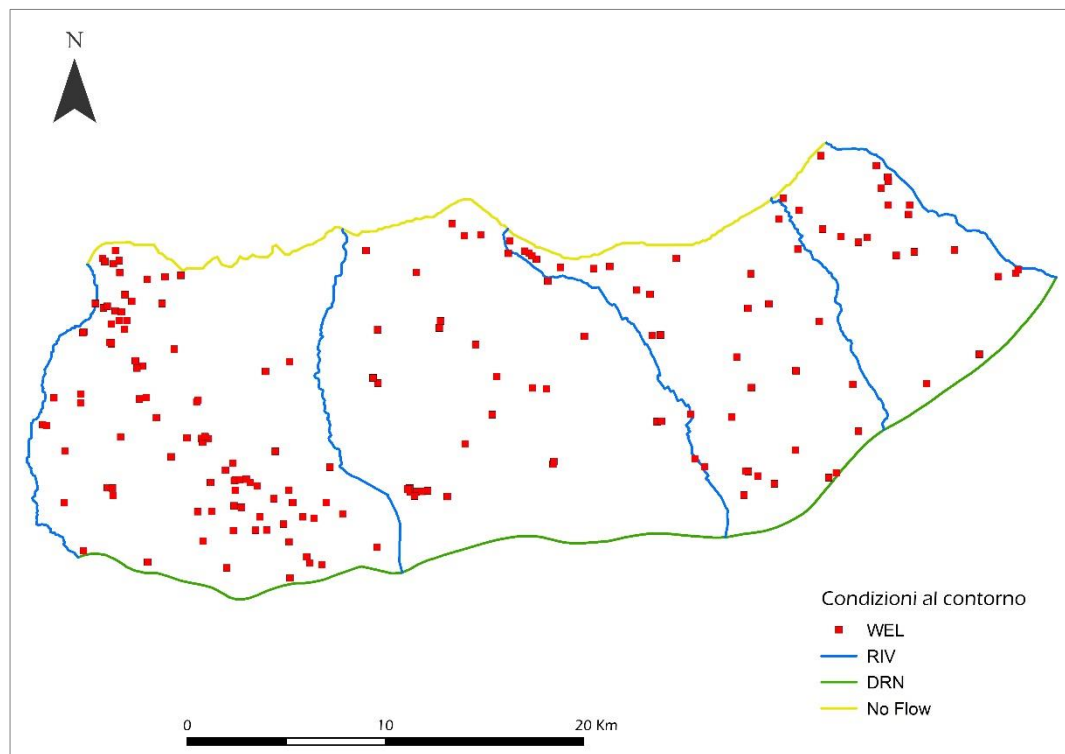


Figura 5.4 - Condizioni al contorno implementate nel modello numerico. La condizione recharge (RCH) è da ritenersi applicata su tutto il dominio di modellazione.

5.7 Approccio metodologico alla calibrazione

I valori iniziali di conducibilità idraulica orizzontale, di conduttanza delle *boundaries river* e *drain* e di ricarica zenitale (RCH) sono stati soggetti ad un processo di calibrazione, attraverso il quale si pone il modello di flusso nei termini di un *problema inverso* e nel quale si usano le variabili dipendenti dell'equazione costitutiva per ricavarne i parametri (parametri di calibrazione). Obiettivo di questo processo è quindi di determinare il set di parametri, stress e/o condizioni al contorno che possano minimizzare le differenze tra i valori acquisiti sperimentalmente in sito (*target* di calibrazione) con gli equivalenti valori calcolati dal modello numerico. In questo lavoro, i target di calibrazione adottati sono rappresentati dalle misure del carico idraulico, che costituiscono l'output diretto dell'equazione di flusso.

Per quantificare il grado di approssimazione della calibrazione (*hard knowledge*), i valori di carico idraulico misurati nei target di calibrazione e gli equivalenti valori

di carico idraulico simulati vengono sottoposti ad elaborazioni statistiche che si basano sul *residuo* (R) del i -esimo target:

$$R_i = (h_m - h_s)_i \quad 5-8$$

dove h_m e h_s sono rispettivamente il carico idraulico misurato e calcolato in un target di calibrazione. Il parametro statistico che generalmente viene usato per quantificare la bontà di una calibrazione è lo *scarto quadratico medio normalizzato* ($nRMS$), espresso in percentuale e definito come lo scarto quadratico medio (RMS) rapportato al *range* dei valori misurati:

$$RMS = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i^2 \right]^{0.5} \quad 5-9$$

$$nRMS = \frac{RMS}{h_{m \max} - h_{m \min}} \quad 5-10$$

Tradizionalmente si considerano calibrati i modelli in cui $nRMS$ scende sotto al 10% (Anderson & Woessner, 1992).

Tuttavia, una buona approssimazione delle misure sperimentali non implica necessariamente che la soluzione sia comunque accettabile, in quanto, per poterla ritenere tale, è necessario altresì che i parametri stimati siano consistenti con la realtà fisica del sistema acquifero che si intende simulare. Per cui, i risultati ottenuti attraverso la calibrazione devono essere sistematicamente valutati sulla base della loro ragionevolezza idrogeologica; tale valutazione si basa su tutte le informazioni che si hanno a disposizione derivanti dalla conoscenza geologica e idrologica del sito in oggetto (*soft knowledge*).

Il metodo tradizionalmente adottato per eseguire la calibrazione viene definito *trial-and-error* e la sua esecuzione, finalizzata a fornire una soluzione indiretta al mo-

dello inverso, prevede di modificare i parametri di input e di rifare il *run* del modello, tante volte fin quando non si raggiunge il grado di approssimazione desiderato.

Nell'ambito di questo lavoro, invece, si è deciso di adottare il metodo della calibrazione automatica attraverso l'uso di PEST (*Parameter ESTimator*; Doherty, 2015). PEST è un software di ottimizzazione dei parametri, *model-independent*, che incorpora un algoritmo *Gauss-Marquardt-Levenberg (GML)* di regressione non lineare ai minimi quadrati. PEST, così come altri pacchetti di calibrazione, è finalizzato alla minimizzazione della *funzione obiettivo* (Φ ; intesa come ricerca del punto di minimo della sua superficie multidimensionale), calcolata come la somma del quadrato dei residui pesati. Nel caso di un'unica tipologia di target di calibrazione (come nel caso in oggetto) la funzione obiettivo è espressa con la seguente formulazione:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n [w_{hi}(h_m - h_s)_i]^2 \quad 5-11$$

dove w_{hi} è il peso della i -esima misura (osservazione) di carico idraulico mentre h_m e h_s sono rispettivamente il carico idraulico misurato e il carico idraulico simulato. L'equazione 5-11 può essere ulteriormente espansa per incorporare qualsiasi altro tipo di target di calibrazione (flusso, differenze di carico ecc.).

Per la ricerca del valore minimo della funzione obiettivo, il metodo incorporato da PEST (il *GML* accennato sopra) necessita della determinazione della pendenza della superficie della funzione obiettivo. Tale gradiente è calcolato attraverso la definizione dei *coefficienti di sensitività* che esprimono l'impatto che una piccola variazione del valore di un parametro comporta sulla soluzione calcolata dal modello (carico simulato). La comparazione si basa sui valori di carico che vengono simulati dato il set di parametri iniziale, mentre la variazione del carico simulato è ottenuta modificando i valori iniziali dei parametri e sottraendo il valore iniziale del target dal nuovo valore ottenuto con i parametri perturbati. Questa operazione è portata a termine perturbando singolarmente ogni parametro di calibrazione ed eseguendo di volta in volta un nuovo *run* del modello con lo scopo di quantificare le

variazioni nella soluzione. Il set dei coefficienti di sensitività (che andranno a costituire la matrice Jacobiana) incorpora le informazioni relative alla pendenza della funzione obiettivo, sulla base della quale si definiscono le variazioni (*upgrade*) a cui sottoporre ogni parametro di calibrazione, che portano verso il minimo globale della funzione obiettivo. Dopo aver aggiornato i parametri di calibrazione viene calcolato il nuovo valore della funzione obiettivo per poi rieseguire iterativamente l'intero processo appena descritto fino a che uno dei criteri di convergenza non viene infine soddisfatto. A tale riguardo PEST è vincolato da diversi criteri di convergenza, alcuni relativi all'andamento della funzione obiettivo, altri relativi invece all'entità della variazione dei parametri di calibrazione durante le diverse iterazioni.

PEST permette inoltre di eseguire l'inversione di modelli ad elevata parametrizzazione (Doherty & Hunt, 2010), caratterizzati dall'avere più parametri di calibrazione di quelli che si potrebbero univocamente stimare dato un determinato set di target di calibrazione (modello inverso *mal posto*). In questi casi l'unicità della soluzione numerica è raggiunta attraverso l'uso delle funzioni di regolarizzazione, che aggiungono nuovi vincoli ai parametri di calibrazione. La regolarizzazione di *Tikhonov* utilizzata in PEST, costituisce un modo per incorporare nell'equazione della funzione obiettivo (5–11) informazioni generiche (a priori) riguardanti il sistema che si vuole simulare. Questo tipo di regolarizzazione in particolare aumenta il valore della funzione obiettivo attraverso una funzione di regolarizzazione che esprime la deviazione dei parametri di calibrazione dalle condizioni specificate dall'utente. Questo garantisce, quindi, il raggiungimento di un'unica soluzione (dataset di parametri di calibrazione) che riduce al minimo la deviazione dai valori osservati e allo stesso tempo è consistente con le informazioni a priori riguardanti il sito. Un altro tipo di regolarizzazione, invece, prevede l'individuazione dei parametri di calibrazione non sensibili al set di target di calibrazione, rimuovendoli dalla matrice Jacobiana e velocizzando il processo di calibrazione (*SVD* o *Singular Value Decomposition*).

Come già accennato in precedenza, sono state implementate 3 simulazioni di calibrazione in stazionario (SC-1, SC-2, SC-3), impostate nell'ottica di diminuire progressivamente il grado di semplificazione del problema e aumentando di conseguenza il numero di parametri da ottimizzare.

5.8 Calibrazione allo stazionario

Mediante le prime simulazioni di calibrazione in stazionario sono stati ottimizzati i parametri di calibrazione relativi alla conducibilità idraulica dei tre *layer* (in questa sede definiti come HK_100 per il *layer* 1, HK_200 per il *layer* 2 e HK_300 per il *layer* 3), alla ricarica zenitale (RCH_600) e alle conduttanze delle *boundaries river* e *drain* (la cui denominazione è mostrata in Figura 5.5). Nelle tre implementazioni la distribuzione di permeabilità è stata differenziata secondo tre approcci diversi che verranno ora descritti in dettaglio.

Con il primo approccio (SC-1), il più semplice, ogni *layer* è stato definito con caratteristiche idrauliche omogenee, ottimizzando quindi ogni parametro di calibrazione della permeabilità attraverso un unico valore.

Nel secondo modello (SC-2), la permeabilità del primo *layer* è stata differenziata secondo tre diverse zone rappresentative delle porzioni dei tre megafan (del Brenta; di Montebelluna e di Nervesa; Figura 3.3) ricadenti nell'area di studio ed attribuendo ad ognuna di loro un diverso parametro di calibrazione (Figura 5.6); i parametri di calibrazione degli altri due *layer* sono i medesimi del modello precedente. Nell'ultima simulazione (SC-3), invece, è stata effettuata un'inversione ad elevata parametrizzazione incorporando la regolarizzazione di Tikhonov. Il numero di parametri di conducibilità idraulica orizzontale da ottimizzare è stato incrementato mediante l'uso di 50 *pilot points* (Doherty et al., 2010; Figura 5.7) con i quali si è ricostruita la distribuzione spaziale della permeabilità interpolando i valori dei suddetti *pilot points* su tutto il dominio mediante il *kriging ordinario* con variogramma lineare.

Questo metodo è stato adottato per ottimizzare la conducibilità del primo *layer* (HK_100), mentre quelle relative agli altri *layer* sono state ottimizzate con un unico valore come nei casi precedenti.

In tutti i casi le conducibilità del secondo (HK_200) e del terzo layer (HK_300) sono state ottimizzate di modo che la conducibilità idraulica orizzontale attribuita al terzo layer fosse 10 volte inferiore a quella del secondo. Ad ogni parametro di calibrazione, inoltre, è stato associato ad un *range* di valori all'interno del quale ricercare la soluzione, al fine di ottenere un valore che fosse realistico dal punto di vista idrogeologico. In particolare per i parametri di calibrazione della conducibilità idraulica è stato utilizzato un range di valori compresi tra $1\text{E}-10$ e $1\text{E}+03$ m/d, per le conduttanze un range tra $1\text{E}-10$ e $1\text{E}+05$ m²/d, mentre per la ricarica un range di valori tra $1\text{E}-10$ e 1 m/d.

Di seguito, i risultati ottenuti con i diversi approcci verranno confrontati tra loro al fine di identificare la simulazione che rappresenta nel modo migliore il sistema acquifero in oggetto.

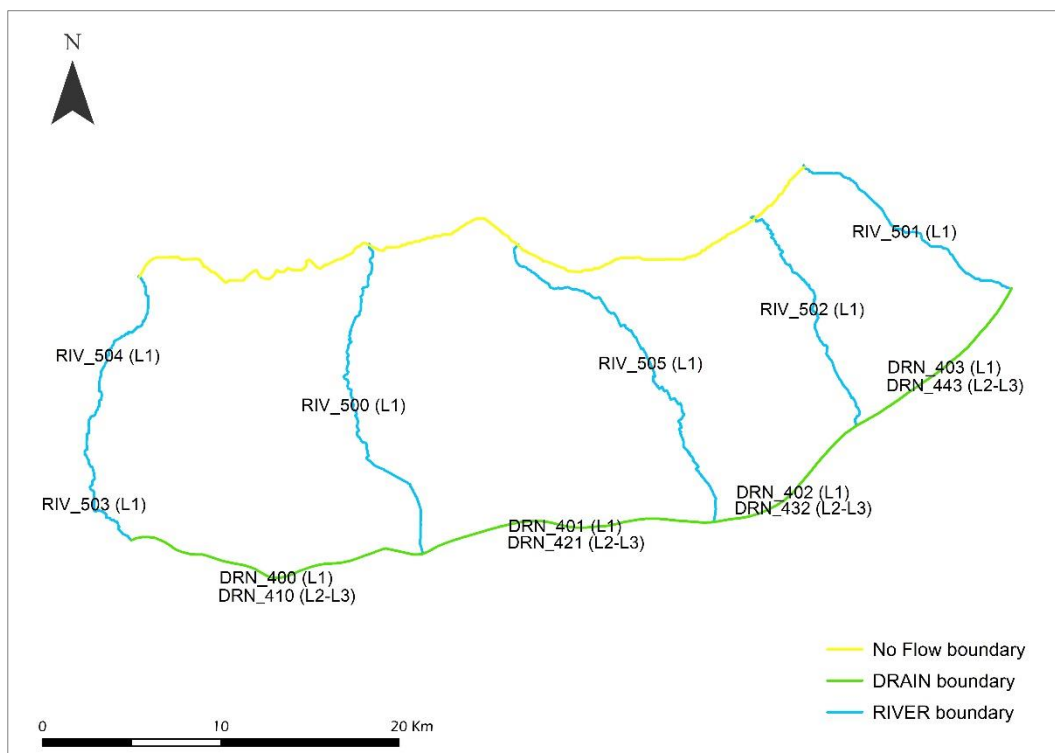


Figura 5.5– Parametri di calibrazione per le conduttanze delle boundaries river (RIV) e drain (DRN). I termini L1, L2 e L3, indicano il layer a cui il relativo parametro di calibrazione è riferito.

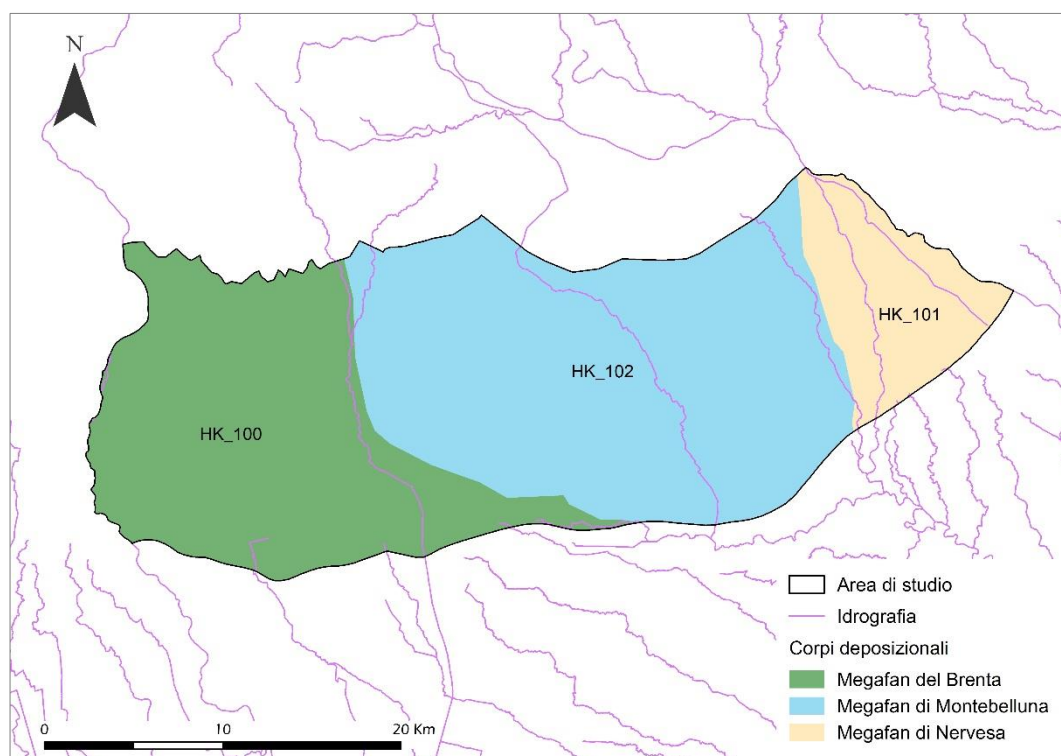


Figura 5.6 – Zonazione del primo layer del modello per l'ottimizzazione della conducibilità idraulica. I poligoni sono rappresentativi dei megafan mostrati in Figura 3.3.

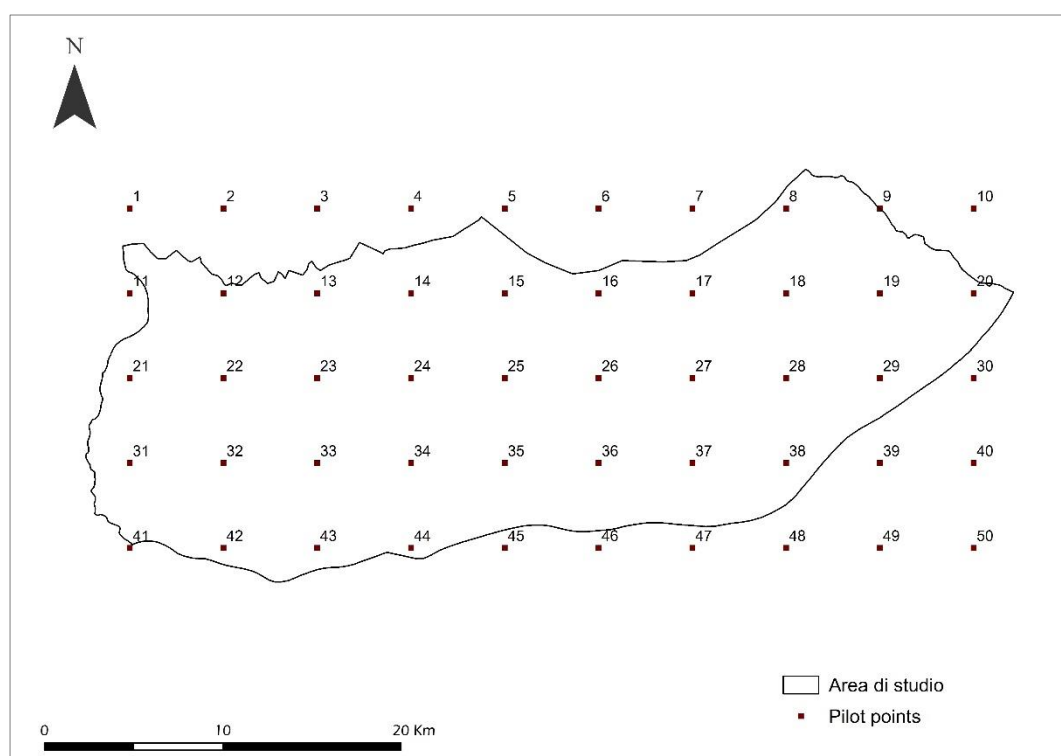


Figura 5.7 – Pilot points utilizzati per la ricostruzione della distribuzione spaziale della conducibilità idraulica nell'inversione del modello ad elevata parametrizzazione (SC-3).

5.8.1 Risultati della calibrazione allo stazionario

Al fine di scegliere la più adeguata a riprodurre il sistema acquifero tra le tre simulazioni di calibrazione allo stato stazionario realizzate, vengono ora confrontate le principali tipologie di *output* ricavate dai vari modelli, vale a dire: il set di parametri ottimizzati, la distribuzione di carico idraulico con relativo scarto quadratico medio normalizzato (*nRMS*) e il bilancio di massa del sistema.

Set di parametri ottimizzati

Di seguito vengono riportati i parametri ottimizzati dalle tre simulazioni di calibrazione (Tabella 5-1 e Tabella 5-2).

Per quanto riguarda la permeabilità le prime due simulazioni presentano i valori più elevati nel secondo layer del modello; in particolare nella simulazione SC-2, i valori più bassi di conducibilità idraulica sono stati calcolati nel poligono centrale del primo layer (rappresentativo del megafan di Montebelluna) mentre le altre due zone sono caratterizzate da valori di permeabilità tra loro molto simili.

<i>Parametro</i>	<i>SC-1 [m/d]</i>	<i>SC-2 [m/d]</i>	<i>SC-3 [m/d]</i>
<i>HK_100</i>	96.30	262.61	<i>Pilot points</i>
<i>HK_101</i>	-	236.88	-
<i>HK_102</i>	-	2.45	-
<i>HK_200</i>	265.97	964.62	44.82
<i>HK_300</i>	26.60	96.46	4.48
<i>DRN_400</i>	125.27	130.78	244.73
<i>DRN_401</i>	300.84	508.85	174.01
<i>DRN_402</i>	2804.58	10632.38	422.03
<i>DRN_403</i>	125.87	73.67	126.00
<i>DRN_410</i>	183.34	1745.35	320.93
<i>DRN_421</i>	331.83	523.25	164.60
<i>DRN_432</i>	1031.02	2432.08	203.32
<i>DRN_443</i>	151.28	155.73	154.13
<i>RIV_500</i>	2.97	0.51	0.73
<i>RIV_501</i>	10.92	39.46	3.52
<i>RIV_502</i>	9.65	0.10	0.64
<i>RIV_503</i>	0.76	0.11	14.94
<i>RIV_504</i>	41.54	127.54	6.56
<i>RIV_505</i>	8.11	0.27	0.94
<i>RCH_600</i>	2.54E-06	1.43E-03	3.07E-03

Tabella 5-1 – Set di parametri ottenuti dalle tre simulazioni di calibrazione allo stato stazionario.

<i>HK_100 pilot point</i>	<i>Valore [m/d]</i>	<i>HK_100 pilot point</i>	<i>Valore [m/d]</i>
<i>sc1v1</i>	115.73	<i>sc1v26</i>	87.75
<i>sc1v2</i>	117.58	<i>sc1v27</i>	29.48
<i>sc1v3</i>	119.50	<i>sc1v28</i>	49.64
<i>sc1v4</i>	93.30	<i>sc1v29</i>	805.13
<i>sc1v5</i>	82.53	<i>sc1v30</i>	129.33
<i>sc1v6</i>	100.37	<i>sc1v31</i>	40.17
<i>sc1v7</i>	29.99	<i>sc1v32</i>	118.53
<i>sc1v8</i>	236.33	<i>sc1v33</i>	979.54
<i>sc1v9</i>	100.22	<i>sc1v34</i>	981.64
<i>sc1v10</i>	86.58	<i>sc1v35</i>	845.82
<i>sc1v11</i>	34.67	<i>sc1v36</i>	1000.00
<i>sc1v12</i>	0.08	<i>sc1v37</i>	851.26
<i>sc1v13</i>	45.64	<i>sc1v38</i>	1000.00
<i>sc1v14</i>	34.97	<i>sc1v39</i>	245.72
<i>sc1v15</i>	21.02	<i>sc1v40</i>	94.21
<i>sc1v16</i>	494.03	<i>sc1v41</i>	72.35
<i>sc1v17</i>	1.79	<i>sc1v42</i>	313.51
<i>sc1v18</i>	14.48	<i>sc1v43</i>	994.28
<i>sc1v19</i>	90.57	<i>sc1v44</i>	998.05
<i>sc1v20</i>	114.71	<i>sc1v45</i>	463.10
<i>sc1v21</i>	151.43	<i>sc1v46</i>	374.57
<i>sc1v22</i>	3.23	<i>sc1v47</i>	167.28
<i>sc1v23</i>	29.75	<i>sc1v48</i>	99.99
<i>sc1v24</i>	49.42	<i>sc1v49</i>	73.52
<i>sc1v25</i>	21.71	<i>sc1v50</i>	72.81

Tabella 5-2 – Valori del parametro HK_100 per ogni pilot point implementato nella simulazione di calibrazione SC-3.

L'ottimizzazione del parametro HK_100 nella simulazione SC-3, ha portato alla ricostruzione della distribuzione di permeabilità orizzontale nel primo layer del modello. Tale distribuzione (Figura 5.8) mostra, oltre ad una notevole variabilità spaziale, un aumento della permeabilità procedendo da monte verso valle, con valori massimi pari a 1E+03 m/d. I valori minimi (8E-02 m/d) sono presenti nella porzione superiore del dominio di modellazione.

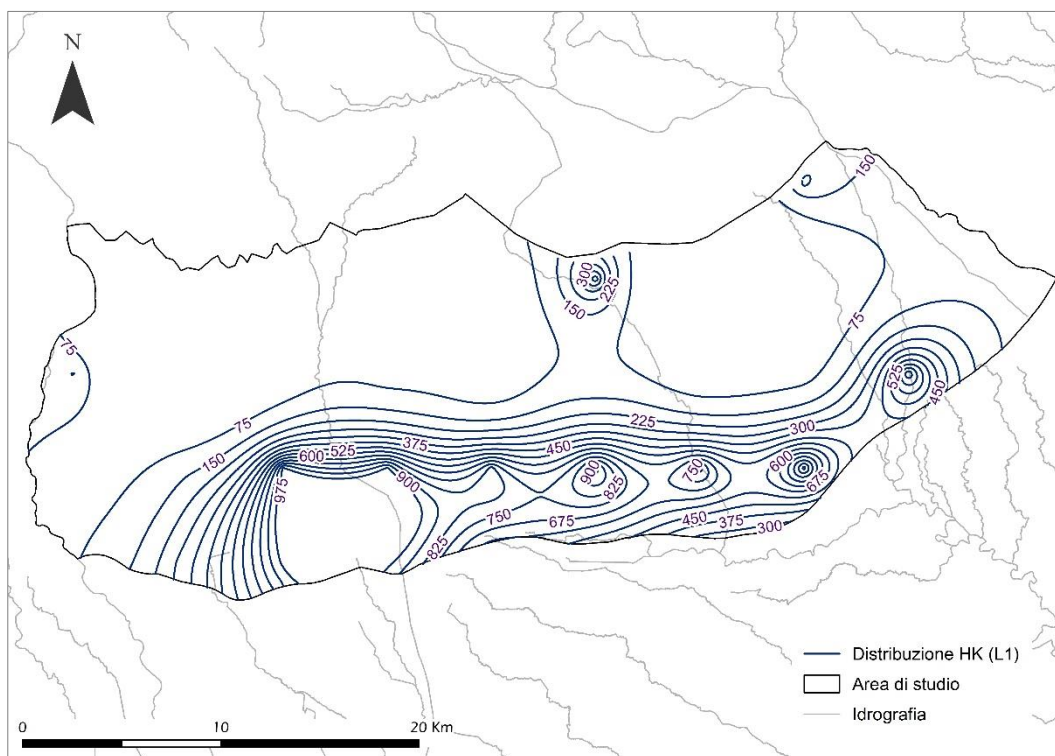


Figura 5.8 – Distribuzione di conducibilità idraulica orizzontale nel primo layer del modello (HK_100) ottenuta dalla simulazione di calibrazione SC-3.

In merito alla *boundary drain*, i valori di conduttanza massimi sono associati al parametro DRN_402 in tutte le implementazioni considerate (Figura 5.5); è opportuno evidenziare come questo parametro sia relativo al dreno localizzato in prossimità dell'emergenza meridionale del principale asse di drenaggio che contraddistingue l'acquifero freatico in questione. Gli archi relativi ai fiumi Brenta e Piave (RIV_504, RIV_501) presentano generalmente i valori più elevati di conduttanza in tutte le implementazioni, le uniche eccezioni riguardano il tratto inferiore del Brenta (RIV_503) a cui nelle prime due simulazioni di calibrazione sono attribuiti valori di conduttanza piuttosto bassi.

Infine la ricarica zenitale (RCH_600) rappresenta il parametro che più influisce sulla valutazione delle tre simulazioni, in quanto nelle implementazioni SC-1 e SC-2 ad esso vengono attribuiti rispettivamente valori di $2.54E-06$ m/d (0.93 mm/y) e di $1.43E-03$ m/d (522.33 mm/y) che si discostano molto dal contesto climatico nel quale l'acquifero è inserito. D'altro canto, la simulazione SC-3 presenta un valore

di infiltrazione pari a $3.07\text{E-}03$ m/d (1121.21 mm/y), molto simile all'infiltrazione totale stimata nei paragrafi precedenti (1319 mm/y).

Distribuzione di carico idraulico e nRMS

La Figura 5.9, la Figura 5.10 e la Figura 5.11 mostrano le distribuzioni di carico idraulico ottenute dall'implementazione dei parametri di calibrazione ottimizzati appena discussi, messe a confronto con la distribuzione ricavata dall'interpolazione dei valori dei target di calibrazione già mostrata nei paragrafi precedenti (Figura 4.21).

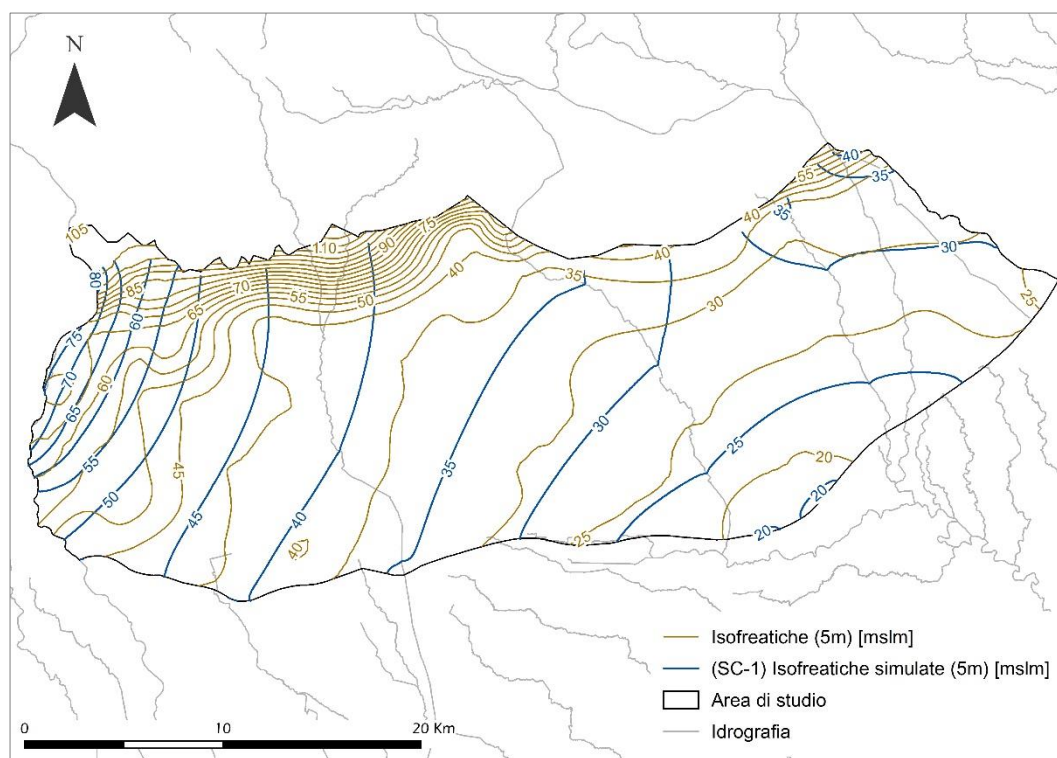


Figura 5.9 – Confronto tra il carico idraulico simulato (layer 1) nella simulazione di calibrazione SC-1 e la distribuzione di carico ottenuta per interpolazione dai valori dei target di calibrazione [nRMS = 7.03%].

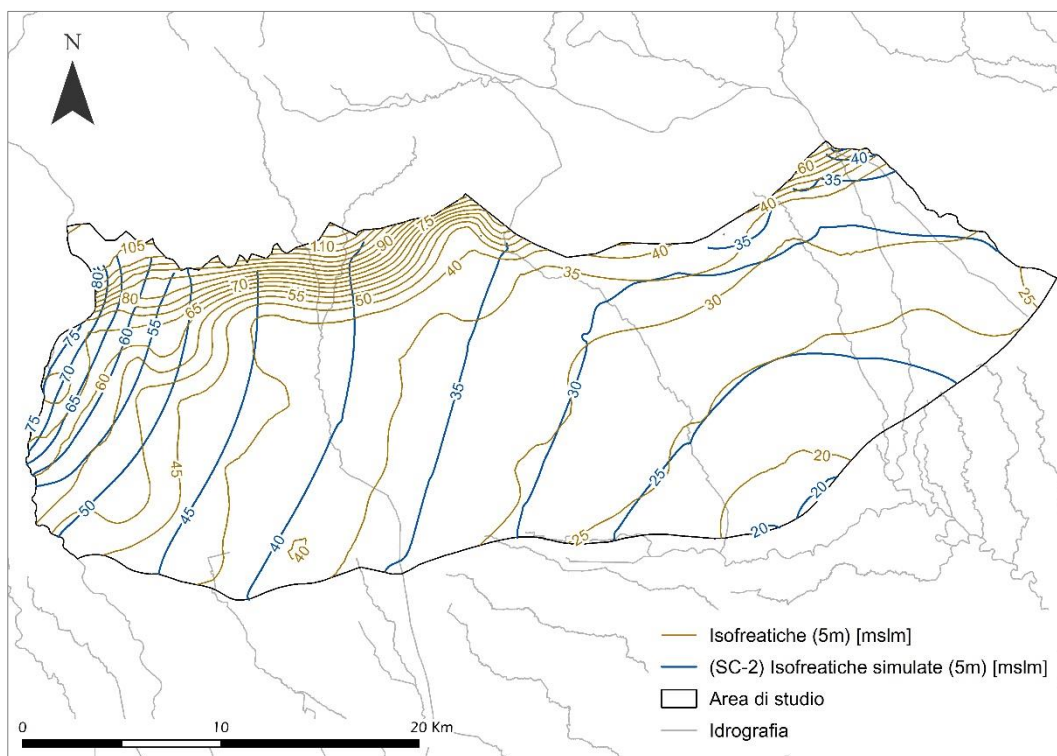


Figura 5.10 – Confronto tra il carico idraulico simulato (layer 1) nella simulazione di calibrazione SC-2 e la distribuzione di carico ottenuta per interpolazione dai valori dei target di calibrazione [nRMS = 6.57%].

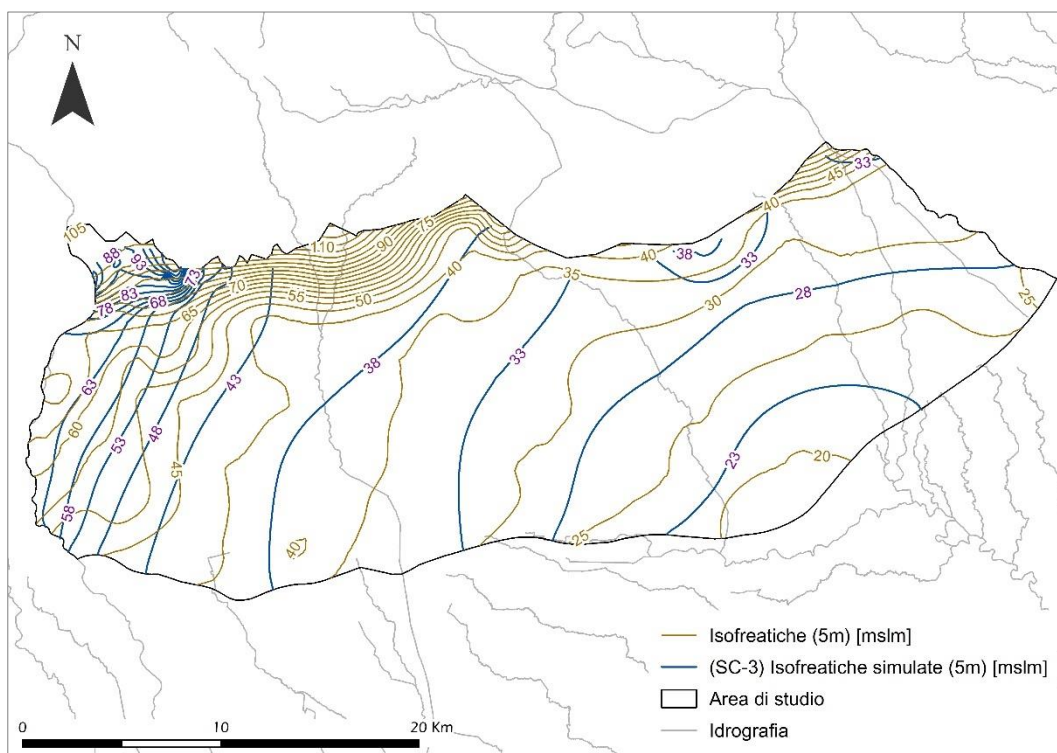


Figura 5.11 – Confronto tra il carico idraulico simulato (layer 1) nella simulazione di calibrazione SC-3 e la distribuzione di carico ottenuta per interpolazione dai valori dei target di calibrazione [nRMS = 3.47%].

Si può constatare come tutte le distribuzioni presentino, sebbene con alcune differenze, tutte le caratteristiche principali dell'acquifero, come la direzione prevalente di flusso e l'asse di drenaggio nel settore orientale dell'area. Inoltre le soluzioni ottenute mostrano una diminuzione dello scarto quadratico medio normalizzato correlabile all'incremento del numero di parametri di calibrazione ottimizzati, e di conseguenza del grado di complessità della relativa inversione.

In particolare le simulazioni SC-1, SC-2 e SC-3 presentano, rispettivamente, valori di $nRMS$ pari a 7.03%, 6.57% e 3.47%. Di seguito (Figura 5.12, Figura 5.13 e Figura 5.14) vengono mostrati gli *scatter plot* tra carico idraulico osservato e carico idraulico simulato nei target di calibrazione per tutte le simulazioni di calibrazione.

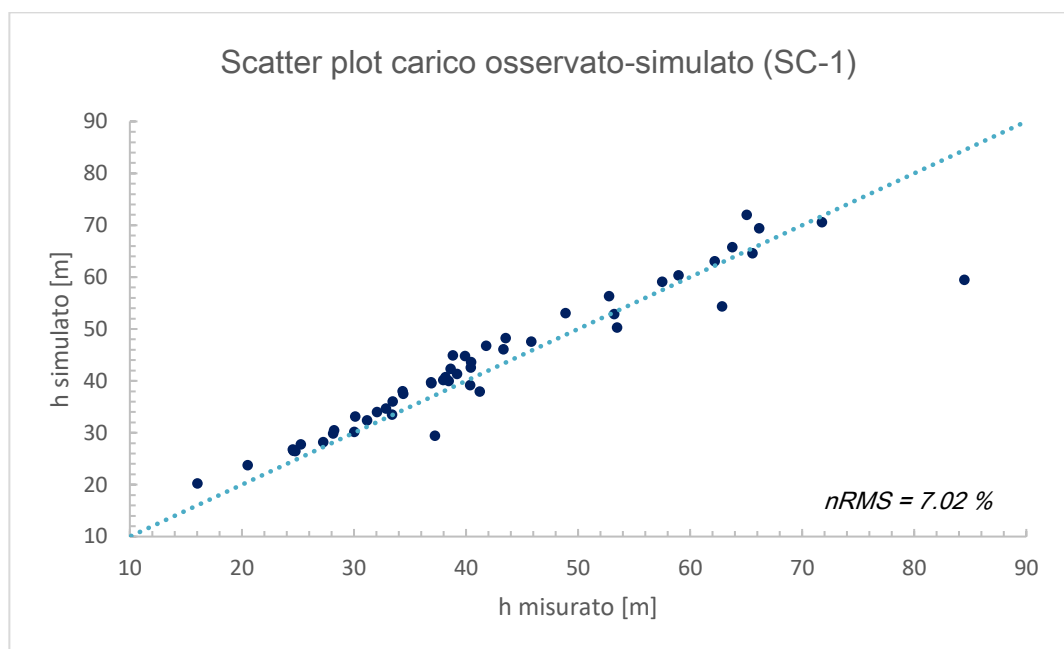


Figura 5.12 – Grafico tra i valori di carico idraulico osservato e simulato nei target di calibrazione per la simulazione SC-1. La linea tratteggiata rappresenta la correlazione 1:1.

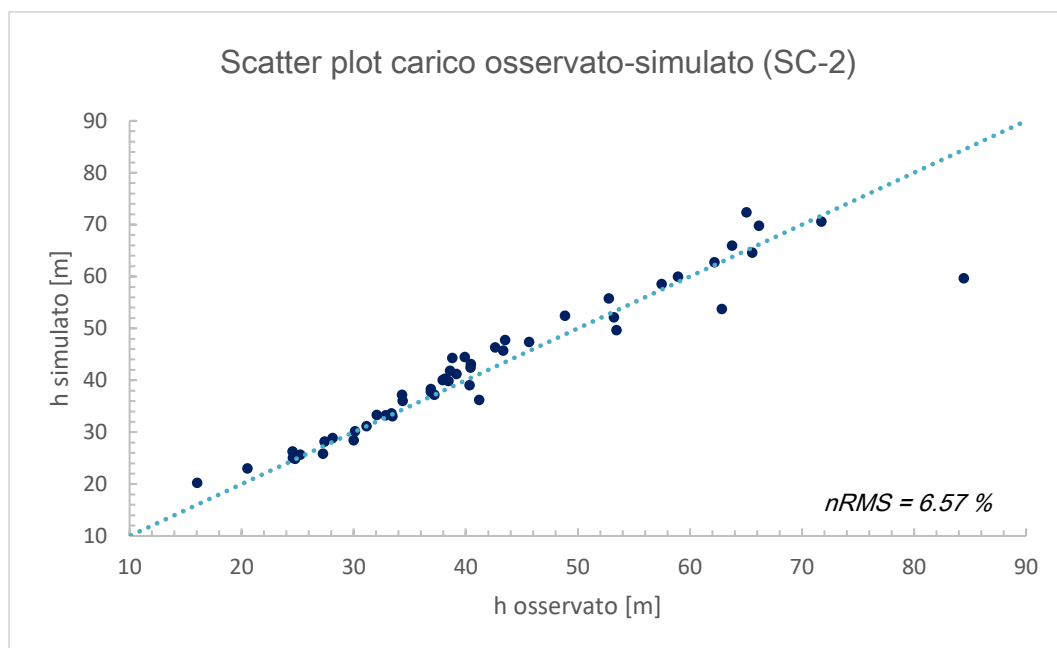


Figura 5.13 – Grafico tra i valori di carico idraulico osservato e simulato nei target di calibrazione per la simulazione SC-2. La linea tratteggiata rappresenta la correlazione 1:1.

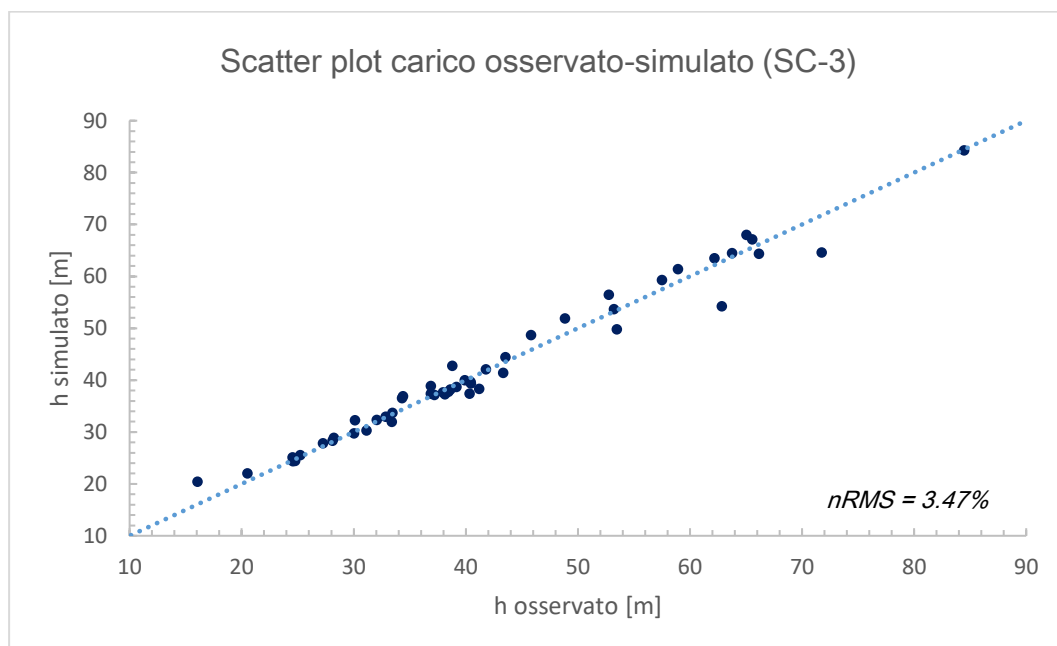


Figura 5.14 – Grafico tra i valori di carico idraulico osservato e simulato nei target di calibrazione per la simulazione SC-3. La linea tratteggiata rappresenta la correlazione 1:1.

Bilancio di massa

Le ultime considerazioni sono rivolte ai bilanci di massa (*flow budget*) risultanti dalle calibrazioni, raffrontati con il bilancio idrogeologico ottenuto analiticamente e presentato nel paragrafo 4.5 (Tabella 4-16).

La simulazione SC-1 indica che la principale fonte di alimentazione dell'acquifero è rappresentata dalle dispersioni in alveo dei corsi d'acqua ($5.03\text{E}+06 \text{ m}^3/\text{d}$), che forniscono un contributo maggiore rispetto a quello riportato dal bilancio analitico ($1.53\text{E}+06 \text{ m}^3/\text{d}$). Nella medesima simulazione si evince che il principale recapito idrogeologico è costituito dai dreni nel margine meridionale del dominio (rappresentativi delle portate defluenti dalle risorgive e del flusso sotterraneo alimentante gli acquiferi in pressione della Media e Bassa Pianura) con un flusso pari a $4.91\text{E}+06 \text{ m}^3/\text{d}$.

Simulazione SC-1	Flow IN [m^3/d]		Flow OUT [m^3/d]	
Boundary	Simulato	Stimato	Simulato	Stimato
WELLS			$3.42\text{E}+05$	$3.46\text{E}+05$
RECHARGE	$1.84\text{E}+03$	$2.66\text{E}+06$		
RIVERS	$5.03\text{E}+06$	$1.53\text{E}+06$	$9.52\text{E}+02$	
DRAINS (L1)			$1.50\text{E}+06$	$4.91\text{E}+06$

Tabella 5-3 – Bilancio di massa del modello SC-1 e bilancio idrogeologico analitico.

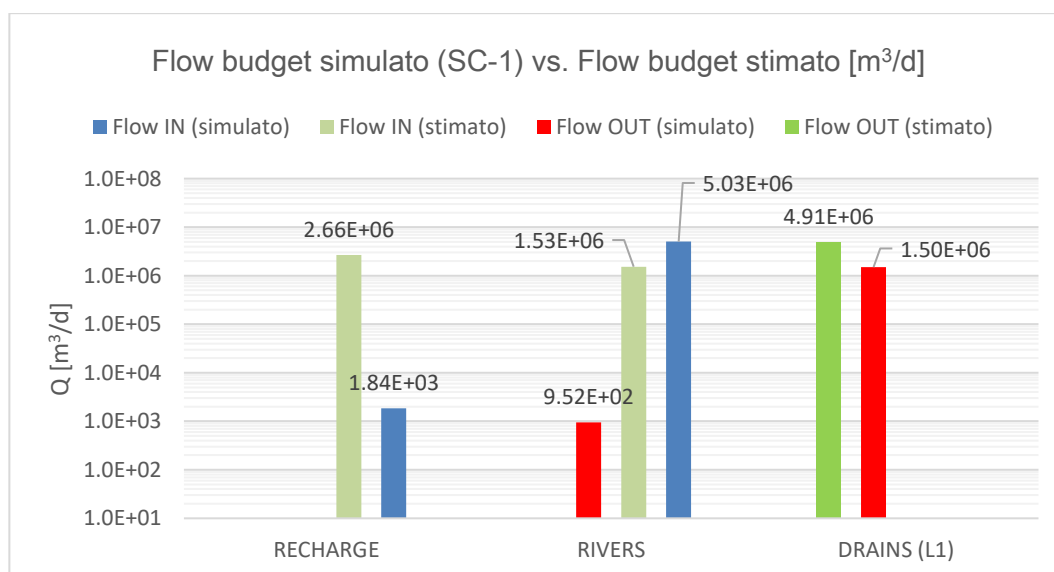


Figura 5.15 – Confronto tra il bilancio di massa calcolato nella simulazione SC-1 e il bilancio ottenuto per via analitica.

Anche nell'implementazione SC-2 le dispersioni dei fiumi costituiscono il principale contributo di alimentazione con un flusso simulato pari a $1.02\text{E}+07 \text{ m}^3/\text{d}$, superiore non solo alle dispersioni stimate ma anche al valore simulato nel precedente modello. Riguardo al flusso simulato in uscita dai dreni, anche in questa simulazione rappresenta il principale *sink* del sistema, con portate maggiori rispetto a quelle simulate in SC-1.

Simulazione SC-2	Flow IN [m^3/d]		Flow OUT [m^3/d]	
Boundary	Simulato	Stimato	Simulato	Stimato
WELLS			$3.42\text{E}+05$	$3.46\text{E}+05$
RECHARGE	$1.04\text{E}+06$	$2.66\text{E}+06$		
RIVERS	$1.02\text{E}+07$	$1.53\text{E}+06$	$2.28\text{E}+01$	
DRAINS (L1)			$1.79\text{E}+06$	$4.91\text{E}+06$

Tabella 5-4 – Bilancio di massa del modello SC-2 e bilancio idrogeologico analitico.

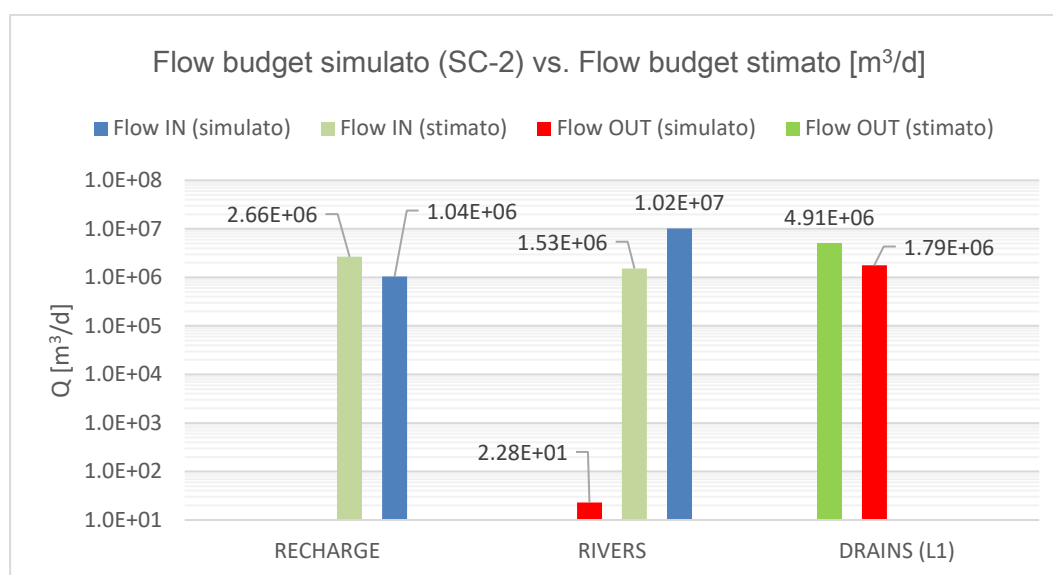


Figura 5.16 – Confronto tra il bilancio di massa calcolato nella simulazione SC-2 e il bilancio ottenuto per via analitica.

Infine, nella simulazione SC-3, contrariamente alle prime due, il maggiore apporto di alimentazione è indotto dalla ricarica zenitale ($2.23\text{E}+06 \text{ m}^3/\text{d}$) e secondariamente dalle dispersioni in alveo ($1.35\text{E}+06 \text{ m}^3/\text{d}$).

Simulazione SC-3	Flow IN [m ³ /d]		Flow OUT [m ³ /d]	
Boundary	Simulato	Stimato	Simulato	Stimato
WELLS			3.42E+05	3.46E+05
RECHARGE	2.23E+06	2.66E+06		
RIVERS	1.35E+06	1.53E+06	5.58E+03	
DRAINS (L1)			2.31E+06	4.91E+06

Tabella 5-5 – Bilancio di massa del modello SC-3 e bilancio idrogeologico analitico.

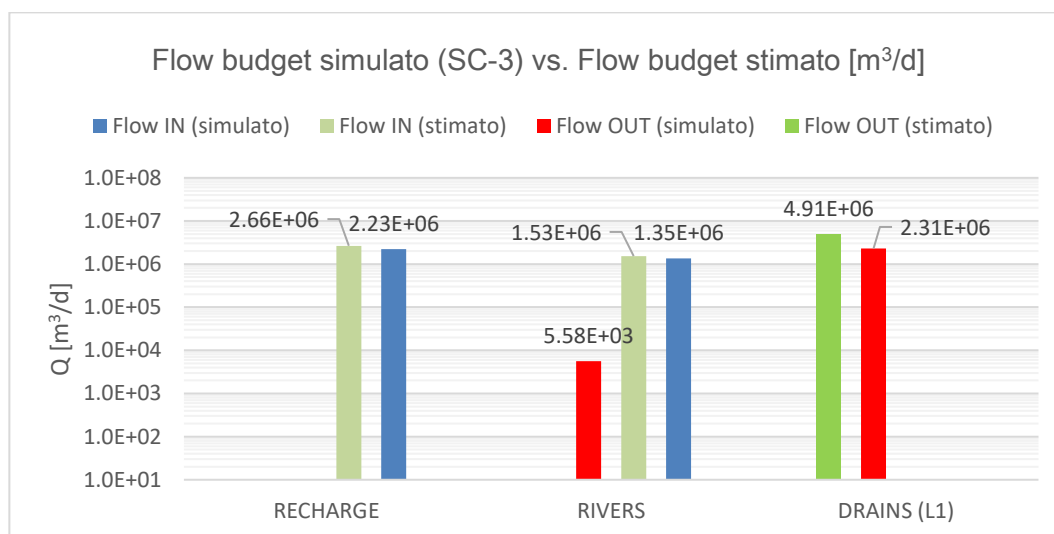


Figura 5.17 – Confronto tra il bilancio di massa calcolato nella simulazione SC-3 e il bilancio ottenuto per via analitica.

In ultima analisi, viene qui riportato il bilancio di massa per i fiumi Brenta e Piave ottenuti dal modello SC-3 confrontato con il bilancio analitico (Figura 5.18). Dal grafico si può notare come ci siano delle differenze piuttosto marcate tra i flussi simulati e quelli stimati; in particolare, nel modello SC-3, il fiume Brenta non manifesta il comportamento drenante che invece viene riportato dalla letteratura (Rinaldo et al., 2005; Cambruzzi et al., 2010; Fabbri et al., 2016).

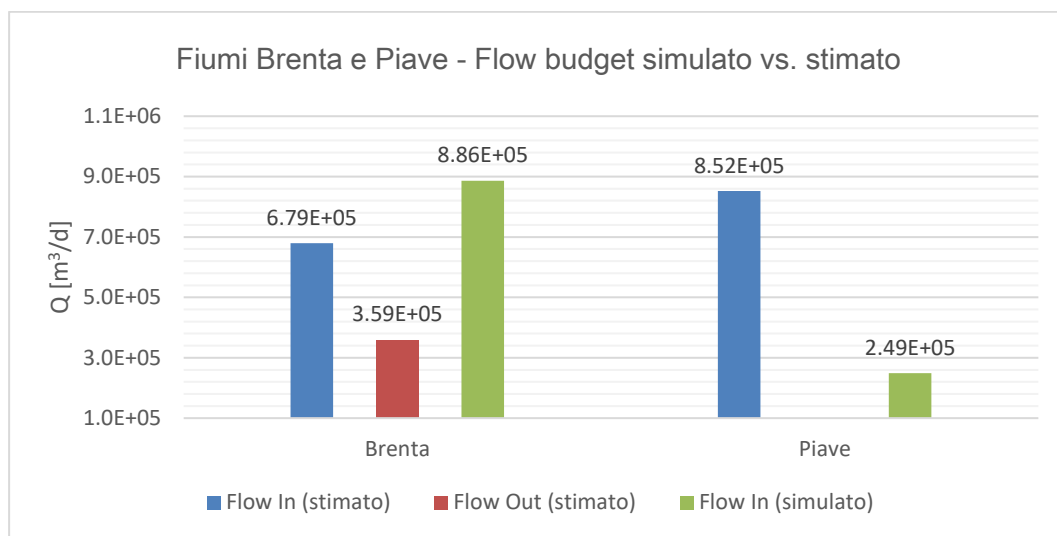


Figura 5.18 – Flussi affluenti e defluenti l’acquifero attraverso i fiumi Brenta e Piave calcolati con la simulazione SC-3 e portate disperse e drenante dai medesimi fiumi stimate analiticamente.

Dalle considerazioni appena avanzate, appare evidente che il modello impostato con l’inversione ad elevata parametrizzazione (SC-3) sia quello che si discosta in misura minore rispetto sia ai target di calibrazione sia ai flussi stimati analiticamente. Le principali differenze riscontrate in questa simulazione rispetto alla realtà fisica sono relative alla distribuzione di permeabilità e al flusso in uscita dall’acquifero attraverso i dreni. Infatti, i valori di permeabilità inferiti dal processo di calibrazione nella porzione settentrionale del dominio di modellazione risultano inferiori rispetto a quelli caratteristici dei depositi grossolani; allo stesso tempo la portata simulata che defluisce dai dreni è pari al 47% circa del flusso stimato per via analitica, sebbene quest’ultimo, per via delle assunzioni fatte per determinarlo, sia affetto da un discreto margine di incertezza. È da tenere in considerazione inoltre che nelle simulazioni di calibrazione, tra cui anche la SC-3, non è implementata la ricarica laterale proveniente dagli acquiferi fratturati in quanto, con la sua presenza nel modello, non è stato possibile ottenere delle distribuzioni di carico idraulico che fossero ragionevolmente congrue con la distribuzione di carico ottenuta dai dati di osservazione.

Dal valore di ricarica zenitale ottenuto attraverso la modellazione inversa (1121.21 mm/y) e dal valore di infiltrazione totale stimato (1319 mm/y; Tabella 4-16) si sono

potuti derivare valori sito-specifici sia per il coefficiente di infiltrazione adottato per le precipitazioni (pari a 0.8; paragrafo 4.5.1), e sia per i coefficienti di evapotraspirazione adottati per l'irrigazione (0.9 e 0.4 rispettivamente per la pratica pluvisirrigua e per la pratica a scorrimento; paragrafo 4.3.1). Questa revisione è stata effettuata calcolando la variazione percentuale a cui sottoporre i vari coefficienti (rapportando il valore di infiltrazione in uscita dal modello con quello stimato analiticamente). I coefficienti di infiltrazione ed evapotraspirazione sono stati quindi ridotti del 15% ottenendo per piogge, pratica pluvisirrigua e pratica a scorrimento, rispettivamente, i valori di 68%, 91% e 49%.

5.9 Simulazioni previsionali

A partire dal modello allo stato stazionario calibrato (SC-3) sono stati simulati, infine, 3 scenari previsionali (SP-1, SP-2, SP-3) in cui si è tenuto conto delle variazioni nel regime meteo-climatico che l'area in cui è inserito il sistema acquifero sperimenterà nelle prossime decadi. Le previsioni adottate come riferimento sono state reperite da recenti studi svolti per la Pianura Veneto-Friulana e sono rappresentative del periodo 2070-2100 (Baruffi et al., 2012). Esse riportano l'evoluzione futura delle precipitazioni, delle temperature, del deflusso idrico superficiale e della disponibilità d'acqua per l'irrigazione.

In particolare per l'area in esame è prevista una diminuzione di circa 0.5 mm/d delle precipitazioni medio annue; in ambito termico, invece, si assisterà ad un aumento delle temperature medie annue di circa 4 °C.

Tali variazioni innescheranno, inoltre, variazioni nelle portate in alveo dei corsi d'acqua, stimate in termini di lama d'acqua soggetta a ruscellamento superficiale (Figura 5.19). Sebbene nel periodo invernale si preveda un aumento significativo delle portate, su base annua, invece, tale variazione sarà di circa -8%.

L'effetto di questi cambiamenti climatici impatterà anche sulla quantità d'acqua disponibile per l'irrigazione, che subirà una diminuzione del 10-15%.

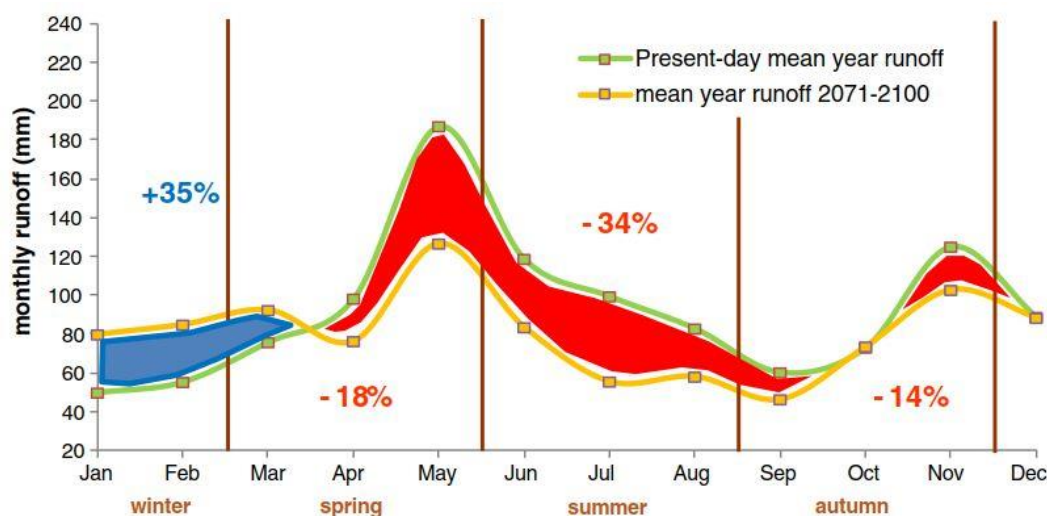


Figura 5.19 – Ruscamento superficiale mensile per il fiume Brenta previsto per il periodo 2070-2100 (Tratto da Baruffi et al., 2012).

5.9.1 Implementazione

È stato quindi necessario implementare i dati estrapolati dalle previsioni climatiche all'interno del modello di flusso calibrato, considerando inoltre i risultati ottenuti da quest'ultimo riguardo i coefficienti di infiltrazione/evapotraspirazione sito-specifici.

I *trend* di precipitazione e temperatura sono stati utilizzati per ridefinire, a partire dai dati meteo-climatici esposti nel capitolo 2, l'apporto meteorico, le temperature e la lama d'acqua soggetta ad evapotraspirazione, calcolata adottando nuovamente la formulazione di *Turc* (equazione 4-1). Dai dati ricalcolati, esposti in Tabella 5-6, si evince che l'incremento delle temperature previsto per il periodo 2070-2100, determinerà un aumento del tasso di evapotraspirazione di circa l'11% rispetto alla situazione attuale, causando, di conseguenza, una diminuzione della ricarica all'acquifero, fenomeno intensificato dalle precipitazioni più esigue, che vedranno nei prossimi decenni una diminuzione del loro apporto totale del 14% circa.

Da questi dati è stato ottenuto il valore di infiltrazione per il periodo 2070-2100, moltiplicando l'altezza di precipitazione, diminuita della lama d'acqua di evapotraspirazione, per il nuovo coefficiente di infiltrazione risultante dalla calibrazione del modello SC-3 (68%), ottenendo quindi un'infiltrazione pari a circa 251 mm/y.

<i>Dati meteo</i>	<i>2010-2015</i>	<i>2070-2100</i>	<i>%_var</i>
<i>Precipitazione [mm]</i>	1289.2	1106.7	-14.16%
<i>EVTr [mm]</i>	662.9	738.2	+11.36%
<i>Infiltrazione [mm]</i>	425.8	250.5	-41.17%
<i>Temperatura [°C]</i>	13.5	17.5	+29.63%

Tabella 5-6 – Valori medi di precipitazione, temperatura ed evapotraspirazione reale (EVTr) per il periodo 2010-2015 e gli equivalenti ricalcolati sulla base delle previsioni climatiche per il periodo 2070-2100.

Successivamente, si è reso necessario implementare le variazioni di portata previste per i corsi d'acqua che attraversano il dominio di modellazione (-8%). Tali variazioni sono state quindi convertite in variazioni di livello idrometrico utilizzando le scale delle portate per i fiumi Brenta, Muson del Sassi e Piave, ottenendo una riduzione del livello idrometrico compresa tra 0.02 m e 0.04 m. I livelli idrometrici dei canali Caerano e Giavera sono stati ridotti della variazione media ricavata dagli altri fiumi. Le quote di *river bottom* dei diversi corsi d'acqua non sono state alterate.

Le variazioni dei livelli idrometrici ai corsi d'acqua insieme al nuovo valore di infiltrazione derivante dalle precipitazioni sono stati applicati a tutti gli scenari previsionali implementati, che si differenziano per il diverso apporto derivante dall'irrigazione (Tabella 5-7). L'apporto dell'irrigazione è stato inizialmente modificato tenendo conto sia della prevista riduzione della quantità d'acqua disponibile per questa pratica (in questo caso è stata posta pari al -13%) sia dei nuovi coefficienti di evapotraspirazione ottenuti dalla calibrazione (91% e 49% rispettivamente per la pluvirrigazione e per l'espansione superficiale). Dunque la simulazione SP-1 è stata impostata con queste modifiche e ipotizzando che l'attuale partizione delle aree gestite con impianti di pluvirrigazione e di quelle gestite attraverso l'espansione superficiale rimanga tale anche durante il periodo 2070-2100. Nelle altre due simulazioni si sono ipotizzate rispettivamente: una totale trasformazione irrigua a favore della tecnica a scorrimento (SP-2) e viceversa una totale trasformazione a favore della tecnica pluvirrigua (SP-3; Tabella 5-7).

<i>Irrigazione</i>	SP-1	SP-2	SP-3
Pluvirriguo [m/d]	1.65E-04	-	4.12E-04
Scorrimento [m/d]	1.48E-03	2.47E-03	-
TOTALE [m/d]	1.65E-03	2.47E-03	4.12E-04
TOTALE [mm]	602.2	903.3	150.6

Tabella 5-7 – Apporti di alimentazione derivante dall'irrigazione nelle diverse simulazioni previsionali implementate.

5.9.2 Risultati

Vengono ora esposti i risultati derivanti dall'implementazione degli scenari previsionali per il periodo 2070-2100 appena descritti, comparandoli con quelli ottenuti dalla simulazione SC-3 di calibrazione.

Lo scenario SP-1 (Tabella 5-8), mostra gli effetti della riduzione dell'apporto meteorico e della quantità d'acqua disponibile per l'irrigazione, che si esplicano in una riduzione, più o meno marcata, di tutti i termini di bilancio idrogeologico dell'acquifero dell'alta pianura soprattutto per quanto concerne la ricarica totale (-24% circa) e il volume d'acqua drenata dal margine meridionale del dominio (-17% circa).

<i>SP-1 / SC-3</i>		<i>Flow IN [m³/d]</i>			<i>Flow OUT [m³/d]</i>	
<i>Boundary</i>	<i>SC-3</i>	<i>SP-1</i>	<i>%_var</i>	<i>SC-3</i>	<i>SP-1</i>	<i>%_var</i>
WELLS				3.439E+05	3.439E+05	
RECHARGE	2.230E+06	1.695E+06	-23.98%			
RIVERS	1.349E+06	1.342E+06	-0.50%	5.583E+03	5.267E+03	-5.65%
Brenta	8.864E+05	8.821E+05	-0.49%			
Piave	2.491E+05	2.414E+05	-3.11%			
DRAINS (L1)				2.306E+06	1.904E+06	-17.43%

Tabella 5-8 – Bilancio di massa per le simulazioni SC-3 e SP-1.

Nel secondo scenario SP-2 (Tabella 5-9), la totale conversione degli adacquamenti irrigui all'espansione superficiale, induce un aumento sia della ricarica totale (+2.8%) sia del volume di acqua drenata attraverso i corsi d'acqua (+1.5%) e al margine meridionale del dominio (+1.7%).

<i>SP-2 / SC-3</i>		<i>Flow IN [m³/d]</i>		<i>Flow OUT [m³/d]</i>		
<i>Boundary</i>	<i>SC-3</i>	<i>SP-2</i>	<i>%_var</i>	<i>SC-3</i>	<i>SP-2</i>	<i>%_var</i>
WELLS				3.439E+05	3.439E+05	
RECHARGE	2.230E+06	2.291E+06	+2.76%			
RIVERS	1.349E+06	1.337E+06	-0.86%	5.583E+03	5.666E+03	+1.49%
Brenta	8.864E+05	8.779E+05	-0.96%			
Piave	2.491E+05	2.414E+05	-3.11%			
DRAINS (L1)				2.306E+06	2.345E+06	+1.70%

Tabella 5-9 - Bilancio di massa per le simulazioni SC-3 e SP-2.

Infine, nella simulazione SP-3 (Tabella 5-10), il passaggio al pluvirriguo provoca una drastica riduzione della ricarica zenitale totale (-65% circa), sia del volume d'acqua defluente l'acquifero per mezzo dei dreni (-46%) e dei fiumi (-39%). In contrasto, le dispersioni dei fiumi è diminuita in misura minore rispetto agli altri scenari previsionali.

<i>SP-3 / SC-3</i>		<i>Flow IN [m³/d]</i>		<i>Flow OUT [m³/d]</i>		
<i>Boundary</i>	<i>SC-3</i>	<i>SP-3</i>	<i>%_var</i>	<i>SC-3</i>	<i>SP-3</i>	<i>%_var</i>
WELLS				3.439E+05	3.439E+05	
RECHARGE	2.230E+06	7.871E+05	-64.70%			
RIVERS	1.349E+06	1.346E+06	-0.16%	5.583E+03	3.429E+03	-38.57%
Brenta	8.864E+05	8.844E+05	-0.22%			
Piave	2.491E+05	2.414E+05	-3.11%			
DRAINS (L1)				2.306E+06	1.248E+06	-45.90%

Tabella 5-10 – Bilancio di massa per le simulazioni SC-3 e SP-3.

Caratteristica comune a tutti gli scenari, è il rapporto acque superficiali/sotterranee del Fiume Piave, che manifesta lo stesso comportamento per tutti i valori di ricarica che vengono applicati all'acquifero.

Inoltre, in nessuna simulazione emerge il comportamento drenante del Brenta nel tratto meridionale del suo corso, come invece viene riportato dalla letteratura (Cambruzzi et al., 2010; Fabbri et al., 2016).

Osservando le distribuzioni di carico idraulico simulate dai diversi scenari previsionali (Figura 5.10, Figura 5.11 e Figura 5.12) si evince come gli abbassamenti del livello freatico siano più importanti in prossimità dei rilievi montuosi nel settore settentrionale dell'area di studio, in particolar modo nello scenario SP-3 dove si assiste ad abbassamenti della falda anche di 5 m. È inoltre evidente, nella simulazione SP-2, come il maggiore apporto di ricarica dall'irrigazione, provocato dalla completa conversione irrigua all'espansione superficiale, compensi la ridotta alimentazione meteorica indotta da precipitazioni più scarse e temperature più elevate.

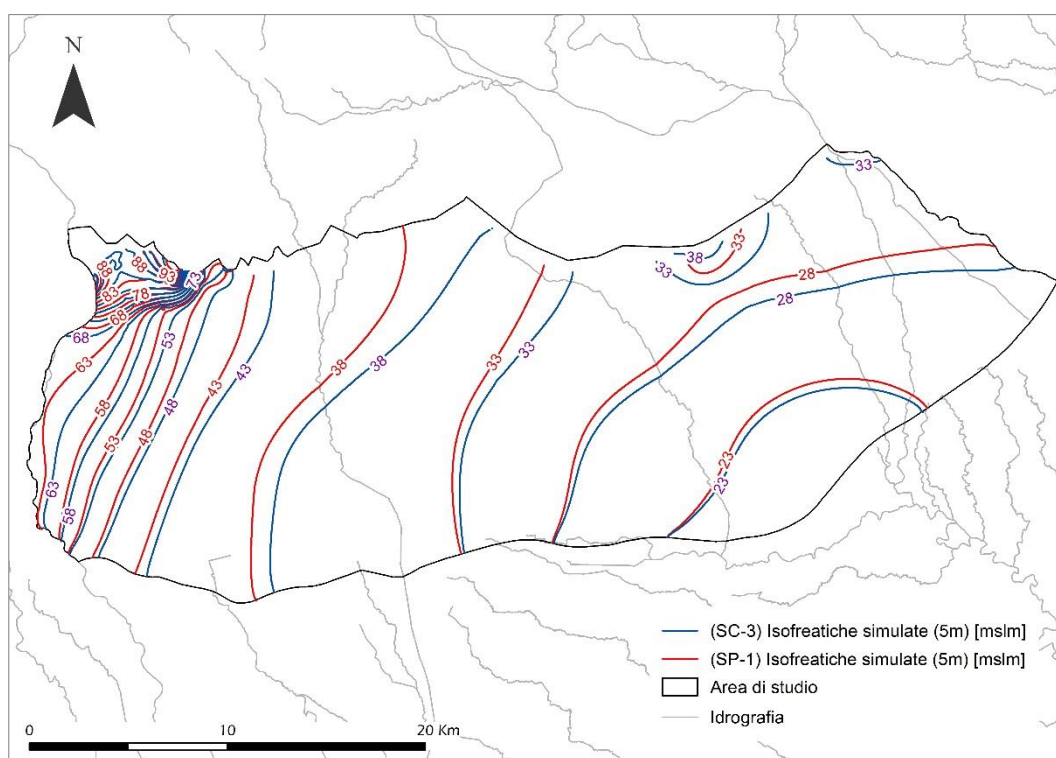


Figura 5.20 – Confronto tra le isofreatiche ottenute dalla simulazione SC-3 con quelle risultanti dallo scenario SP-1.

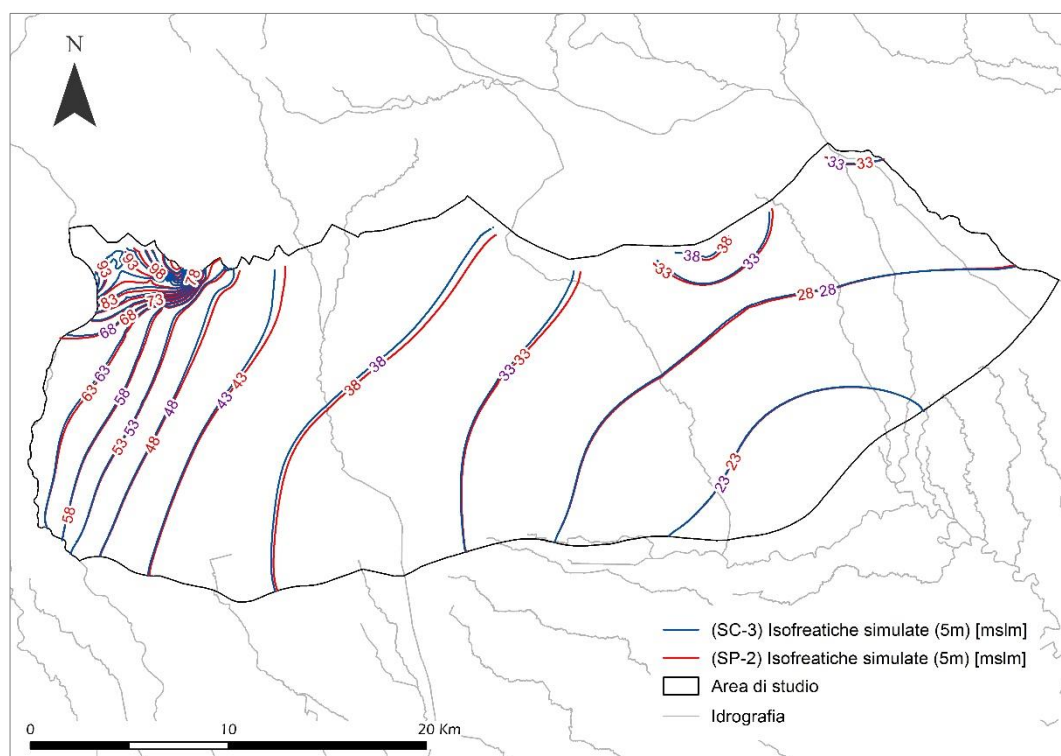


Figura 5.21 – Confronto tra le isofreatiche ottenute dalla simulazione SC-3 con quelle risultanti dallo scenario SP-2.

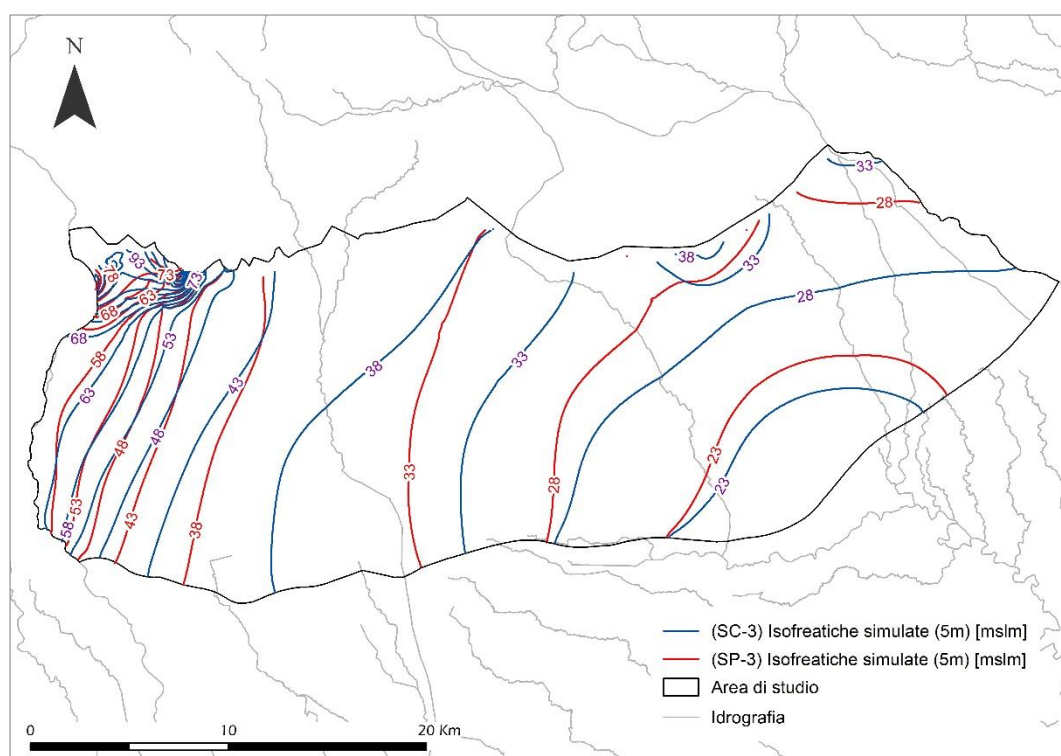


Figura 5.22 – Confronto tra le isofreatiche ottenute dalla simulazione SC-3 con quelle risultanti dallo scenario SP-3.

6 Conclusioni

Il modello di flusso oggetto del presente studio, per via degli obbiettivi che hanno guidato la sua implementazione, entra nel merito degli aspetti quantitativi della risorsa idrica sotterranea presente nell'acquifero freatico dell'Alta Pianura Veneta.

Gli scopi sono stati perseguiti attraverso la modellazione inversa, metodologia che ha permesso ottimizzare simultaneamente molteplici parametri di calibrazione riducendo i residui tra il carico idraulico calcolato dal modello e quello dei *target* di calibrazione. In particolare, la calibrazione eseguita ha condotto ad una buona approssimazione dei dati sperimentali ($nRMS$ pari a 3.47%) nonostante sia stata considerata nulla la ricarica laterale proveniente dagli acquiferi fratturati a monte del dominio di modellazione: una sua implementazione, nelle fasi preliminari dello studio, non ha infatti permesso di ottenere una adeguata riproduzione dei dati sperimentali disponibili. L'inversione ha anche portato alla definizione della distribuzione di conducibilità idraulica (K) per l'area in esame, mettendo in evidenza che, da monte verso valle, si verifica un aumento graduale di questo parametro, che raggiunge i valori di picco in prossimità del margine inferiore del dominio di modellazione (coincidente con la linea superiore delle risorgive; Figura 3.1). Il bilancio di massa risultante dal modello calibrato, sebbene presenti flussi con valori prossimi a quelli stimati analiticamente, si discosta da quest'ultimo in relazione alle portate in uscita dall'acquifero verso gli acquiferi confinati e le risorgive, e in merito alle dispersioni dei fiumi Brenta e Piave.

Dalle simulazioni previsionali, invece, emerge che le fluttuazioni delle portate in uscita dal margine meridionale del dominio (alimentazione del sistema multi-falda della Media e Bassa Pianura ed emergenza delle acque sotterranee in corrispondenza della fascia delle risorgive) sono sempre correlate alle variazioni della ricarica zenitale (infiltrazione derivante dalle piogge e dall'irrigazione). Inoltre le simulazioni suggeriscono che un'ipotetica conversione irrigua in favore dell'espansione superficiale può essere in grado di compensare, se non invertire, il *trend* negativo che ha caratterizzato i livelli di falda negli ultimi decenni, fenomeno che, si

prevede, continuerà a persistere nell'area a causa della sempre inferiore alimentazione meteorica, a sua volta provocata dalle precipitazioni più scarse e da temperature più elevate. Viceversa, l'adozione di politiche che comportano una conversione irrigua in favore della pluvirrigazione, scenario riprodotto nella simulazione SP-3, non faranno altro che esacerbare gli abbassamenti della falda tuttora in atto.

Un'ultima considerazione riguarda i limiti del modello di flusso presentato, principalmente connessi ai margini di errore relativi alle stime analitiche per alcuni fattori che concorrono al bilancio idrogeologico dell'area: in particolare si vede la necessità di raccogliere maggiori informazioni sul numero e le portate captate dai punti di prelievo privati e di avere stime più precise sui volumi defluenti l'acquifero che alimentano la rete idrografica delle risorgive e gli acquiferi confinati nella Media Pianura. È inoltre necessario validare la distribuzione di permeabilità individuata con la modellazione inversa, attraverso la raccolta sistematica di valori di conducibilità idraulica da prove e test idrogeologici.

Infine, il modello concettuale che è alla base, insieme agli obbiettivi, di tutta la modellazione e la sua implementazione, non è da ritenersi come la migliore rappresentazione del reale comportamento dell'acquifero: nuove evidenze idrogeologiche e geologiche che eventualmente si presenteranno in futuro potranno essere adeguatamente implementate nel modello qui proposto e contribuiranno a rendere il sistema acquifero riprodotto numericamente sempre più fedele alla realtà fisica.

Bibliografia

- Anderson M.P., Woessner W.W., Hunt R.J. *Applied Groundwater Modeling - Simulation of flow and advective transport*. San Diego, California: Elsevier, 2015.
- Baruffi F., Cisotto A., Cimolino A., Ferri M., Monego M., Norbiato D., Cappelletto M., Bisaglia M., Pretner A., Galli A., Scarinci A., Marsala V., Panelli C., Gualdi S., Bucchignani E., Torresan S., Pasini S., Critto A., Marcomini A. «Climate change impact assessment on Veneto and Friuli plain groundwater. Part I: An integrated modeling approach for hazard scenario construction.» *Science of the Total Environment*, 2012: 154-166.
- Bondesan A., Fontana, A., Mozzi P., Primon S., Bassan V., Vitturi A. «Geologia.» In *Atlante geologico della laguna di Venezia - Note illustrative*, di A. Vitturi, 333-362. 2016.
- Bullo P., Dal Prà A. «Lo sfruttamento ad uso acquedottistico delle acque sotterranee dell'Alta pianura alluvionale Veneta.» *Geologica Romana*, 1994: (30) 371-380.
- Cambruzzi T., Conchetto E., Fabbri P., Zangheri P., Marcolongo E., Rosignoli A. *Risorse idriche e bilancio idrogeologico*. Venezia: Grafiche Erredici Srl, 2010.
- Dal Prà A., Antonelli R. «Restituzione freatica ai fontanili nell'Alta pianura Veneta, tra il fiume Piave e i monti Lessini.» *Quaderni dell'Istituto di Ricerca sulle Acque*, 51 (I), 1980.
- Dal Prà, A. «Carta idrogeologica dell'Alta Pianura Veneta.» C.N.R., M.P.I. Padova: Grafiche Erredici, 1983.
- Dal Prà, A. «Risultati preliminari di ricerche idrogeologiche nella pianura alluvionale tra Astico e Brenta.» *Tecnica Italiana* (36), 1971: 9-10.
- Doherty J.E., Fienen M.N., Hunt R.J. «Approaches to highly parameterized inversion: Pilot-Point Theory, guidelines, and research directions.» *U.S. Geological Survey Scientific Investigation Report*, 2010.
- Doherty J.E., Hunt R.J. «Approaches to highly parameterized inversion: A guide to using PEST for groundwater-model calibration.» *U.S. Geological Survey Scientific Investigation Report*, 2010.
- Doherty, J.E. *Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models*. Brisbane, Australia: Watermark Numerical Computing, 2015.
- Doherty, J.E. *PEST. Model-Independent Parameter Estimation. User Manual 5th edition*. Watermark Numerical Computing, 2004.
- Fabbri P., Piccinini L., Marcolongo E., Pola M., Conchetto E., Zangheri P. «Does a change of irrigation technique impact on groundwater resources? A case study in Northeastern Italy.» *Environmental Science & Policy*, 2016: 63-75.

- 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.
- Pola M., Ricciato A., Fantoni R., Fabbri P., Zampieri D. «Architecture of the western margin of the North Adriatic foreland: the Schio-Vicenza fault system.» *Italian Journal of Geosciences*, 2014: 223-234.
- Rinaldo A., Altissimo L., Putti M., Passadore G., Monego M., Sartori M. *Bacino del Bacchiglione: Studi e ricerche idrogeologiche finalizzati alla messa a punto di modelli matematici per la tutela e la gestione delle risorse idriche sotterranee (Volumi 1-5)*. 2007.
- Sibson, R. «A brief description of natural neighbor interpolation.» In *Interpreting multivariate data*. Chichester: John Wiley & Sons, 1981.
- Strauhal T., Loew S., Holzmann M., Zangerl C. «Detailed hydrogeological analysis of a deep-seated rockslide at the Gepatsch reservoir (Klasgarten, Austria).» *Hydrogeology Journal*, 2015.
- Surian N., Cisotto A. «Channel adjustments, bedload transport and sediment sources in a gravel-bed river, Brenta river, Italy.» *Earth Surface Processes and Landforms* (32), 2007: 1641–1656.