



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Sede Amministrativa: Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Marittima, Ambientale e Geotecnica

SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN
SCIENZE DELL'INGEGNERIA CIVILE ED AMBIENTALE
INDIRIZZO: INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO
XX CICLO

MODELLO MATEMATICO DI FLUSSO NEI SISTEMI ACQUIFERI DEL VENETO CENTRALE

Direttore della Scuola : Ch.mo Prof. Andrea Rinaldo

Supervisore: Ch.mo Prof. Andrea Rinaldo

Dottoranda: Giulia Passadore

31 gennaio 2008

*Laudato si', mi Signore, per sor'Aqua
la quale è multo utile et humile et pretiosa et casta*

Sommario

Negli ultimi 35 anni gli acquiferi del Veneto Centrale (Italia) sono stati interessati da una sempre crescente domanda idrica accompagnata da un evidente abbassamento dei livelli freatici e da una depressurizzazione delle falde artesiane.

Il modello matematico del flusso della risorsa idrica sotterranea del Veneto Centrale, oggetto del presente lavoro, si prefigge da un lato, di fornire le condizioni al contorno necessarie all'implementazione di modelli di flusso e di trasporto realizzati su piccola scala, dall'altro di prevedere il comportamento degli acquiferi in condizioni differenti da quelle attuali (cambiamenti dei trend delle precipitazioni, del regime dei corsi d'acqua naturali, dell'uso del suolo, effetto di nuovi attingimenti).

Il modello realizzato si basa su una dettagliata analisi idrogeologica del territorio: a tal fine sono stati raccolti numerosi dati sperimentali relativi sia ai termini del bilancio idrico sotterraneo (volumi di precipitazione, portate disperse dai corsi d'acqua naturali e dalle canalette irrigue, portate sfioranti dal sistema delle risorgive, prelievi pubblici e privati), sia alla ricostruzione geologica e alla caratterizzazione dei livelli acquiferi (con particolare attenzione verso il coefficiente di permeabilità). Il modello strutturale è stato ricostruito a partire da alcune sezioni geologiche reperite in bibliografia e da stratigrafie di pozzi ad uso acquedottistico. La taratura del modello di flusso, implementato da un codice agli elementi finiti, è stata realizzata confrontando le superfici piezometriche simulate con le superfici reali.

Sono stati successivamente realizzati scenari di ricarica e di utilizzazione della risorsa e si sono indagate le interazioni tra l'acquifero indifferenziato, presente

nella parte settentrionale dell'area di studio, e il sistema multifalde, che si estende fino alla laguna di Venezia. Infine, si è analizzata la robustezza del modello rispetto alle variazioni della schematizzazione delle lenti a bassa permeabilità e della parametrizzazione degli acquiferi e degli acquitardi.

Il modello matematico realizzato permette di definire e prevedere dettagliatamente i complessi rapporti di causa-effetto fra flussi idrici entranti ed uscenti dal sistema ed evoluzione delle acque del serbatoio considerato e rappresenta pertanto uno strumento di supporto per una gestione sostenibile della risorsa.

Abstract

For the last thirty-five years, the aquifer system of Central Veneto (Italy) has been involved by an increasing demand of water for domestic and private use and by a relevant reduction of groundwater heads. The regional groundwater model developed is a large scale model taking origins from detailed studies of the hydrogeological system. Its purpose is to provide boundary conditions for the study of flow and transport models at smaller scale and to predict the behaviour of the aquifers in conditions different from the present-day ones (changes in rainfall trend, rivers regime, soil use).

The three-dimensional flow model of the aquifer systems is based on a large number of experimental data, concerning both groundwater balance (measured rain in pluviometric stations, water flux dispersed by rivers and irrigation channels, water flux springing out of the springs, water withdrawal from a large number of private and public wells) and hydraulic permeability of aquifers. A three-dimensional geological model of the system has been created by means of geological sections and stratigraphies. The flow simulations are performed using a tetrahedral finite element code. The model is calibrated on the basis of real piezometric heads and is used to analyze the interaction between the unconfined aquifer, located in the northern part of the study area, and the multiaquifer system that originates in this area and proceeds towards the sea.

The model simulates reasonably well the water flow aquifers system of Central Veneto and permits to simulate the effects of changes in withdrawal policies and/or boundary conditions relevant to the complex aquifer system. The model will allow the establishment of causal relationships between withdrawal of water

(whatever the production layer, and the extracted flow rates) and the fluctuations of piezometric heads anywhere in the system. We have investigated the robustness of the model towards variations of the geological model and towards variations of the hydraulic permeability of aquifers and low permeability lenses.

The implemented 3D flow model has allowed to improve the understanding of the regional groundwater system and of its hydrogeological properties. The model permits to predict the response of the system to overpumping, fluctuations in recharges, relevant land use changes, new public derivations: so it is deemed of central importance for the management of water resources in the area.

Premessa

Già nel 1994, alla XIV Giornata Mondiale per l’Alimentazione, Papa Giovanni Paolo II sottolineava la necessità di: *”... considerare l’importanza dell’acqua per la vita e la sussistenza degli individui e delle comunità. Giacché ognuno deve avere la possibilità di accesso a rifornimenti d’acqua incontaminata, la comunità internazionale è chiamata a cooperare per proteggere questa preziosa risorsa da forme di utilizzazione non adeguate e dal suo spreco irrazionale. Senza l’ispirazione che deriva dai principi morali profondamente radicati nei cuori e nella coscienze degli uomini, gli accordi e l’armonia che dovrebbero esistere a livello internazionale per la preservazione e l’uso di questa risorsa essenziale saranno difficili da mantenere e portare avanti”*. La rarità ed il valore crescente dell’acqua e le preoccupazioni concernenti la qualità, la quantità di approvvigionamenti e le possibilità di accesso, stanno avvicinando l’acqua al petrolio in quanto risorsa strategica che necessita di un’attenta gestione per la tutela qualitativa e quantitativa ma soprattutto di una politica solidale a livello locale e mondiale.

Il patrimonio idrico sotterraneo presente nel Veneto Centrale, fonte di approvvigionamento a servizio di gran parte delle Province di Padova e Vicenza, è interessato, da circa 35 anni, da una crescente domanda idrica e da evidenti abbassamenti piezometrici. Obiettivo del presente studio è la modellizzazione del flusso della risorsa idrica sotterranea del Veneto Centrale basata su approfondite conoscenze della situazione idrogeologica, delle proprietà eterogenee degli acquiferi e dei principali termini del bilancio idrico sotterraneo e finalizzata alla previsione degli effetti indotti da interventi di ricarica artificiale, da nuove derivazioni, dalla chiusura dei pozzi non autorizzati e da cambiamenti climatici.

Indice

Sommario	iii
Abstract	v
Premessa	vi
1 I sistemi acquiferi del Veneto Centrale	1
1.1 Inquadramento idrogeologico	2
1.2 Aggiornamento della carta delle isofreatiche	6
1.2.1 Il pozzo 27 di Caldogno	7
1.2.2 I dati freaticometrici storici	8
1.2.3 Nuove campagne di monitoraggio	10
1.2.4 Carta delle isofreatiche	15
1.2.5 Carta delle isopache	20
1.2.6 La rete di monitoraggio automatica	24
2 Il bilancio idrologico	33
2.1 Il dominio del modello	33
2.2 Bilancio idrologico	38
2.2.1 Apporto meteorico	38
2.2.2 Dispersione dei corsi d'acqua naturali	49
2.2.3 Dispersione dei canali irrigui	64
2.2.4 Portate uscenti dalle risorgive	70
2.2.5 Prelievi pubblici e privati	72

2.3	La ricarica artificiale	87
2.3.1	Dispositivi di alimentazione forzata	88
2.3.2	I fattori che influenzano la ricarica	90
2.3.3	Problemi di intasamento	91
2.3.4	Esempi di ricarica artificiale	93
2.3.5	Tipologia degli interventi di ricarica	95
2.4	Utilizzo dei siti di cava	99
2.4.1	Oscillazioni della falda	103
2.5	Prove sperimentali di ricarica forzata in cava	110
2.5.1	Approntamento del sito	111
2.5.2	Risultati	119
2.5.3	Disponibilità dei volumi derivabili dai corsi d'acqua	120
3	Il modello geostrutturale	129
3.1	Creazione del modello strutturale	129
3.1.1	Individuazione degli acquiferi confinati	130
3.1.2	Individuazione della superficie di substrato impermeabile	137
3.2	Validazione del modello strutturale	139
3.3	Caratterizzazione degli acquiferi	149
3.4	Vicende paleoidrografiche	151
4	Il modello di flusso	153
4.1	Risoluzione dell'equazione della filtrazione	153
4.2	Area di interesse e dominio del modello	159
4.3	Zone geologiche e griglia di calcolo	162
4.4	Il codice di calcolo	166
4.5	Taratura del modello	168
4.6	Scenari di ricarica e utilizzazione	177
5	La robustezza del modello	205
5.1	Robustezza del modello rispetto alle variazioni della geometria degli acquitardi	205

5.1.1	Slittamento delle lenti a bassa permeabilità	206
5.1.2	Effetti sulle piezometrie	208
5.1.3	Effetti sulle portate delle risorgive	215
5.1.4	Effetti sulle portate attraverso i confini di Dirichlet	215
5.2	Robustezza del modello rispetto alle variazioni della parametrizzazione degli acquiferi e degli acquitardi	219
5.2.1	Variazione della parametrizzazione degli acquiferi e degli acquitardi	219
5.2.2	Effetti sulle piezometrie	224
5.2.3	Effetti sulle portate attraverso i confini di Dirichlet	226
	Conclusioni	228
	Appendice A : Rete di monitoraggio automatica	232
	Appendice B : Modello accoppiato di evapotraspirazione e infiltrazione	251
	Appendice C : Schede monografiche delle cave idonee alla ricarica della falda	321
	Bibliografia	337

Elenco delle figure

1.1	<i>Localizzazione dell'area di studio.</i>	2
1.2	<i>Inquadramento territoriale dell'area di studio.</i>	3
1.3	<i>Schema idrogeologico dell'Alta e Media pianura veneta [2].</i>	5
1.4	<i>Livello piezometrico nel pozzo 27 di Caldogno [3].</i>	8
1.5	<i>I pozzi del censimento A.I.M. degli anni '70.</i>	9
1.6	<i>Livello falda pozzo 27 di Caldogno e periodo delle campagne di monitoraggio (1975 -1981).</i>	10
1.7	<i>Determinazione della quota piezometrica della falda.</i>	12
1.8	<i>Rilevamento delle coordinate geografiche (x, y e quota b.p.) di un pozzo tramite GPS (pozzo M2).</i>	13
1.9	<i>Nuova rete di monitoraggio.</i>	14
1.10	<i>Carta delle isofreatiche (Marzo 2005, equidistanza 5 m, quote assolute espresse in m.s.l.m.m).</i>	16
1.11	<i>Carta delle isofreatiche prodotta da Dal Prà (rilievi del Novembre 1975).</i>	17
1.12	<i>Andamento del gradiente idraulico della falda (valori in gradi dal piano di riferimento orizzontale).</i>	19
1.13	<i>Correlazione tra livello freatico nel pozzo 41 e portata dell'Astico a Passo di Riva [1].</i>	21

1.14	<i>Andamento della curvatura della superficie freatica rispetto al piano orizzontale, assi di drenaggio e spartiacque dinamico. Valori negativi (in verde) = flusso d'acqua divergente; valori positivi (in fucsia) = flusso d'acqua convergente.</i>	22
1.15	<i>Principali direttrici di drenaggio e spartiacque dinamico.</i>	23
1.16	<i>Carta delle isopache, ossia spessori (m) del materasso alluvionale sovrastante la superficie di massimo innalzamento della falda (aprile 1977) - equidistanza 4 m</i>	25
1.17	<i>Correlazione tra i livelli piezometrici del pozzo 32 e del pozzo 26 (livelli espressi in m s.l.m.m.)</i>	27
1.18	<i>Correlazione tra i livelli piezometrici del pozzo 57 e del pozzo 60 (livelli espressi in m s.l.m.m.)</i>	27
1.19	<i>Le 11 aree omogenee e i pozzi spia, caratterizzate da una buona correlazione tra i livelli freatici piezometrici.</i>	28
1.20	<i>Rete di monitoraggio dei livelli della falda freatica nell'Alto Vicentino.</i>	29
1.21	<i>Andamento freatimetrico registrato in alcune stazioni di monitoraggio (Periodo di acquisizione 19/07/2006 - 26/01/2007).</i>	30
1.22	<i>Andamento freatimetrico registrato nelle stazioni di monitoraggio Pozzo 10CIB e Pozzo AVS-M (Periodo di acquisizione 13/05/2005 - 26/01/2007).</i>	30
1.23	<i>Evoluzione temporale del livello freatimetrico registrato nel pozzo 17CIB e delle precipitazioni registrate nella stazione ARPAV di Breganze.</i>	32
1.24	<i>Evoluzione temporale del livello freatimetrico registrato nel pozzo 60 e delle precipitazioni registrate nella stazione ARPAV di Breganze.</i>	32
2.1	<i>Area di studio.</i>	35
2.2	<i>Dominio del modello e isofreatiche medie 2004.</i>	37

2.3	<i>Area all'interno della quale è stato stimato l'apporto meteorico efficace alla ricarica della falda.</i>	39
2.4	<i>59 stazioni di misura delle precipitazioni e dei dati metereologici appartenenti alla rete A.R.P.A.V..</i>	41
2.5	<i>Carta dei Suoli della Regione Veneto</i>	45
2.6	<i>Immagine acquisita dal satellite Landsat 7 (2001), rappresentazione a colori quasi naturali della zona scelta per la stima del contributo delle precipitazioni alla ricarica della falda.</i>	47
2.7	<i>Classificazione dell'immagine satellitare, carta di uso del suolo (2001).</i>	47
2.8	<i>Schematizzazione del fenomeno: a) pelo libero superiore al livello di falda, b) dispersione in falda, c) pelo libero inferiore al livello di falda, d) drenaggio della falda.</i>	49
2.9	<i>Idrografia generale della zona oggetto di studio.</i>	51
2.10	<i>Principali sistemi idrografici: Leogra-Timonchio, Astico e Brenta (in blu sono evidenziati i tratti disperdenti, in rosso i tratti drenanti).</i>	51
2.11	<i>Schematizzazione dei corsi d'acqua naturali attraverso la mesh di calcolo.</i>	52
2.12	<i>Schema idrografico del sistema Leogra-Timonchio</i>	53
2.13	<i>Sistema Leogra-Timonchio. Correlazione tra la portata affluente e la portata dispersa nel mese di marzo 1980 [1].</i>	54
2.14	<i>Sistema Leogra-Timonchio: schematizzazione in tratti disperdenti e nodi a cui assegnare le portate disperse.</i>	57
2.15	<i>Derivazioni, restituzioni e stazioni di misura del sistema idrografico Astico.</i>	59
2.16	<i>Torrente Astico. Correlazione tra la portata affluente e la portata dispersa nel tratto Rocchette - Caltrano (1A1-1A2) [1].</i>	61
2.17	<i>Fiume Brenta. Correlazione tra la portata affluente a Ca' Barzizza - Mignano e la portata dispersa nel tratto Bassano del Grappa - Friola [1].</i>	63
2.18	<i>Schema generale dei sistemi irrigui considerati.</i>	65

2.19	<i>Sistema Irriguo Medio Astico.</i>	67
2.20	<i>Correlazione tra portate derivate (Canal Mordini e Roggia Thiene) e portate disperse del Sistema Irriguo Medio Astico.</i>	67
2.21	<i>Sistemi Irrigui Destra e Sinistra Brenta.</i>	68
2.22	<i>Correlazione tra portate derivate e portate disperse del Sistema Irriguo Destra Brenta.</i>	69
2.23	<i>Correlazione tra portate derivate e portate disperse del Sistema Irriguo Sinistra Brenta.</i>	69
2.24	<i>Suddivisione delle risorgive in 3 sub bacini e 10 aree.</i>	73
2.25	<i>Prelievi pubblici ad uso acquedottistico ed irriguo.</i>	83
2.26	<i>Prelievo privato: censimento del Centro Idrico di Novoledo (1997-1998).</i>	84
2.27	<i>Prelievo privato: 64 Comuni in cui sono stati stimate le portate prelevate.</i>	84
2.28	<i>Bilancio idrologico: portate in ingresso e portate in uscita.</i>	86
2.29	<i>Siti estrattivi dell'Alto Vicentino.</i>	101
2.30	<i>Isofreatiche, aprile 1977.</i>	104
2.31	<i>Isofreatiche, novembre 2003.</i>	105
2.32	<i>Isopache del materasso alluvionale soprastante la superficie di massimo innalzamento della falda: aprile 1977 [22].</i>	106
2.33	<i>Isopache del materasso alluvionale soprastante la superficie di minimo innalzamento della falda: novembre 2003 [22].</i>	107
2.34	<i>Cava Ferraro allagata durante le prime prove di ricarica forzata (gennaio 2006).</i>	112
2.35	<i>Planimetria della cava e delle due vasche realizzate.</i>	113
2.36	<i>Asta idrometrica dotata di sonda per la misura del battente in continuo.</i>	114
2.37	<i>Modello digitale del terreno (DTM) di dettaglio delle vasche.</i>	115
2.38	<i>Raccordo dei due tubi DN 300 mm montato sul pezzo flangiato.</i>	116
2.39	<i>Tubazioni di adduzione alle vasche.</i>	117
2.40	<i>Tombino dissipatore per evitare lo scavo del fondo vasca.</i>	117

2.41	<i>Prova in vasca piccola.</i>	121
2.42	<i>Stazioni idrometriche utilizzate nel calcolo delle portate dell'Astico disponibili per la ricarica artificiale delle falde.</i>	123
2.43	<i>Correlazione tra le portate orarie dell'Astico a valle della restituzione della Centrale idroelettrica di Bessè e la somma delle portate misurate nelle due stazioni dell'ARPAV: t.Astico a Pedescala e t.Posina a Stancari (dati 2004).</i>	123
2.44	<i>Calcolo delle portate infiltrate nei bacini di dispersione.</i>	124
2.45	<i>Correlazione tra le portate del Leogra a Torrebelvicino e le portate dell'intero Sistema Leogra - Timonchio allo sbocco in pianura.</i>	126
2.46	<i>Schema idrografico del Sistema Leogra - Timonchio con evidenziati i contributi sottratti dalla portata affluente per ottenere quella disponibile da derivare per alimentare l'ipotetico bacino di dispersione.</i>	127
3.1	<i>Tracce delle sezioni a disposizione.</i>	131
3.2	<i>Tracce delle sezioni utilizzate nella fase di costruzione del modello geo-strutturale.</i>	131
3.3	<i>Interpretazione della sezione 12 della Carta delle Acque della Regione Veneto.</i>	132
3.4	<i>Interpretazione della sezione 2 della Carta delle Acque della Regione Veneto.</i>	133
3.5	<i>Interpretazione della sezione 62 dell'IRSA.</i>	133
3.6	<i>Interpretazione della sezione 63 dell'IRSA.</i>	134
3.7	<i>Interpretazione della sezione 66 dell'IRSA.</i>	134
3.8	<i>Interpretazione della sezione 3 della Carta delle Acque della Regione Veneto.</i>	135
3.9	<i>Localizzazione delle stratigrafie considerate nella costruzione del modello geo-strutturale.</i>	136
3.10	<i>Rappresentazione 3-D della superficie di substrato impermeabile.</i>	140
3.11	<i>Traccia delle 4 sezioni considerate nella fase di validazione del modello geostrutturale.</i>	141

3.12	<i>Interpretazione della sezione AB dello studio sugli acquiferi di Vicenza [1].</i>	142
3.13	<i>Sezione F.</i>	143
3.14	<i>Sezione G.</i>	144
3.15	<i>Sezione H.</i>	144
3.16	<i>Comparsa delle lenti di argilla prima e dopo la validazione: a) prima lente di argilla; b) seconda lente di argilla.</i>	145
3.17	<i>Sezione AA, ottenuta dal modello geo-strutturale validato.</i>	145
3.18	<i>Sezione BB, ottenuta dal modello geo-strutturale validato.</i>	146
3.19	<i>Rappresentazione 3-D del modello geo-strutturale (vista da sud-ovest).</i>	147
3.20	<i>Rappresentazione 3-D del modello geo-strutturale (vista da sud-est).</i>	147
3.21	<i>Comparsa della prima e della seconda lente a bassa permeabilità.</i>	148
3.22	<i>Distribuzione spaziale del logaritmo della permeabilità dell'acquifero freatico.</i>	150
3.23	<i>Distribuzione spaziale del logaritmo della permeabilità - zoom su area di interesse.</i>	150
3.24	<i>34 zone per l'assegnazione dei parametri idrogeologici.</i>	151
3.25	<i>Paleoalvei dell'Astico e del Brenta [33].</i>	152
4.1	<i>Modello strutturale e flussi idrici tridimensionali.</i>	160
4.2	<i>Area di interesse, isofreatiche medie anno 2004 (quote espresse in m s.l.m.m.), dominio del modello.</i>	161
4.3	<i>Griglia di calcolo bidimensionale.</i>	163
4.4	<i>Griglia di calcolo tridimensionale.</i>	164
4.5	<i>Griglia di calcolo tridimensionale - fenomeno del pinch out.</i>	165
4.6	<i>Confini di Dirichlet e sub bacini di risorgiva.</i>	169
4.7	<i>Superficie freatica reale (media annua 2004).</i>	172
4.8	<i>Superficie freatica simulata (media annua 2004).</i>	172
4.9	<i>Differenza tra superficie freatica reale e simulata (errori).</i>	173

4.10	<i>Superficie freatica simulata ottenuta imponendo la quota di sfioro delle risorgive.</i>	173
4.11	<i>Superfici piezometriche simulate del 1°, 2°, 3°, 4°, 5° e 6° acquifero confinato.</i>	174
4.12	<i>Piezometria simulata (media annua 2004)</i>	176
4.13	<i>Scenario 1 - diminuzione del 20% della precipitazione efficace: abbassamenti reale e simulato al pozzo 27 di Caldogno.</i>	182
4.14	<i>Scenario 1 - diminuzione del 20% della precipitazione efficace: abbassamento nell'acquifero freatico rispetto alle superfici medie del 2004 (miglior taratura).</i>	182
4.15	<i>Scenario 1 - diminuzione del 20% della precipitazione efficace: abbassamenti negli acquiferi in pressione rispetto alle superfici medie del 2004 (miglior taratura).</i>	183
4.16	<i>Scenario 2 - chiusura dei pozzi privati (per una portata di 0,5 m³/s): innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) nell'acquifero freatico.</i>	184
4.17	<i>Scenario 2 - chiusura dei pozzi privati (per una portata di 0,5 m³/s): innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) negli acquiferi in pressione.</i>	185
4.18	<i>Scenario 3 - interventi di ricarica attraverso l'utilizzo di 4 siti di cava esistenti (per una portata complessiva di 1,2 m³/s): innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) nell'acquifero freatico.</i>	186
4.19	<i>Scenario 3 - interventi di ricarica attraverso l'utilizzo di 4 siti di cava esistenti (per una portata complessiva di 1,2 m³/s): innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) negli acquiferi in pressione.</i>	187
4.20	<i>Scenario 4 - realizzazione di interventi di ricarica attraverso l'utilizzo di acque spagliate in aree boscate per una portata media annua di 0,6 m³/s: innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) nell'acquifero freatico.</i>	188

- 4.21 *Scenario 4 - realizzazione di interventi di ricarica attraverso l'utilizzo di acque spagliate in aree boscate per una portata media annua di $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$: innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) negli acquiferi in pressione. 189*
- 4.22 *Scenario 5 - realizzazione di nuovi prelievi per una portata media annua di $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$: ubicazione dei pozzi di prelievo. 190*
- 4.23 *Scenario 5 - realizzazione di nuovi prelievi per una portata media annua di $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$: abbassamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) nell'acquifero freatico. 190*
- 4.24 *Scenario 5 - realizzazione di nuovi prelievi per una portata media annua di $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$: abbassamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) negli acquiferi in pressione. 191*
- 4.25 *Scenario 6 - realizzazione di nuovi prelievi per una portata media annua di $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ (scenario 5) e diminuzione del 20% delle precipitazioni efficaci (scenario 1): abbassamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) nell'acquifero freatico. 192*
- 4.26 *Scenario 6 - realizzazione di nuovi prelievi per una portata media annua di $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ (scenario 5) e diminuzione del 20% delle precipitazioni efficaci (scenario 1): abbassamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) negli acquiferi in pressione. 193*
- 4.27 *Scenario 7 - realizzazione degli interventi di ricarica attraverso l'utilizzo di siti estrattivi, di aree boscate e la chiusura dei pozzi privati ($+2,3 \text{ m}^3/\text{s}$): innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) nell'acquifero freatico. 194*
- 4.28 *Scenario 7 - realizzazione degli interventi di ricarica attraverso l'utilizzo di siti estrattivi, di aree boscate e la chiusura dei pozzi privati ($+2,3 \text{ m}^3/\text{s}$): innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) negli acquiferi in pressione. 195*

- 4.29 *Scenario 8 - compensazione dei nuovi prelievi ($-1,2 \text{ m}^3/\text{s}$) attraverso la realizzazione dei soli interventi di ricarica puntuali (utilizzo di siti estrattivi e di aree boscate, $+1,8 \text{ m}^3/\text{s}$): abbassamenti ed innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) nell'acquifero freatico. 196*
- 4.30 *Scenario 8 - compensazione dei nuovi prelievi ($-1,2 \text{ m}^3/\text{s}$) attraverso la realizzazione dei soli interventi di ricarica puntuali (utilizzo di siti estrattivi e di aree boscate, $+1,8 \text{ m}^3/\text{s}$): abbassamenti ed innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) negli acquiferi in pressione. 197*
- 4.31 *Scenario 9 - compensazione dei nuovi prelievi attraverso la realizzazione di tutti gli interventi di ricarica (utilizzo di siti estrattivi, di aree boscate e chiusura dei pozzi privati, $+2,3 \text{ m}^3/\text{s}$): abbassamenti ed innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) nell'acquifero freatico. 198*
- 4.32 *Scenario 9 - compensazione dei nuovi prelievi attraverso la realizzazione di tutti gli interventi di ricarica (utilizzo di siti estrattivi, di aree boscate e chiusura dei pozzi privati, $+2,3 \text{ m}^3/\text{s}$): abbassamenti ed innalzamenti negli acquiferi in pressione. 199*
- 4.33 *Scenario 10 - compensazione della diminuzione dell'apporto meteorico efficace ($-2,7 \text{ m}^3/\text{s}$) attraverso le 3 tipologie di ricarica (utilizzo di siti estrattivi, di aree boscate e chiusura dei pozzi privati, $+2,3 \text{ m}^3/\text{s}$): abbassamenti ed innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) nell'acquifero freatico. 200*
- 4.34 *Compensazione della diminuzione dell'apporto meteorico efficace ($-2,7 \text{ m}^3/\text{s}$) attraverso A) le 3 tipologie di ricarica ($+2,3 \text{ m}^3/\text{s}$); B) gli interventi di ricarica puntuale ($+1,8 \text{ m}^3/\text{s}$) nel \mathcal{F} acquifero confinato. 200*

- 4.35 *Scenario 10 - compensazione della diminuzione dell'apporto meteorico efficace ($-2,7 \text{ m}^3/\text{s}$) attraverso le 3 tipologie di ricarica (utilizzo di siti estrattivi, di aree boscate e chiusura dei pozzi privati, $+2,3 \text{ m}^3/\text{s}$): abbassamenti ed innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) negli acquiferi in pressione. . . 201*
- 4.36 *Scenario 11 - compensazione della diminuzione dell'apporto meteorico efficace e dei nuovi prelievi ($-2,7 \text{ m}^3/\text{s} + -1,2 \text{ m}^3/\text{s} = -3,9 \text{ m}^3/\text{s}$) attraverso la realizzazione di tutti gli interventi di ricarica (utilizzo di siti estrattivi, di aree boscate e chiusura dei pozzi privati, $+2,3 \text{ m}^3/\text{s}$): abbassamenti ed innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) nell'acquifero freatico. . . 202*
- 4.37 *Scenario 11 - compensazione della diminuzione dell'apporto meteorico efficace e dei nuovi prelievi ($-2,7 \text{ m}^3/\text{s} + -1,2 \text{ m}^3/\text{s} = -3,9 \text{ m}^3/\text{s}$) attraverso la realizzazione di tutti gli interventi di ricarica (utilizzo di siti estrattivi, di aree boscate e chiusura dei pozzi privati, $+2,3 \text{ m}^3/\text{s}$): abbassamenti ed innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) negli acquiferi in pressione. 203*
- 5.1 *Linea di comparsa della 1° lente a bassa permeabilità e slittamenti. 206*
- 5.2 *Mesh di calcolo A) originale, B) nuova (realizzata per gli slittamenti delle lenti.) 207*
- 5.3 *Aree di slittamento relative alla 1° lente a bassa permeabilità e classificazione dei nodi. 209*
- 5.4 *Slittamento delle lenti verso nord e verso sud (evidenziate in rosso le superfici interpolate) 210*
- 5.5 *Andamento dello SQM al variare dello slittamento; implementazioni del modello condotte assegnando la portata sfiorante dalle risorgive (**CASO A**) 213*
- 5.6 *Andamento dello SQM al variare dello slittamento; implementazioni del modello condotte assegnando la quota di sfioro delle risorgive (**CASO B**) 213*

5.7	<i>Confronto dell'andamento dello SQM al variare dello slittamento nel caso A (assegnata la portata sfiorante dalle risorgive) e nel caso B (assegnata la quota di sfioro delle risorgive).</i>	214
5.8	<i>Variazione delle portate uscenti dalle risorgive in funzione dello slittamento delle lenti a bassa permeabilità e confronto con i valori di riferimento stimati.</i>	216
5.9	<i>Scostamenti tra le portate calcolate dal modello nel caso di slittamento nullo S_0 e le portate, sempre calcolate dal modello, nel caso di slittamento non nullo S.</i>	216
5.10	<i>Variazioni indotte dagli slittamenti sulle portate uscenti dalla laguna ed entranti dall'altopiano</i>	218
5.11	<i>Probabilità di superamento e densità di probabilità (distribuzione lognormale).</i>	220
5.12	<i>Distribuzione lognormale dei valori di K_{NODO} (caso A).</i>	222
5.13	<i>Distribuzione lognormale dei valori di K_{NODO} (caso B).</i>	223
5.14	<i>Confronto tra \bar{K}_{ZONA} assegnato alle zone geologiche e la media dei valori K_{NODO} all'interno della stessa zona geologica (acquifero freatico).</i>	224
5.15	<i>SQM in funzione della variazione della parametrizzazione degli acquiferi e degli acquitardi.</i>	225
5.16	<i>Variazioni indotte dagli parametrizzazione assegnata a zone sulle portate uscenti dalla laguna ed entranti dall'altopiano.</i>	227
A-1	<i>Rete di monitoraggio dei livelli della falda freatica nell'Alto Vicentino.</i>	233
B-1	<i>Schema della radiazione osservata da un sensore</i>	253
B-2	<i>Spettro elettromagnetico</i>	254
B-3	<i>Esempio di spettro relativo al pixel di un'immagine</i>	256
B-4	<i>Rappresentazione a colori quasi naturali dei dati Landsat 5.</i>	257
B-5	<i>Schematizzazione delle interazioni tra raggio luminoso e atmosfera e tra raggio luminoso e superficie terrestre</i>	259

B-6	<i>Schematizzazione delle interazioni tra la radiazione elettromagnetica, l'atmosfera e il bersaglio</i>	260
B-7	<i>Andamento del coefficiente di trasmissione della radiazione elettromagnetica in atmosfera</i>	261
B-8	<i>Georeferenziazione.</i>	262
B-9	<i>Rappresentazione a colori quasi naturali dei dati Landsat TM dopo la georeferenziazione.</i>	263
B-10	<i>Supervised classification.</i>	266
B-11	<i>Classificazione non controllata.</i>	267
B-12	<i>Spazio generato da due bande di acquisizione con SAM</i>	269
B-13	<i>Mappa dell'uso del suolo del Veneto.</i>	276
B-14	<i>Rappresentazione a colori quasi naturali dei dati Landsat 5 della Provincia di Vicenza (anno 1987).</i>	278
B-15	<i>Rappresentazione a colori quasi naturali dei dati Landsat 7 della Provincia di Vicenza (anno 2002).</i>	279
B-16	<i>Mappa dell'uso del suolo della Provincia di Vicenza (anno 1987).</i>	282
B-17	<i>Mappa dell'uso del suolo della Provincia di Vicenza (anno 2002).</i>	283
B-18	<i>Termini di flusso che compaiono nella formulazione del bilancio idrologico.</i>	285
B-19	<i>Separazione della pioggia in deflusso superficiale e sub-superficiale.</i>	286
B-20	<i>Moti dell'acqua nel terreno.</i>	287
B-21	<i>Forme caratteristiche delle relazioni idrauliche $\psi(\theta)$ e $K_h(\theta)$ per terreni insaturi.</i>	290
B-22	<i>Triangolo di tessitura del terreno</i>	291
B-23	<i>Profili del contenuto d'acqua in un terreno argilloso con $\phi = 0,50$ per un'infiltrazione costante a battente idraulico nullo.</i>	294
B-24	<i>a) Profili del contenuto d'acqua ad istanti successivi e b) velocità di infiltrazione in funzione del tempo per $w < K_{hsat}$.</i>	297
B-25	<i>a) Profili del contenuto d'acqua ad istanti successivi e b) velocità di infiltrazione in funzione del tempo per $w > K_{hsat}$.</i>	298
B-26	<i>Contenuto d'acqua in funzione della profondità per $t = 0$.</i>	302

B-27	<i>Contenuto d'acqua in funzione della profondità per $t \neq 0$.</i>	302
B-28	<i>Variazione tipica del LAI attivo durante il periodo di crescita del mais.</i>	309
B-29	<i>Costruzione della curva del coefficiente k_{cb} per la soia utilizzando lunghezze delle fasi di crescita di 25,25,30 e 20 giorni.</i>	314
B-30	<i>Diagramma per la determinazione del coefficiente k_r.</i>	315
B-31	<i>Diagramma per la determinazione del coefficiente k_s.</i>	317

Elenco delle tabelle

1.1	<i>Pozzi della rete di monitoraggio freaticometrico.</i>	31
2.1	<i>Localizzazione delle stazioni pluviografiche sul territorio dell' Alto Vicentino.</i>	42
2.2	<i>Parametri fondamentali del modello.</i>	48
2.3	<i>Pozzi di acquedotto inseriti nel modello (portate medie annue 2004).</i>	75
2.4	<i>Pozzi pubblici ad uso irriguo inseriti nel modello (portate medie annue 2004).</i>	78
2.5	<i>Prelievo privato (portate medie annue 2004).</i>	81
2.6	<i>Siti estrattivi dell'Alto Vicentino.</i>	102
2.7	<i>Massimo e minimo innalzamento della falda e spessori dell'insaturo.</i>	109
2.8	<i>Scenari di derivazione dal torrente Astico.</i>	125
2.9	<i>Scenari di derivazione dal Sistema Leogra - Timonchio.</i>	127
4.1	<i>Caratteristiche della griglia bidimensionale e della griglia tridi- mensionale.</i>	165
4.2	<i>Coefficiente di permeabilità [m/s] delle 34 zone geologiche del- l'acquifero freatico e della 1° lente a bassa permeabilità.</i>	171
4.3	<i>Portate attraverso i confini di Dirichlet: caso A (assegnata la por- tata sfiorante dalle risorgive) e caso B (assegnata quota di sfioro delle risorgive).</i>	175
5.1	<i>Caratteristiche delle griglie tridimensionali di calcolo</i>	209
5.2	<i>Parametri delle 8 serie generate di K_{NODO} (caso A).</i>	222

5.3	<i>Parametri delle 4 serie generate di K_{NODO} (caso B).</i>	223
B-1	<i>Principali intervalli dello spettro elettromagnetico</i>	254
B-2	<i>Esempio di matrice di confusione</i>	272
B-3	<i>Matrice di confusione della classificazione.</i>	275
B-4	<i>Principali indici della classificazione.</i>	275
B-5	<i>Matrice di confusione della classificazione del 1987</i>	281
B-6	<i>Matrice di confusione della classificazione del 2002</i>	281
B-7	<i>Valori dei parametri che definiscono i legami costitutivi dei terreni secondo lo schema di Figura B-22 [11].</i>	292

Capitolo 1

I sistemi acquiferi del Veneto Centrale

Il Veneto Centrale è caratterizzato da un patrimonio idrico sotterraneo di importanza notevole: gli acquiferi di questa zona, infatti, costituiscono la fonte di approvvigionamento idrico per la maggior parte del territorio provinciale vicentino e contribuiscono ad alimentare la rete acquedottistica di buona parte della provincia di Padova. Inoltre, questa notevole disponibilità idrica ha permesso lo sviluppo di numerose attività industriali, che necessitano di elevati volumi d'acqua nel loro ciclo produttivo, ed il contemporaneo accrescimento di attività legate al settore agricolo. La ricchezza idrica della zona si manifesta in modo particolare attraverso il sistema delle risorgive, aree umide di particolare valenza ambientale e paesaggistica, che alimentano numerosi corsi d'acqua grazie alle acque sfioranti dal serbatoio sotterraneo. Tuttavia, l'aumento progressivo della richiesta d'acqua ha comportato prelievi spesso eccessivi e non ben pianificati che hanno portato ad un impoverimento della risorsa, evidenziato da un abbassamento dei livelli di falda e da una depressurizzazione delle falde artesiane.

1.1 Inquadramento idrogeologico

L'area di interesse copre un'area di circa 600 km^2 , si estende a nord di Padova sino alle pendici meridionali dell'Altopiano di Asiago ed è delimitata ad ovest dai monti Lessini e dai monti Berici e dal fiume Brenta ad est (Figura 1.2). Il territorio, sostanzialmente pianeggiante, è caratterizzato da pendenze decrescenti da nord-ovest verso sud-est inferiori al 1,5%. La zona è attraversata da alcuni corsi d'acqua il cui bacino idrografico è particolarmente esteso; tra questi, il fiume Astico con un bacino tributario a monte dello sbarramento di Leda di 556 km^2 ; il Leogra-Timonchio con un bacino di 105 km^2 ed il fiume Brenta con un bacino tributario a monte di Bassano di 1567 km^2 .

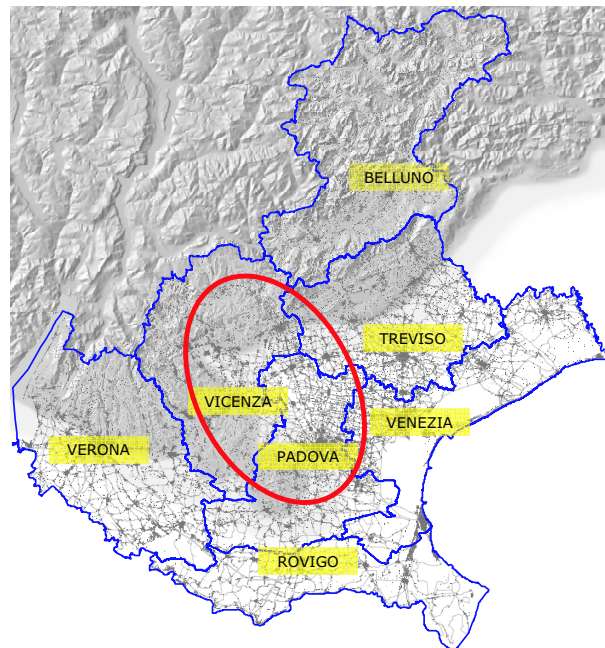


Figura 1.1: Localizzazione dell'area di studio.

Caratteristica principale di questa zona è la straordinaria ricchezza d'acqua sotterranea, che ha contribuito alla creazione di uno sviluppo economico e sociale notevole. Questa peculiarità deriva dalla combinazione di due fattori: la situazione geologica particolarmente favorevole del sottosuolo e gli strettissimi rapporti



Figura 1.2: *Inquadramento territoriale dell'area di studio.*

tra acque superficiali ed acque sotterranee, che consentono efficaci ricariche degli acquiferi esistenti.

Le conoidi alluvionali ghiaiose del materasso quaternario che caratterizzano l'area di studio rivestono un ruolo fondamentale nell'analisi dei caratteri idrologici e stratigrafici della pianura Vicentina. Queste estese strutture a ventaglio sono state depositate dai fiumi in tempi diversi, quando il loro regime era caratterizzato da portate molto maggiori rispetto alle portate attuali, derivanti dallo scioglimento dei ghiacciai. I corsi d'acqua, caricati di notevoli quantità di materiale solido grossolano proveniente soprattutto dall'erosione dei depositi morenici, hanno trasportato e, quando le pendenze erano tali da diminuire le velocità, hanno depositato a valle questi materiali.

L'instabilità degli alvei di questi corsi d'acqua, come in altri molti casi, ha consentito loro di divagare ampiamente nella pianura e di distribuire il materiale grossolano trasportato su aree molto ampie. Le conoidi prodotte dai fiumi di questa pianura non si sono limitate a sovrapporsi tra loro nel corso del tempo, ma in molti casi si sono anche compenstrate lateralmente con quelle degli altri fiumi, cosicché ne risulta un sottosuolo interamente ghiaioso per tutto lo spessore del materasso alluvionale.

Questa conformazione a materasso indifferenziato si estende dalla base dei rilievi montani fino alla comparsa dei livelli limoso-argillosi, localizzabili qualche km a nord della fascia delle risorgive (figura 1.2).

La comparsa delle lenti a bassa permeabilità, in particolare del primo livello limoso-argilloso, profondo mediamente una trentina di metri, permette di individuare una zona di transizione tra l'acquifero indifferenziato a nord e il sistema multifalde a sud; in questa zona di transizione, quindi, l'acquifero indifferenziato inizia a differenziarsi per la presenza dei livelli limoso-argillosi e le ghiaie vengono progressivamente sostituite da sabbie e argille. In definitiva si osserva che, scendendo verso valle seguendo la direttrice NW-SE, lo spessore dei depositi ghiaiosi si assottiglia sempre più andando ad esaurirsi all'interno di un materasso costituito da materiali esclusivamente fini.

La caratterizzazione geologico-strutturale della pianura alluvionale consente

quindi di suddividere l'area oggetto di studio in tre zone principali [1], come visualizzato in figura 1.3:

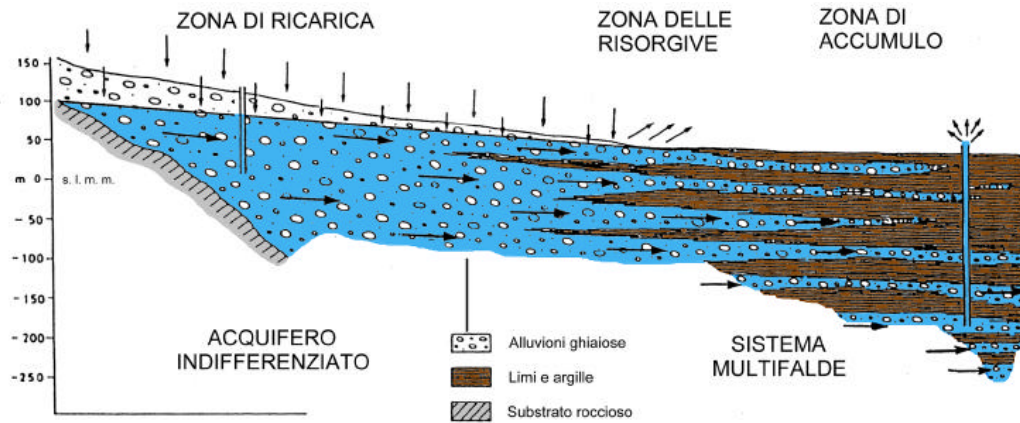


Figura 1.3: *Schema idrogeologico dell'Alta e Media pianura veneta [2].*

- una *zona di ricarica*, individuata dal materasso alluvionale (ghiaioso - sabbioso) indifferenziato che caratterizza la parte a nord delle risorgive, detta Alta pianura. Questa zona è caratterizzata dalla presenza di un'unica falda a superficie libera che regola, da un punto di vista idraulico, le variazioni delle riserve idriche profonde verso sud, interessate dalle attività di emungimento. Nella parte più meridionale compare un orizzonte argilloso che separa l'acquifero libero superficiale da uno più profondo in pressione, creando una fascia di transizione tra l'acquifero indifferenziato regolatore ed il sistema in pressione a valle delle risorgive;
- la *zona delle risorgive* (o *fontanili*), in corrispondenza delle quali si ha la naturale fuoriuscita dalla falda sotterranea delle portate idriche eccedenti. Queste acque emergenti originano un reticolo superficiale molto fitto ed esteso da cui si originano corsi d'acqua quali il Bacchiglione e l'Astichello, e contribuiscono alla creazione delle zone umide, aree di particolare bellezza ed importanza ecologica, come, ad esempio, la zona umida del Bosco di Villaverla. La posizione della linea delle risorgive migra stagionalmente in

funzione delle variazioni dei diversi fattori del bilancio idrico, interessando una fascia di larghezza variabile fra 2 e 10 *km*;

- la *zona di accumulo*, a sud delle risorgive, caratterizzata da una differenziazione in falde sovrapposte in pressione che danno origine ad un complesso acquifero multistrato tipico della Media pianura. Gli strati limosi-argillosi presenti nell'Alta pianura sotto forma di lenti discontinue di dimensioni limitate diventano in questa zona dei veri e propri strati continui; essi delimitano acquiferi che nel sub-bacino Astico raggiungono spessori di qualche decina di metri. Tutti gli strati permeabili presentano un progressivo assottigliamento da ovest verso est e da nord a sud, con un aumento di strutture lenticolari nelle stesse direzioni ed una diminuzione granulometrica. Nel sistema multistrato si distinguono sei fasce sovrapposte ad elevata permeabilità orizzontale, localizzate a circa 30, 50, 90, 120, 160, 200 metri di profondità [1]. Delle diverse falde acquifere presenti, quella più superficiale, compresa nei 25 metri sotto il piano campagna, è poco utilizzata (falda freatica). La prima falda in pressione, posta ad una profondità media di circa 30 metri, è sottoposta ad un utilizzo più consistente, così come è discretamente sfruttato l'acquifero situato tra i 70 e i 100 metri di profondità (3° acquifero in pressione). Le falde in pressione costituiscono la più importante fonte di approvvigionamento a scopi acquedottistici.

1.2 Aggiornamento della carta delle isofreatiche

La tutela e la corretta gestione della risorsa idrica superficiale e sotterranea non possono prescindere dall'acquisizione dei dati relativi alle grandezze di interesse, quali le portate dei corsi d'acqua, le precipitazioni, i livelli piezometrici.

In particolare, per la modellizzazione dei sistemi acquiferi del Veneto Centrale è stato necessario acquisire quante più informazioni possibili (storiche e aggiornate) relative a livelli piezometrici registrati nel corso degli anni in pozzi presenti nell'area di studio, al fine di ricostruire una piezometria di riferimento

e di stimarne l'evoluzione temporale. Chiaramente le informazioni reperite si riferiscono principalmente alla falda freatica; i dati relativi agli acquiferi in pressione sono stati stimati a partire dai monitoraggi, ove presenti, nei pozzi ad uso acquedottistico.

1.2.1 Il pozzo 27 di Caldogno

Il pozzo 27 di Caldogno è un pozzo in falda freatica. Le osservazioni manuali sono incominciate nel 1977 sul vecchio pozzo in muratura. In seguito, a causa dell'abbassamento della superficie freatica, il pozzo si è asciugato ed è stato necessario approfondirlo. In quella occasione il pozzo in muratura è stato sostituito da un pozzo tubolare in acciaio profondo 12 metri, tuttora sufficienti per misurare i periodi di siccità. Nel 1994, si è passati dalla misura manuale con freatimetro alla misura in automatico grazie all'installazione della stazione di monitoraggio. Il pozzo è stato fornito di sonda piezoresistiva, posta sul fondo, che misura la variazione di pressione dovuta all'oscillazione del livello dell'acqua nel pozzo, dalla quale si ricava la quota freaticometrica. Il regime del pozzo allo studio è stato correlato al regime del pozzo numero 1 di Villaverla, sufficientemente vicino (entrambi si trovano all'interno dell'area del bosco di Dueville) e anch'esso in falda freatica, del quale si conoscono i livelli piezometrici a partire dal 1971. In questo modo è stato possibile estendere la serie costituita dai livelli freaticometrici nel pozzo 27 di Caldogno fino al 1971. I dati sono stati forniti dal Centro Idrico di Novoledo (Villaverla-Vicenza) [3]

In conclusione, si hanno a disposizione i valori settimanali del livello piezometrico nel pozzo 27 di Caldogno dal 1971 ad oggi, espressi in m s.l.m.m.; i valori dal 1971 al 1977 sono ricavati dalla relazione con il livello nel pozzo 1, i valori dal 1977 ad oggi sono valori misurati. In realtà la lettura viene eseguita ogni 6 ore, la media delle 4 letture giornaliere fornisce un unico valore giornaliero. Tuttavia si nota una variazione significativa del livello della falda solo ad intervalli settimanali e ciò giustifica la scelta di tale intervallo di campionamento.

Il progressivo abbassamento del livello della falda freatica registrato nell'ulti-

mo trentennio, accompagnato dalla corrispondente diminuzione sia della portata delle risorgive sia della pressione delle falde in pressione, è visibile nel grafico che riporta l'andamento della falda nel pozzo 27 di Caldogno: la retta di regressione ai minimi quadrati, che minimizza lo scarto quadratico medio dalla retta stessa, evidenzia un trend negativo, corrispondente ad una perdita di 3,84 cm all'anno, cioè 1,42 m in quasi 37 anni.

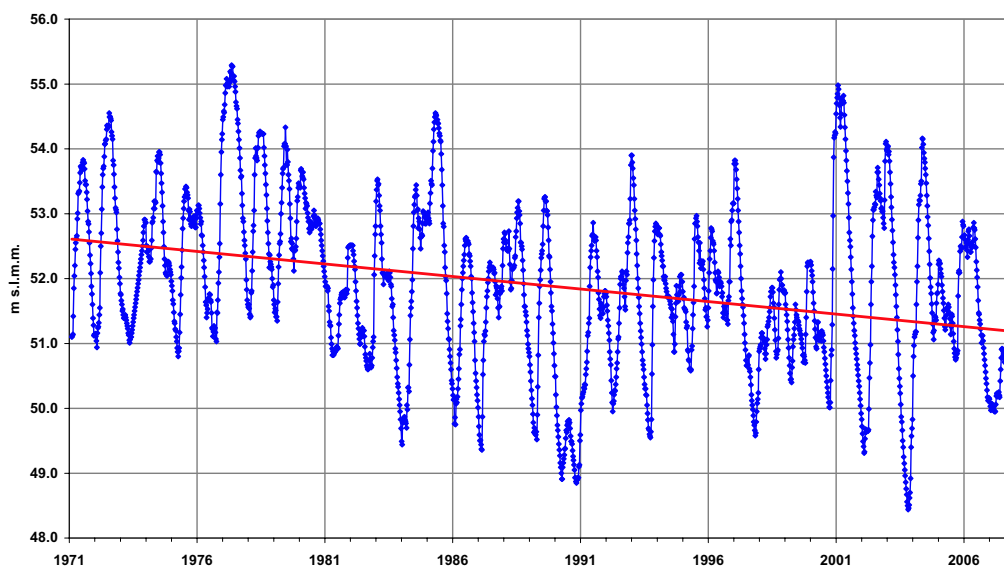


Figura 1.4: *Livello piezometrico nel pozzo 27 di Caldogno [3].*

1.2.2 I dati freaticometrici storici

Oltre al monitoraggio del pozzo di Caldogno, sono stati acquisiti i dati dei monitoraggi condotti a cadenza mensile a partire dal giugno 1975 fino a febbraio 1981 (in totale 61 campagne di misura [4]). Questi dati si riferiscono ad una rete di punti di controllo (147 pozzi livellati e georeferenziati) censiti negli anni '70 dall'A.I.M. di Vicenza, e ubicati sia nella zona di interesse per questo studio, sia ad est del Brenta (vedi fig. 1.5). In tutto si possiedono quasi 9000 dati freaticometrici.

In figura 1.6 si può vedere l'andamento piezometrico del pozzo 27 di Caldogno

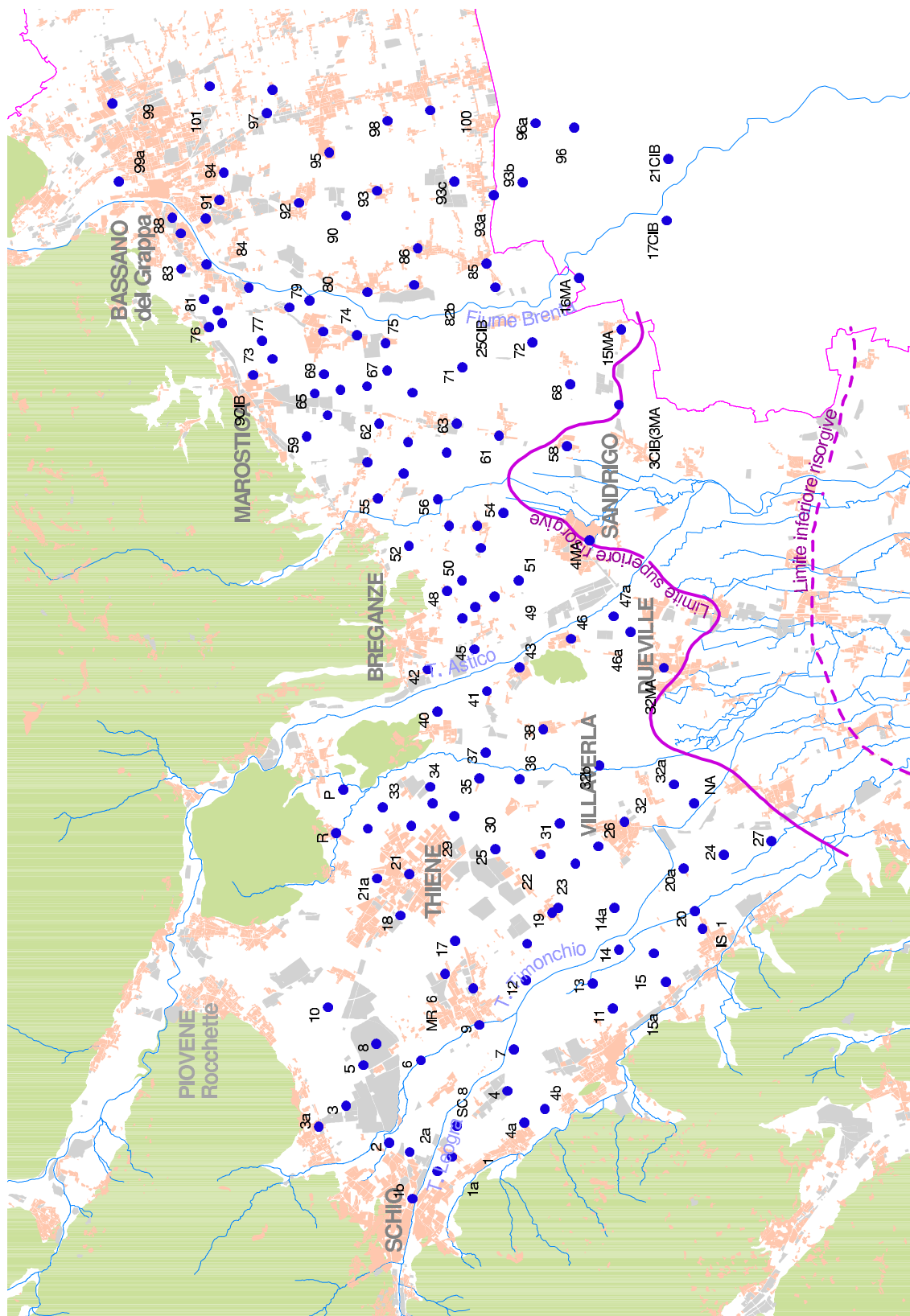


Figura 1.5: I pozzi del censimento A.I.M. degli anni '70.

con evidenziato il periodo in cui sono state realizzate le campagne di misura sulla rete A.I.M..

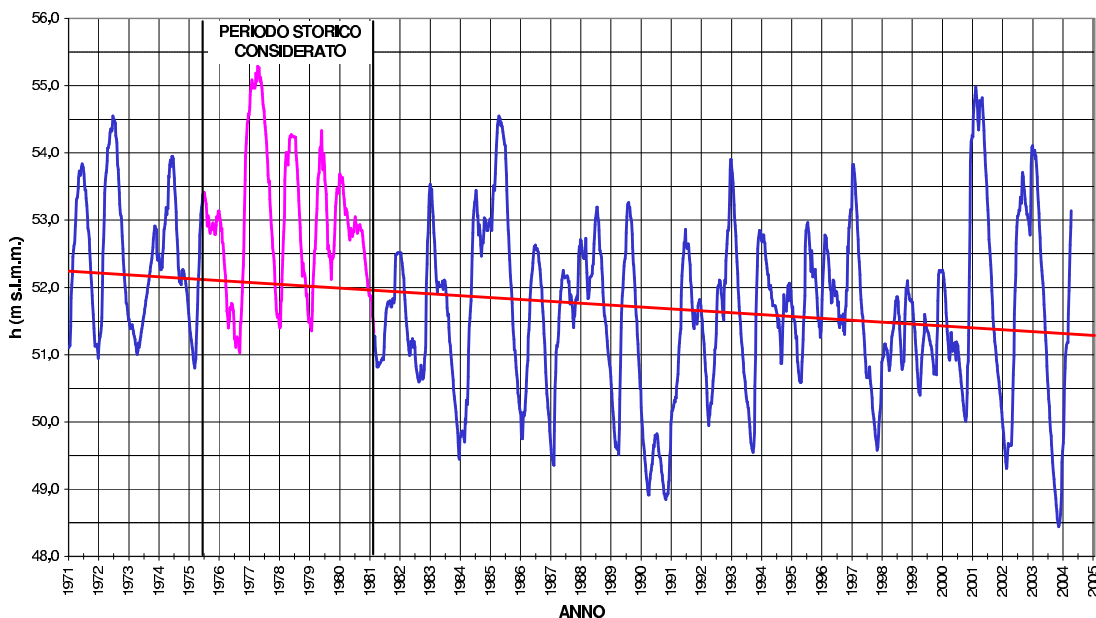


Figura 1.6: *Livello falda pozzo 27 di Caldogno e periodo delle campagne di monitoraggio (1975 -1981).*

1.2.3 Nuove campagne di monitoraggio

Per la raccolta di nuovi e più aggiornati dati freaticometrici, si è presentata la necessità di rivedere la rete storica di monitoraggio utilizzata in passato. A partire dalle informazioni contenute nelle schede monografiche cartacee (ubicazione, profondità, foto, ...) e attraverso numerosi sopralluoghi si è individuata la nuova rete di monitoraggio contenente sia i pozzi storici tuttora idonei (requisiti di idoneità: non chiusi, accessibilità all'interno del pozzo alla sonda del freaticometro, assenza di pompa sommersa o aspirante o possibilità di spegnimento in orari concordati con il proprietario) sia alcuni nuovi pozzi, scoperti durante i sopralluoghi. Si sono create nuove schede monografiche contenenti, per ognuno dei 107 pozzi della nuova rete, i seguenti campi:

- Nome della stazione;

- Foto del pozzo;
- Località;
- Comune;
- Proprietario;
- Indirizzo;
- Telefono;
- Coordinata Gauss-Boaga X;
- Coordinata Gauss-Boaga Y;
- Quota assoluta della bocca pozzo (b.p.) in metri riferita al livello del medio mare;
- Profondità del pozzo rispetto alla bocca pozzo (in metri);
- Altezza della bocca pozzo rispetto al piano campagna (p.c.) in metri;
- Profondità del pozzo rispetto al piano campagna (in metri);
- Diametro del pozzo (in cm);
- Utilizzazione del pozzo (es. irriguo, aziendale...);
- Osservazioni eventuali;
- Ubicazione del pozzo da C.T.R..

Per misurare la profondità dei pozzi è stato costruito uno strumento apposito costituito da una corda metrata, di lunghezza 100 *m*, all'estremità della quale è stato fissato un peso di 2 *kg* di diametro 15 *cm*. In questo modo, al variare della tensione della corda, si riesce a percepire quando il peso si appoggia sul fondo del pozzo e, di conseguenza, a ricavare la profondità del pozzo.

Grande attenzione è stata dedicata alla misura della quota assoluta della bocca pozzo (z_{BP}), espressa in m s.l.m.m.. Infatti essa rappresenta la quota di riferimento a partire dalla quale, sottraendo la misura effettuata col freatimetro (l), si ottiene la quota assoluta della falda in quel punto (h).

$$h = z_{BP} - l$$

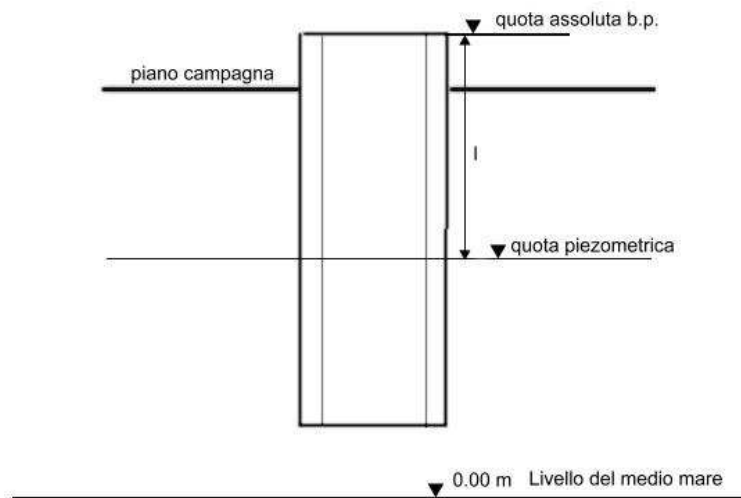


Figura 1.7: *Determinazione della quota piezometrica della falda.*

Per i pozzi che hanno subito modificazioni strutturali il valore della quota b.p. è stato aggiornato, mentre, per i nuovi pozzi aggiunti alla rete di monitoraggio, si è proceduto a battute in campagna con GPS per la misurazione della loro quota b.p..

Si sono condotte 9 nuove campagne di monitoraggio nei seguenti giorni:

- 18-19 novembre 2003;
- 28-29 gennaio 2004;
- 18-19 marzo 2004;
- 26-28 gennaio 2005;



Figura 1.8: *Rilevamento delle coordinate geografiche (x , y e quota b.p.) di un pozzo tramite GPS (pozzo M2).*



Figura 1.9: Nuova rete di monitoraggio.

- 3-8 marzo 2005;
- 28-29 aprile 2005;
- 22-24 giugno 2005;
- 3-4 ottobre 2005;
- 13-14 dicembre 2005.

Le campagne sono state condotte cercando di limitare l'intervallo temporale in cui venivano effettuate tutte le misure e di evitare i periodi caratterizzati da precipitazioni, al fine di rappresentare una situazione istantanea e sufficientemente stazionaria delle piezometrie.

1.2.4 Carta delle isofreatiche

A partire dalle quote assolute (m s.l.m.m.) della falda freatica misurata nei pozzi della rete di monitoraggio ed utilizzando il metodo di interpolazione spaziale chiamato kriging, si sono ricavate le carte delle linee isofreatiche, ossia le linee che uniscono i punti con lo stesso valore della quota freatica (espressa in metri s.l.m.m.), per ognuna delle campagne di monitoraggio (storiche e recenti).

I metodi di interpolazione spaziale permettono, dato uno spazio dove sono stati misurati in alcuni punti i valori assunti da una grandezza, di stimare i valori nei punti dove tale grandezza non è stata misurata, a partire dai valori noti. Il kriging è stato implementato attraverso il programma Surfer 8 della Golden Software: in particolare, si è implementato il kriging universale, utilizzato nei casi in cui la grandezza da interpolare ha un trend spaziale, con variogramma lineare e trend lineare.

In figura 1.10 si riporta la carta delle isofreatiche relativa alla campagna di monitoraggio di Marzo 2005. Le isofreatiche hanno andamento del tutto simile a quello che si può vedere nella carta delle isofreatiche prodotta da Dal Prà nel 1983 relativa alla campagna di monitoraggio di novembre 1975 (figura 1.11) [7].

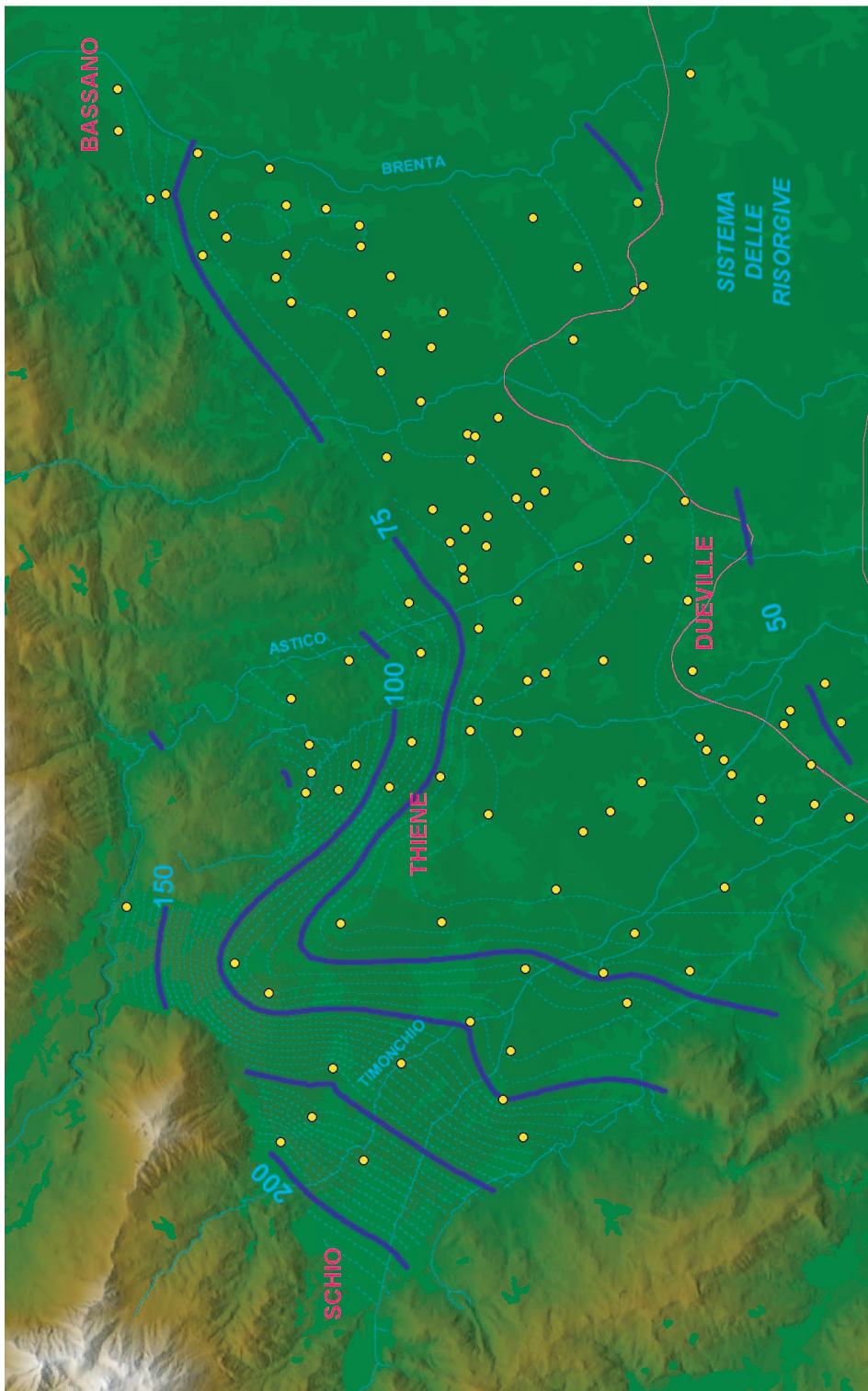


Figura 1.10: *Carta delle isofreatiche (Marzo 2005, equidistanza 5 m, quote assolute espresse in m.s.l.m.m).*

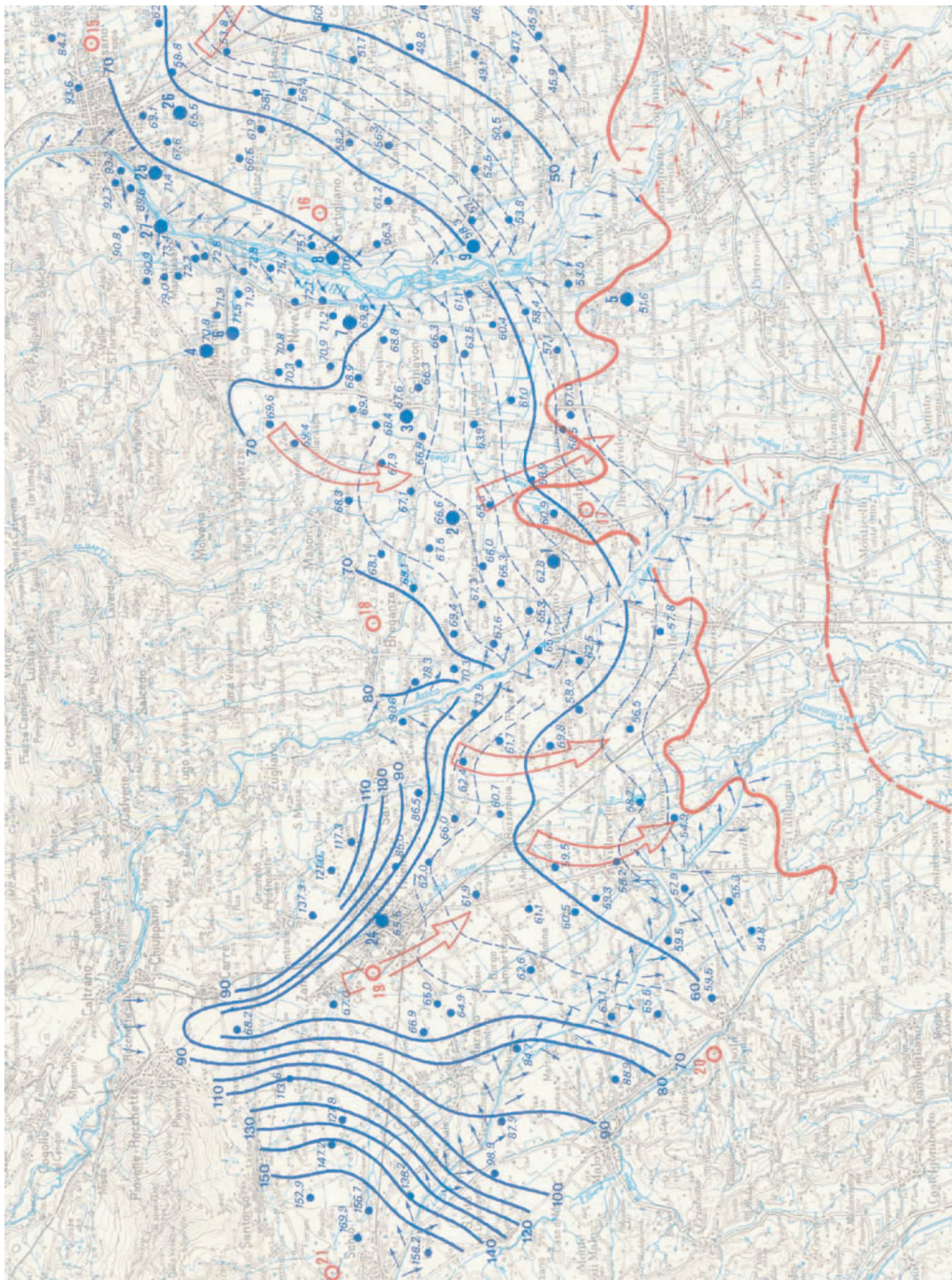


Figura 1.11: *Carta delle isofreatiche prodotta da Dal Prà (rilievi del Novembre 1975).*

Sempre utilizzando il programma Surfer 8, si è ricavata la distribuzione spaziale del gradiente idraulico e della curvatura entrambi calcolati rispetto al piano orizzontale.

I valori più elevati del gradiente (figura 1.12) si collocano nell'alta pianura, a ridosso dei rilievi dove le pendenze raggiungono valori attorno a $2, 2^\circ - 2, 3^\circ$, ossia $3, 8\%$; scendendo verso sud, diminuendo la perturbazione generata dalla presenza del substrato roccioso, i valori del gradiente sono inferiori, ossia $0, 1^\circ - 0, 2^\circ$, pari al $0, 02\%$.

L'andamento delle isofreatiche evidenzia inoltre la presenza di alcune direttrici principali di deflusso sotterraneo, che rivelano la presenza di antichi alvei (paleoalvei) ormai sepolti, caratterizzati da materiale a più alta permeabilità rispetto al materiale circostante. Queste direttrici preferenziali di deflusso sono evidenti nella figura 1.14 che riporta la distribuzione spaziale della curvatura: dove la curvatura della superficie piezometrica è positiva (rappresentata in figura dal colore fucsia) il flusso sotterraneo converge e quindi si ha un asse di drenaggio o direttrice di deflusso sotterraneo, dove la curvatura è negativa (rappresentata in figura dal colore verde) il flusso sotterraneo diverge e si ha un asse di dispersione o direttrice di divergenza del deflusso sotterraneo.

Le direttrici di drenaggio sono, partendo da ovest verso est (figure 1.14 e 1.15):

- 1** - direttrice Leogra-Timonchio: questa prima direzione di deflusso sotterraneo, presente nella parte occidentale dell'alta pianura vicentina, è probabilmente legata ai paleoalvei del sistema Leogra-Timonchio e converge al centro della pianura;
- 2** - direttrice Astico: la seconda direttrice, evidenziata anche dalla pronunciata concavità delle isofreatiche, è dovuta all'assetto stratigrafico del sottosuolo, caratterizzato da alluvioni molto permeabili di antichi alvei dell'Astico; questo asse si sviluppa da nord verso sud sud-ovest a partire dal tratto Rocchette-Caltrano del torrente Astico;
- 3** - direttrice di Novoledo [6]: la terza direttrice appare denunciata da un'infles-

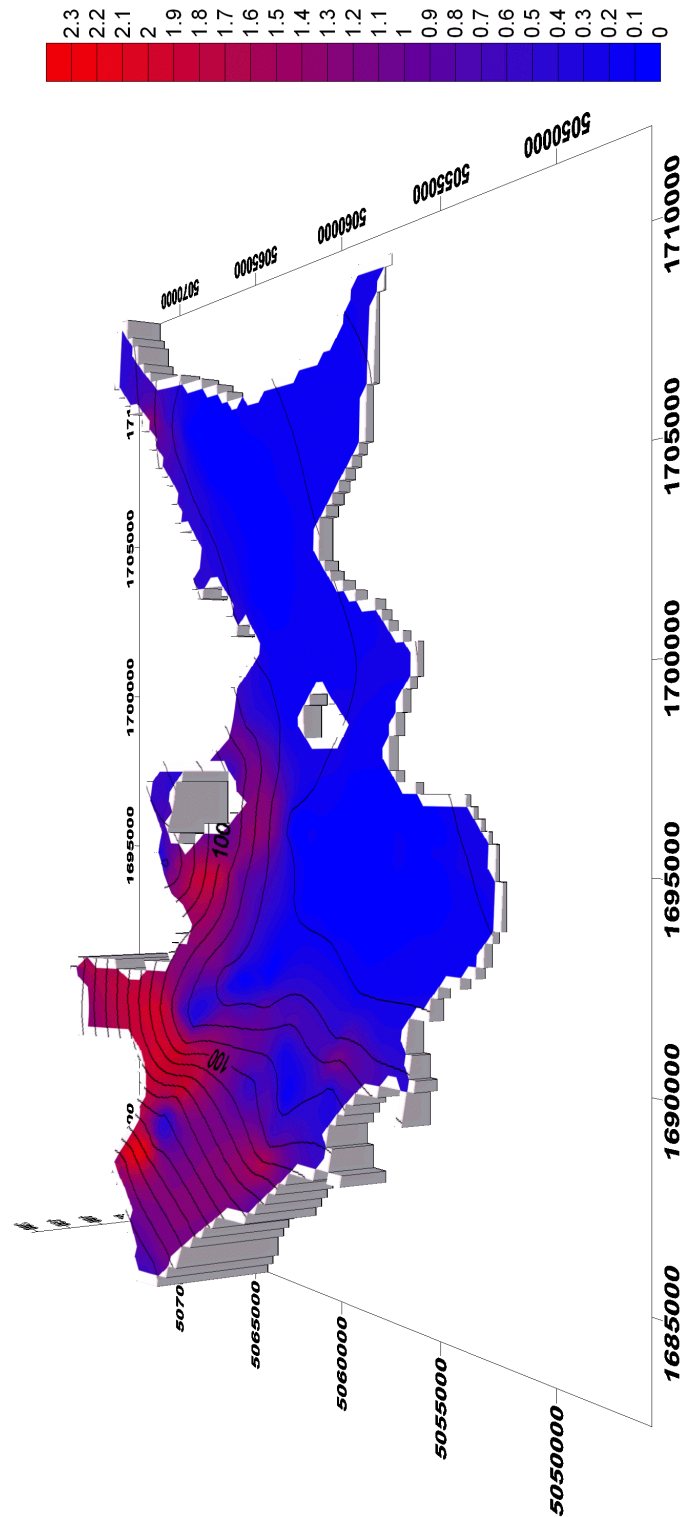


Figura 1.12: *Andamento del gradiente idraulico della falda (valori in gradi dal piano di riferimento orizzontale).*

sione delle isofreatiche tra le colline di Sarcedo e Montecchio Precalcino. La buona correlazione esistente tra le oscillazioni del pozzo 41 in località Molle e le portate dell'Astico a Passo di Riva conferma la presenza di questo asse di drenaggio che convoglia le acque disperse dall'Astico verso Villaverla e Dueville (figura 1.13).

- 4 - direttrice Laverda: si sviluppa con andamento NO-SE, seguendo il corso del t.Laverda fino alle risorgive di Sandrigo;
- 5 - direttrice Brenta: la quinta direttrice è ricollegabile alle acque disperse dal fiume Brenta nel suo tratto Bassano-Friola e coincide con un antico alveo del fiume stesso ed alimenta le risorgive della zona di Sandrigo [1].

Le direttrici 1 e 2 sono separate da una zona a curvatura negativa, cioè da un asse di flusso sotterraneo divergente, identificabile con il torrente Timonchio il cui alveo disperde in falda parte delle portate trasportate. Analogamente appena ad est della direttrice Astico si trova l'alveo disperdente del torrente Astico.

1.2.5 Carta delle isopache

In seguito si sono ricavate le carte delle isopache, ossia delle linee che uniscono punti in cui la superficie freatica si trova ad ugual profondità rispetto al piano campagna. Esse rappresentano quindi lo spessore del materasso alluvionale sovrastante la superficie piezometrica.

La carta delle isopache è importante per i seguenti motivi:

- consente di valutare il potere filtrante dei terreni;
- permette di definire gli spessori minimi di materasso alluvionale (relativi alla situazione di massimo innalzamento della falda), utili nelle valutazioni di vulnerabilità all'inquinamento della falda stessa;
- permette di dare una prima indicazione sui luoghi idonei per le attività estrattive.

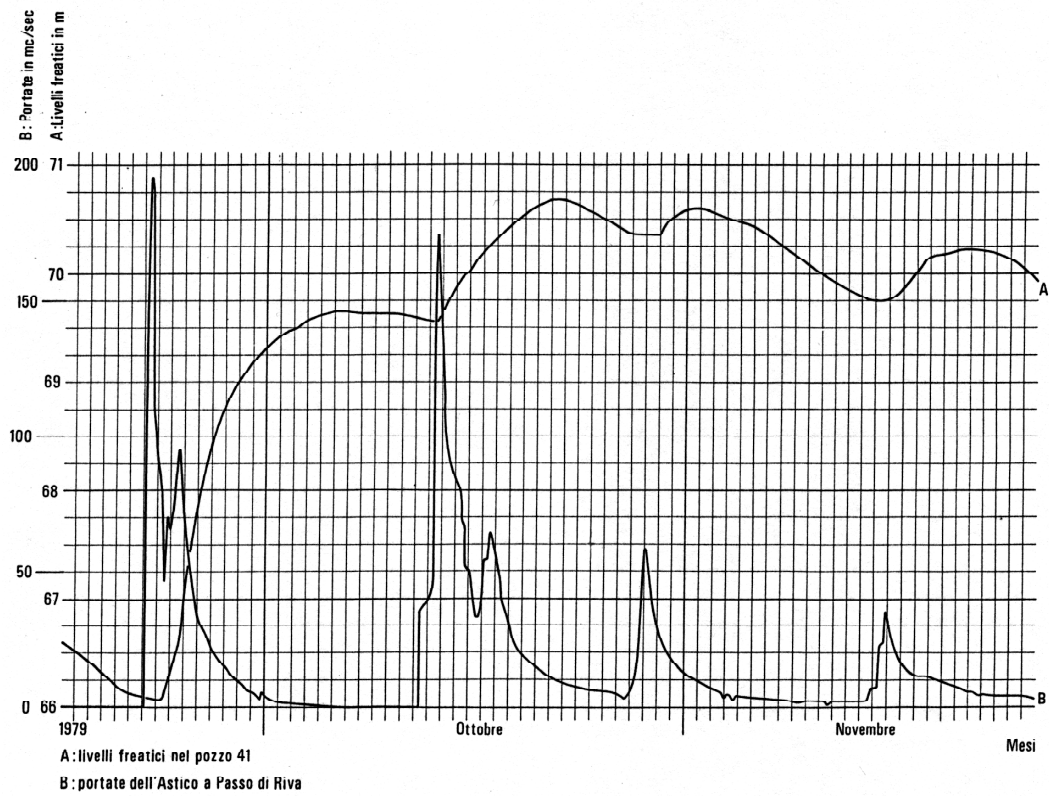


Figura 1.13: *Correlazione tra livello freatico nel pozzo 41 e portata dell'Astico a Passo di Riva [1].*

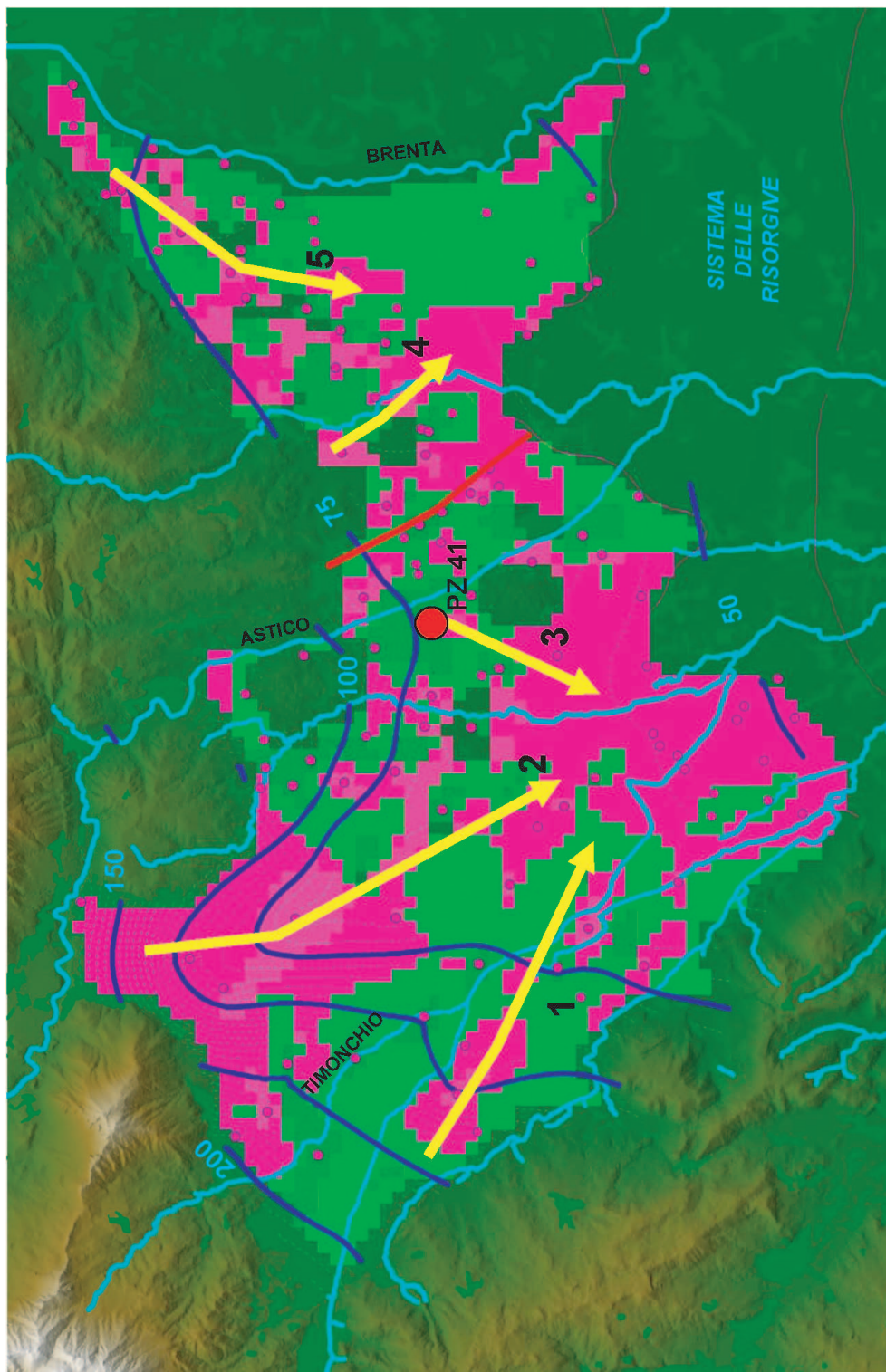


Figura 1.14: Andamento della curvatura della superficie freatica rispetto al piano orizzontale, assi di drenaggio e spartiacque dinamico. Valori negativi (in verde) = flusso d'acqua divergente; valori positivi (in fucsia) = flusso d'acqua convergente.

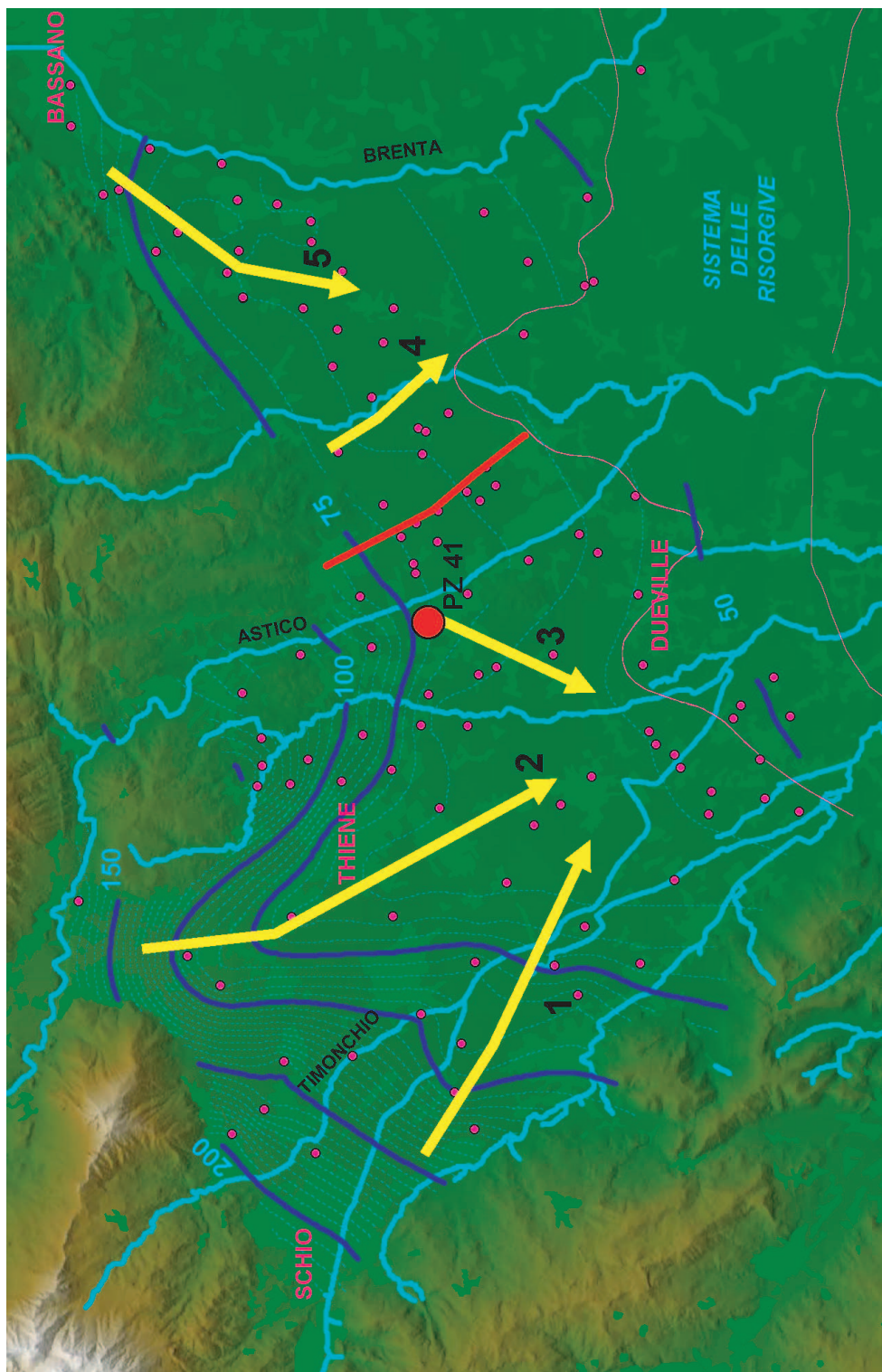


Figura 1.15: *Principali direttrici di drenaggio e spartiacque dinamico.*

Si riporta la carta delle isopache relativa alla situazione monitorata nell'aprile 1977: i livelli piezometrici registrati in questa occasione rappresentano i valori massimi all'interno del periodo di monitoraggio della falda (campagne storiche del 1975-1981 e campagne recenti da novembre 2003 a dicembre 2005); inoltre, dall'analisi dell'andamento piezometrico del pozzo 27 di Caldogno (1971 - oggi) si può affermare che la situazione di aprile 1977 sia effettivamente la situazione di massimo innalzamento dell'intero periodo 1971- oggi. La differenza tra la quota del piano campagna ¹ e la quota freatica di aprile 1977 fornisce la distribuzione spaziale dello spessore insaturo minimo, ossia la carta delle isopache relative al massimo innalzamento della falda freatica.

Come si vede dalla figura 1.16, lo spessore insaturo, analogamente a quanto accade per la superficie piezometrica, è molto variabile nello spazio: gli spessori maggiori (100-150 metri) si registrano a ridosso dei rilievi montuosi nella zona di Piovene Rocchette; scendendo verso valle la profondità della falda rispetto al piano campagna diminuisce progressivamente fino a raggiungere valori minimi inferiori al metro nella fascia delle risorgive. Le curve in rosso indicano spessori negativi non reali e si trovano nelle zone in cui la superficie piezometrica, intersecando quella topografica, viene a giorno originando le risorgive. Dall'analisi della figura 1.16 si evidenzia una buona corrispondenza tra le zone di emergenza della falda individuate dall'operazione di intersezione tra falda e piano campagna e il limite superiore delle risorgive ottenuto unendo le zone di risorgiva conosciute e presenti nel territorio. Si noti che nella zona di Dueville la superficie piezometrica è 4 m al di sopra del p.c.: proprio in questa zona si trovano le risorgive dalle quali nasce il fiume Bacchiglione.

1.2.6 La rete di monitoraggio automatica

Durante le campagne di monitoraggio recenti (novembre 2003 - dicembre 2005) è emersa la necessità di automatizzare questa operazione di acquisizione dati

¹Per i valori di quota della superficie topografica è stato utilizzato il DEM - Digital Elevation Model - del Veneto a maglie di 25 metri.

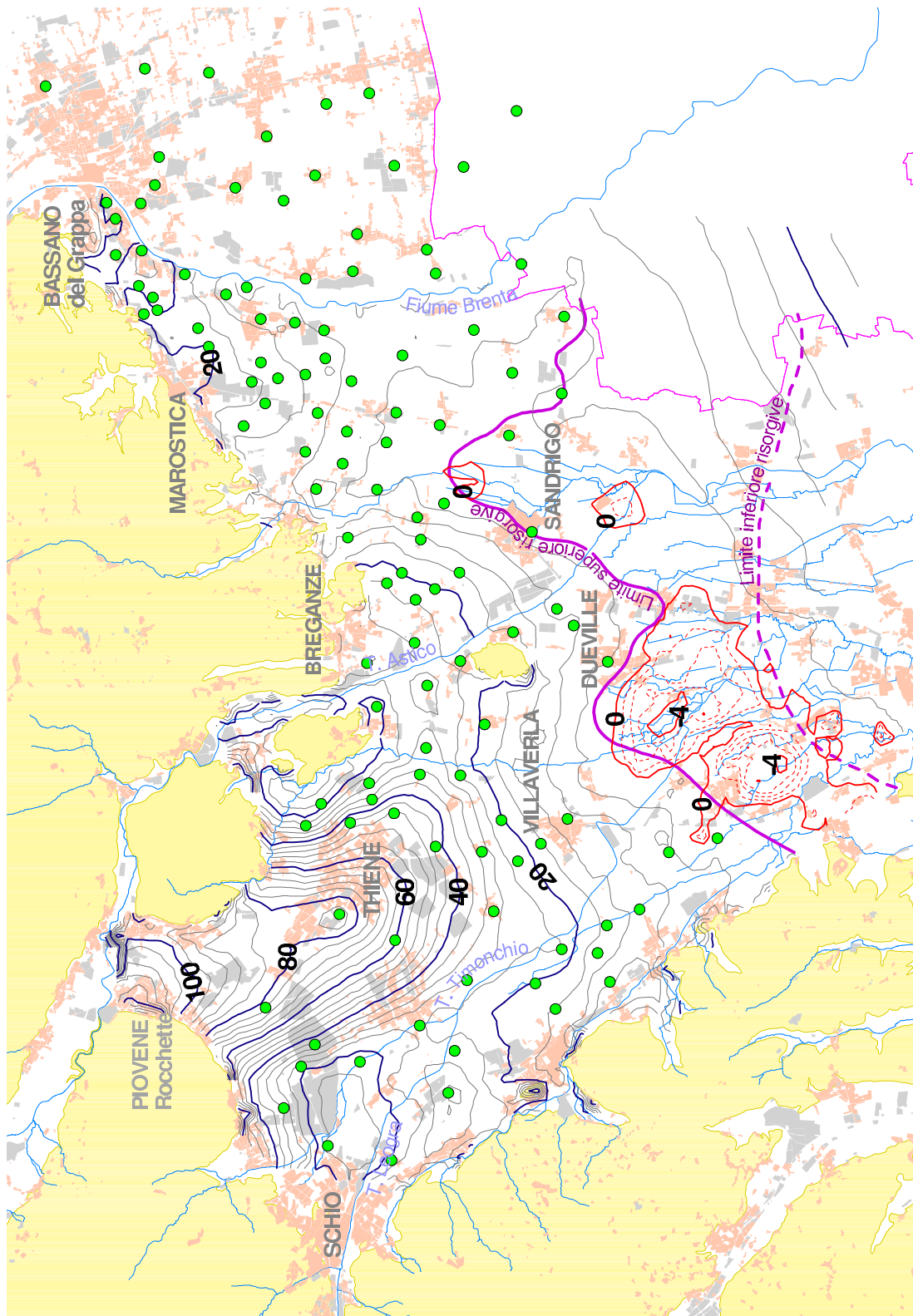


Figura 1.16: Carta delle isopache, ossia spessori (m) del materasso alluvionale sovrastante la superficie di massimo innalzamento della falda (aprile 1977) - equidistanza 4 m

tramite l'installazione di sonde per il monitoraggio in continuo ed in automatico della falda. A tal scopo, sono stati correlati tra loro i livelli piezometrici di tutte le possibili coppie di pozzi e sono state giudicate soddisfacenti le sole correlazioni caratterizzate da $R^2 > 0,9$. Analizzando tutti i grafici di correlazione (figure 1.17 e 1.18), si sono individuate 11 aree omogenee (figura 1.19) all'interno delle quali è possibile monitorare il solo pozzo più rappresentativo (pozzo spia) e ricavare il livello piezometrico in tutti i pozzi dell'area stessa, utilizzando le curve di correlazione tra i livelli piezometrici. Interpolando i valori dei livelli freatici nei pozzi di monitoraggio, si ottiene l'andamento dell'intera superficie freatica. Analizzando la figura 1.19, si nota che esiste una miglior correlazione lungo le direttrici di flusso rispetto alla direzione perpendicolare. Inoltre, si evidenzia che esistono zone in cui i livelli piezometrici nei pozzi di monitoraggio non sono tra loro correlati (zona Schio-Piovene; zona Dueville - Montecchio Precalcino; zona Pozzoleone). Vista la presenza di queste zone prive di pozzo spia, si è deciso di individuare all'interno di queste zone dei pozzi (7) che, seppur non rappresentativi della zona, permettessero, opportunamente strumentati, di completare la rete di monitoraggio dell'alto Vicentino. La figura 1.20 mostra la rete di monitoraggio automatica allo stato attuale costituita da 18 sonde (17 recenti, 1 nel pozzo 27 di Caldogno, monitorato dal 1971). L'intervallo di acquisizione è orario, sufficiente a registrare anche le più rapide variazioni dei livelli di falda.

A titolo di esempio si riportano gli andamenti di alcuni monitoraggi: in figura 1.21 si nota l'andamento anomalo che si registra nel pozzo 41, probabilmente causato dall'estrema vicinanza del t. Astico. Si nota inoltre che il pozzo è asciutto durante i periodi di magra: questa problematica, riscontrata anche in altre pozzi della rete automatica (pozzo 48 a partire da dicembre 2006), ha suggerito la necessità, alla luce dei dati del primo anno di monitoraggio, di rivedere la scelta dei pozzi spia, preferendo un pozzo meno rappresentativo ma più profondo che permetta di acquisire il dato anche in situazioni di magra. Analogamente in figura 1.22 si riporta l'evoluzione temporale del livello piezometrico nei pozzi 10CIB e AVS-M: quest'ultimo ha registrato un abbassamento di 8 metri nel periodo maggio-giugno 2006.

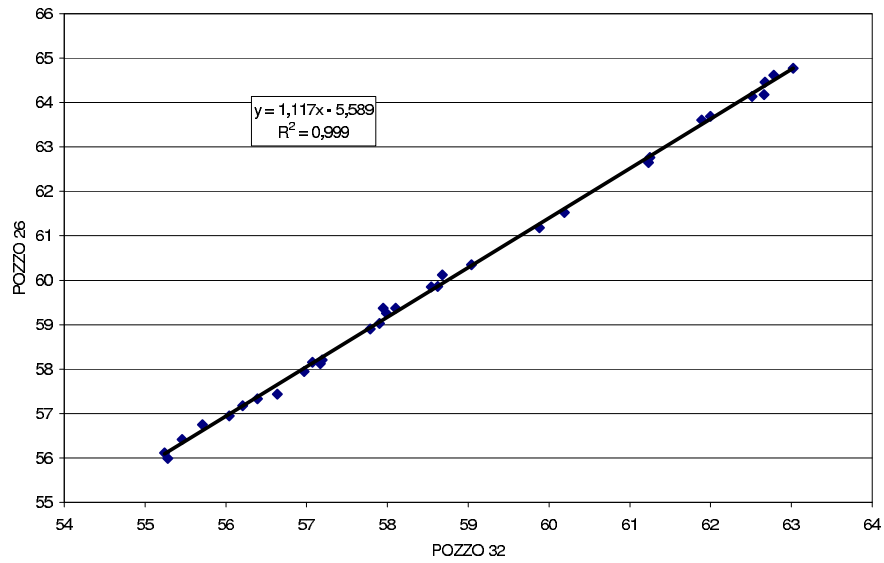


Figura 1.17: Correlazione tra i livelli piezometrici del pozzo 32 e del pozzo 26 (livelli espressi in m s.l.m.m.)

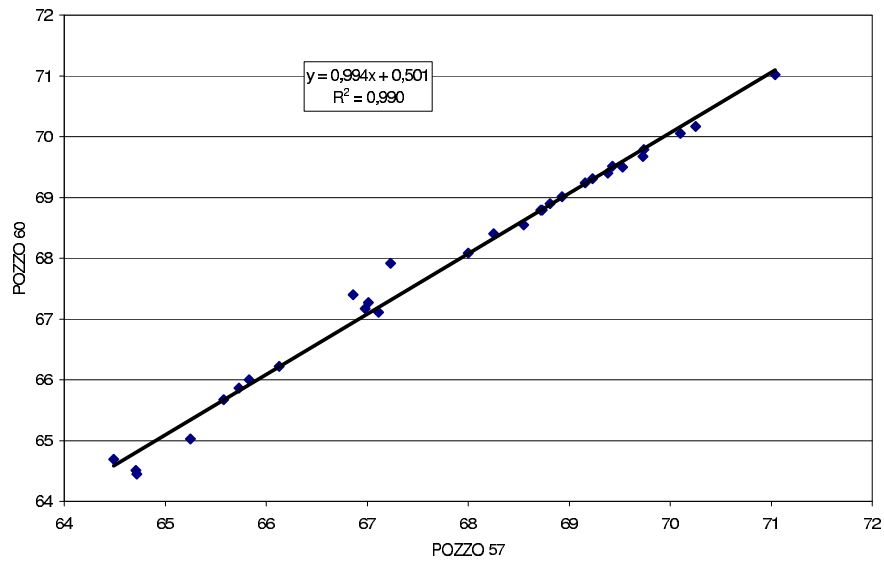


Figura 1.18: Correlazione tra i livelli piezometrici del pozzo 57 e del pozzo 60 (livelli espressi in m s.l.m.m.)

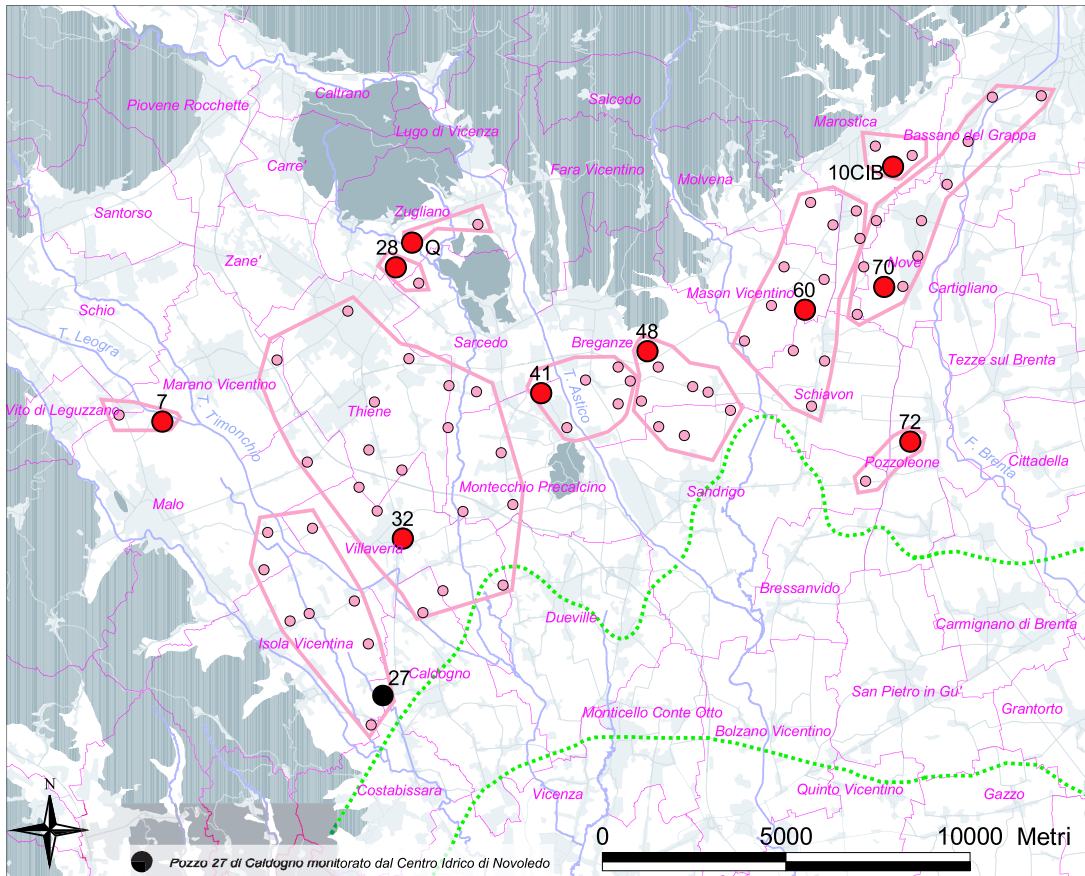


Figura 1.19: Le 11 aree omogenee e i pozzi spia, caratterizzate da una buona correlazione tra i livelli freatici piezometrici.

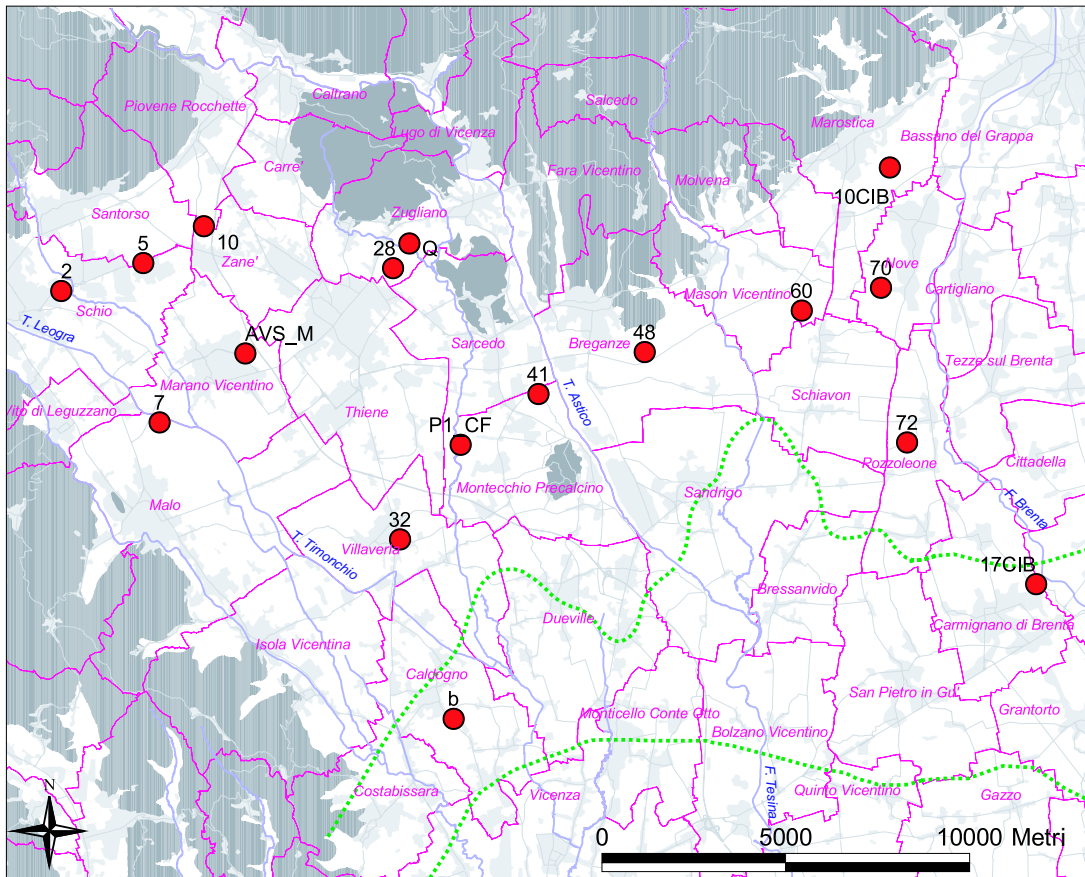


Figura 1.20: Rete di monitoraggio dei livelli della falda freatica nell'Alto Vicentino.

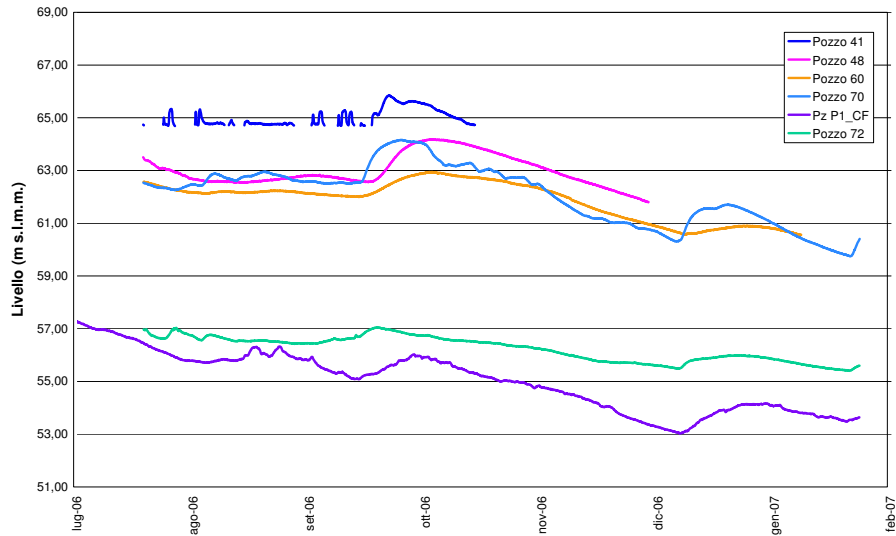


Figura 1.21: *Andamento freaticometrico registrato in alcune stazioni di monitoraggio (Periodo di acquisizione 19/07/2006 - 26/01/2007).*

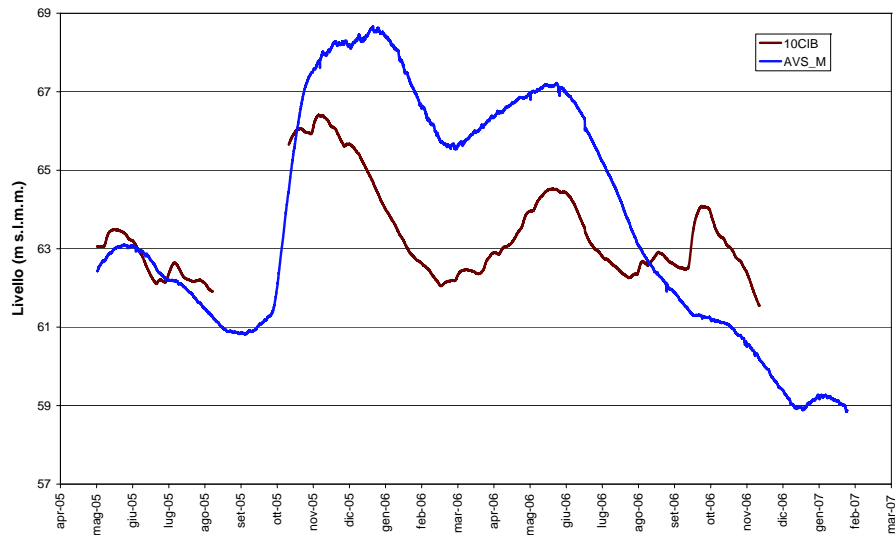


Figura 1.22: *Andamento freaticometrico registrato nelle stazioni di monitoraggio Pozzo 10CIB e Pozzo AVS-M (Periodo di acquisizione 13/05/2005 - 26/01/2007).*

Tabella 1.1: *Pozzi della rete di monitoraggio freaticometrico.*

NUM.	STAZIONE	COMUNE	INIZIO ACQUISIZIONE
1	Pozzo 2	Schio	19/07/2006
2	Pozzo 5	Schio	19/07/2006
3	Pozzo 7	Malo	19/07/2006
4	Pozzo 10	Zanè	19/07/2006
5	Pozzo 28	Zugliano	19/07/2006
6	Pozzo 32	Villaverla	Luglio 2007
7	Pozzo 41	Montecchio Precalcino	19/07/2006
8	Pozzo 48	Breganze	19/07/2006
9	Pozzo 60	Mason Vicentino	19/07/2006
10	Pozzo 70	Nove	19/07/2006
11	Pozzo 72	Pozzoleone	19/07/2006
12	Pozzo 10cib	Marostica	13/05/2005
13	Pozzo 17cib	Carmignano di Brenta	19/07/2006
14	Pozzo AVS-M	Marano	13/05/2005
15	Pozzo b	Caldogno	19/07/2006
16	Pozzo Q	Zugliano	19/07/2006
17	Piezo P1-CF	Montecchio Precalcino	18/04/2006
18	Pozzo 27	Caldogno	01/02/1971

Infine, si sono analizzati i tempi di risposta dei livelli piezometrici nei pozzi agli eventi piovosi: il livello del pozzo 17CIB registra l'evento di precipitazioni in tempi più brevi (1-2 giorni) rispetto ai tempi (15 giorni) registrati nel pozzo 60 (figure 1.23 e 1.24)

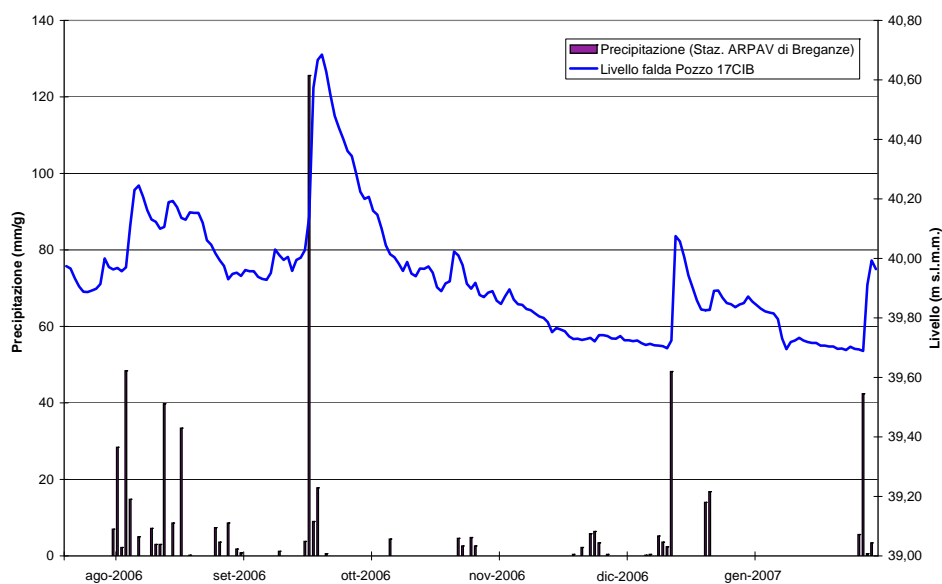


Figura 1.23: *Evoluzione temporale del livello freaticometrico registrato nel pozzo 17CIB e delle precipitazioni registrate nella stazione ARPAV di Breganze.*

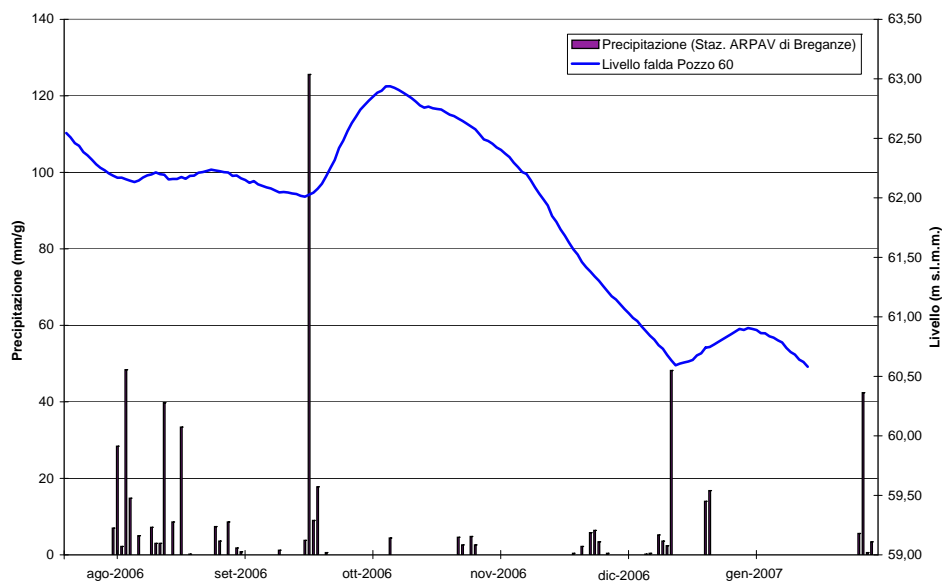


Figura 1.24: *Evoluzione temporale del livello freaticometrico registrato nel pozzo 60 e delle precipitazioni registrate nella stazione ARPAV di Breganze.*

Capitolo 2

Il bilancio idrologico

Il bilancio idrologico è costituito da tutte le portate in ingresso ed in uscita dai territori oggetto dello studio in un determinato intervallo temporale. La stima delle componenti del bilancio fa riferimento ai valori medi di portata registrati nell'anno 2004 (eletto anno di riferimento vista la completezza della banca dati); le portate possono essere entranti o uscenti dall'intero insieme dei sistemi acquiferi considerati. I valori di portata verranno in seguito assegnati ai nodi della mesh computazionale tridimensionale utilizzata dal modello di flusso.

2.1 Il dominio del modello

La scelta del dominio del modello di flusso all'interno del quale è necessario raccogliere tutte le informazioni necessarie per l'implementazione del modello stesso (in particolare, informazioni relative al bilancio idrologico e alla struttura geologica della zona di Alta e Media Pianura in esame) è strettamente connessa al campo di moto dell'acqua sotterranea. Nel determinare la delimitazione spaziale del campo di moto si devono ricercare infatti adatte frontiere (superficiali e profonde) che non siano attraversate da deflussi o apporti idrici o, nel caso siano presenti, questi flussi devono poter essere individuati e stimati. La modalità quindi per definire il dominio, all'interno del quale verrà implementato il model-

lo di flusso, consiste nell'individuare dei confini per i quali si possano definire le condizioni di moto dell'acqua sotterranea.

I 3 tipi di condizioni al contorno che possono essere imposti ai confini del dominio sono [8]:

- quota piezometrica assegnata (condizione di Dirichlet): questa condizione si impone se la quota piezometrica sul confine è indipendente dalle condizioni di flusso dell'acquifero, ad esempio quando l'acquifero confina con un mare, un lago o un fiume. Sul contorno il potenziale idraulico è costante e imposto dal livello dell'acqua nel bacino adiacente, che può ricaricare o drenare l'acquifero. Anche la linea delle risorgive o una determinata isofreatica possono essere considerate contorni con quota piezometrica assegnata. Nel caso delle risorgive la quota da assegnare è data dalla quota di sfioro dell'acqua. Nella condizione di Dirichlet il flusso che attraversa questo confine a potenziale assegnato è perpendicolare al confine stesso. Il potenziale assegnato può essere costante nel tempo (caso permanente) o non costante (caso transitorio).
- flusso assegnato (condizione di Neumann): in questo caso, il flusso perpendicolare al confine di Neumann può essere nullo o non nullo
- quota piezometrica e flusso assegnati (condizione di Fourier): questa condizione è meno frequente delle precedenti e si impone nel caso in cui ci sia un fiume con uno strato a bassa permeabilità depositato sul fondo: in questo modo la differenza di carico idraulico tra il corso d'acqua e l'acquifero (sovrastato dallo strato a bassa permeabilità) genera un flusso attraverso lo strato depositato sul fondo. La condizione da imporre in questo contorno è quindi duplice: la quota piezometrica del fiume, la quota dell'acquifero sottostante e il flusso attraverso lo strato che li separa.

Inoltre, nell'individuazione del dominio, è importante tener conto che le condizioni che verranno imposte al contorno non devono influenzare il campo di moto generato all'interno della zona di interesse. Tale argomentazione motiva la scelta

di un dominio ben più esteso dell'area di interesse che, come già anticipato nel primo capitolo, si estende a nord-ovest di Padova fino alle pendici dell'Altopiano di Asiago, interessando buona parte delle province di Padova e di Vicenza (figura 2.1).

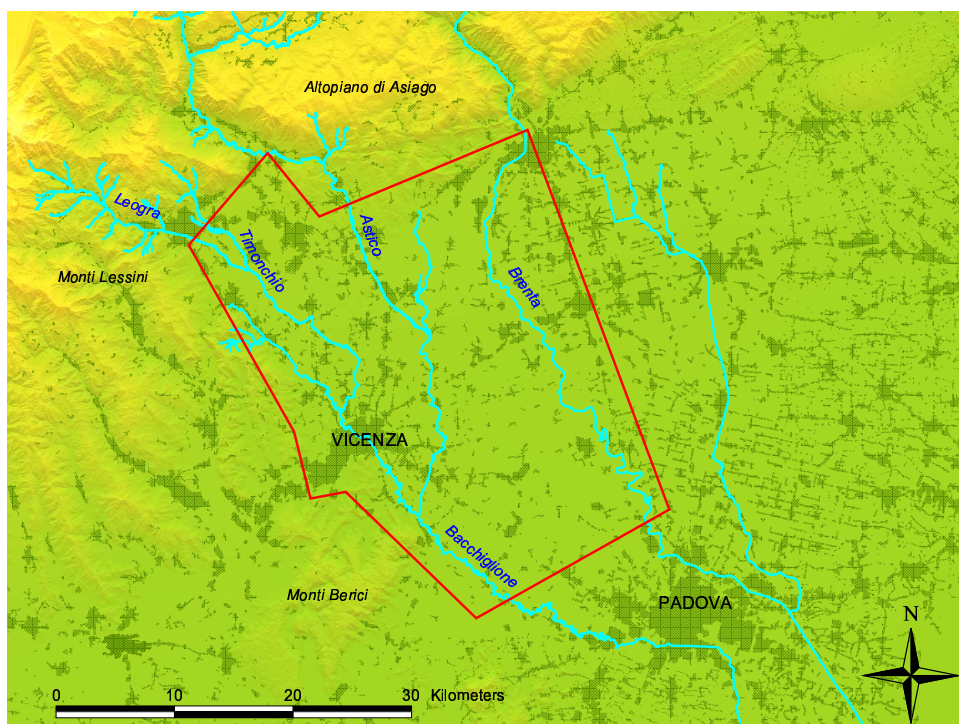


Figura 2.1: *Area di studio.*

Per poter individuare i confini del dominio, è stato necessario ricostruire una mappa, sufficientemente estesa e dettagliata, delle isofreatiche (linee piezometriche relative all'acquifero freatico): in particolare, la mappa creata si riferisce ad una situazione media dell'anno 2004. Vista la completezza della banca dati, l'anno 2004 è stato scelto di riferimento nelle operazioni di stima di tutti i termini di bilancio e nella fase di taratura, realizzata attraverso il confronto tra piezometrie simulate e di riferimento. La piezometria media dell'anno 2004 è stata ricostruita utilizzando le seguenti fonti:

1. campagna di monitoraggio del 18-19 marzo 2004, in cui la superficie piezo-

metrica rappresenta effettivamente la situazione media dell'anno 2004 (ciò è emerso dall'analisi del livello piezometrico nel corso del 2004 nel pozzo 27: il livello registrato nel pozzo nei giorni della campagna di monitoraggio è molto vicino al valore medio registrato nell'anno 2004);

2. freaticimetria regionale del Piano di Tutela (campagna maggio 2003, acquifero freatico);
3. in sinistra Brenta, Carta Idrogeologica dell'Alta Pianura Veneta di Dal Prà (campagna novembre 1975);
4. freaticimetria I.R.S.E.V. bacino dell'Agno-Guà (campagna febbraio 1978, acquifero freatico).

Nota la superficie freatica, si sono scelti i confini del dominio:

- il confine settentrionale è composto da tratti di isofreatiche relative alla freaticimetria media dell'anno 2004; il potenziale assegnato varia da 50 a 200 m s.l.m.m.;
- il confine meridionale è posto in corrispondenza della laguna di Venezia e su di esso è stata imposta la quota piezometrica assegnata pari a 0 m s.l.m.m. (confine di Dirichlet);
- i confini laterali sono stati tracciati, per la maggior parte, perpendicolari alla piezometria relativa all'acquifero freatico e su di essi è stata imposta la condizione di Neumann a flusso nullo.

All'interno di questo dominio sono state raccolte ed elaborate le informazioni relative ai termini di bilancio, con particolare attenzione e maggior dettaglio nei territori di interesse (o area di studio, figura 2.1).

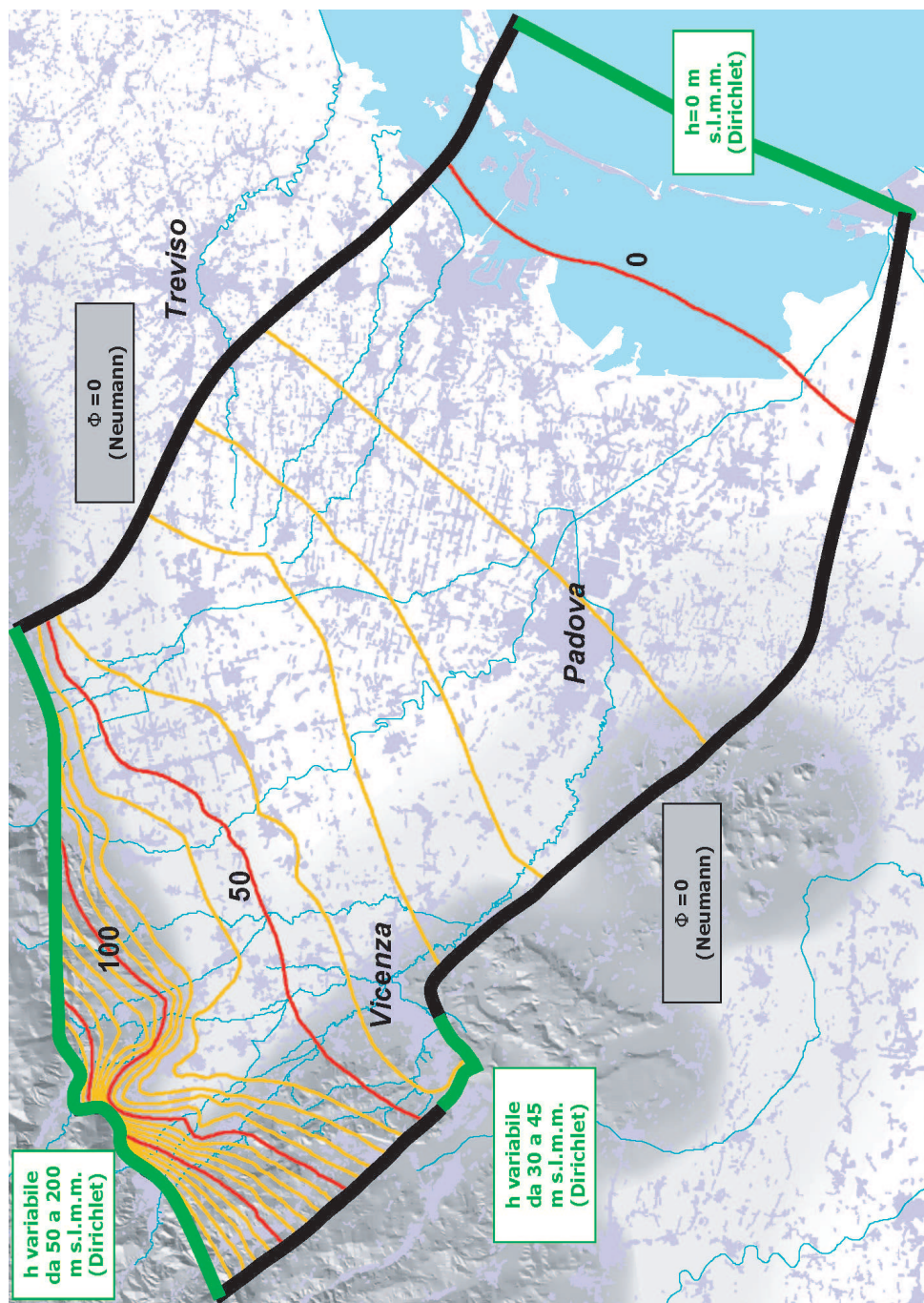


Figura 2.2: Dominio del modello e isofreatiche medie 2004.

2.2 Bilancio idrologico

2.2.1 Apporto meteorico

L'apporto meteorico efficace alla ricarica delle falde è il contributo effettivo agli acquiferi dovuto alle precipitazioni. Tale contributo è particolarmente significativo nei territori dell'acquifero indifferenziato e quindi, a rigore, nella zona compresa tra i rilievi e la linea di comparsa della prima lente a bassa permeabilità: le pendenze relativamente modeste del piano campagna e l'elevata permeabilità verticale che caratterizzano questa zona, chiamata zona di ricarica, favoriscono infatti l'infiltrazione della precipitazione. Al contrario, la comparsa degli orizzonti argillosi impedisce l'infiltrazione dell'acqua piovana e di conseguenza limita la ricarica degli acquiferi.

Nello studio in oggetto, il contributo delle precipitazioni alla ricarica degli acquiferi è stato stimato non solo nell'area di ricarica ma anche nei territori compresi tra la linea di comparsa della prima lente (ottenuta durante l'operazione di ricostruzione del modello geostrutturale) e la linea inferiore delle risorgive, cioè la linea di comparsa delle risorgive in condizioni di magra (figura 2.3): in questa zona di transizione la falda freatica, delimitata inferiormente da un orizzonte argilloso, viene caricata dalle precipitazioni e successivamente, incontrando il piano campagna, viene a giorno originando il sistema delle risorgive.

Nelle aree a sud delle risorgive le condizioni di infiltrazione sono totalmente diverse: solo una piccola parte delle precipitazioni viene assorbita dall'acquifero freatico (molto sottile), mentre la gran parte evapotraspira o viene smaltita dal reticolo superficiale. Per questo motivo queste aree sono state escluse dalla stima della precipitazione efficace alla ricarica della falda.

Il modello di infiltrazione

Per la stima dell'apporto meteorico efficace nell'area indicata è stato necessario utilizzare un modello di infiltrazione, ottenuto dall'accoppiamento di un modello di separazione dei deflussi (che utilizza l'approccio di Green-Ampt per separare

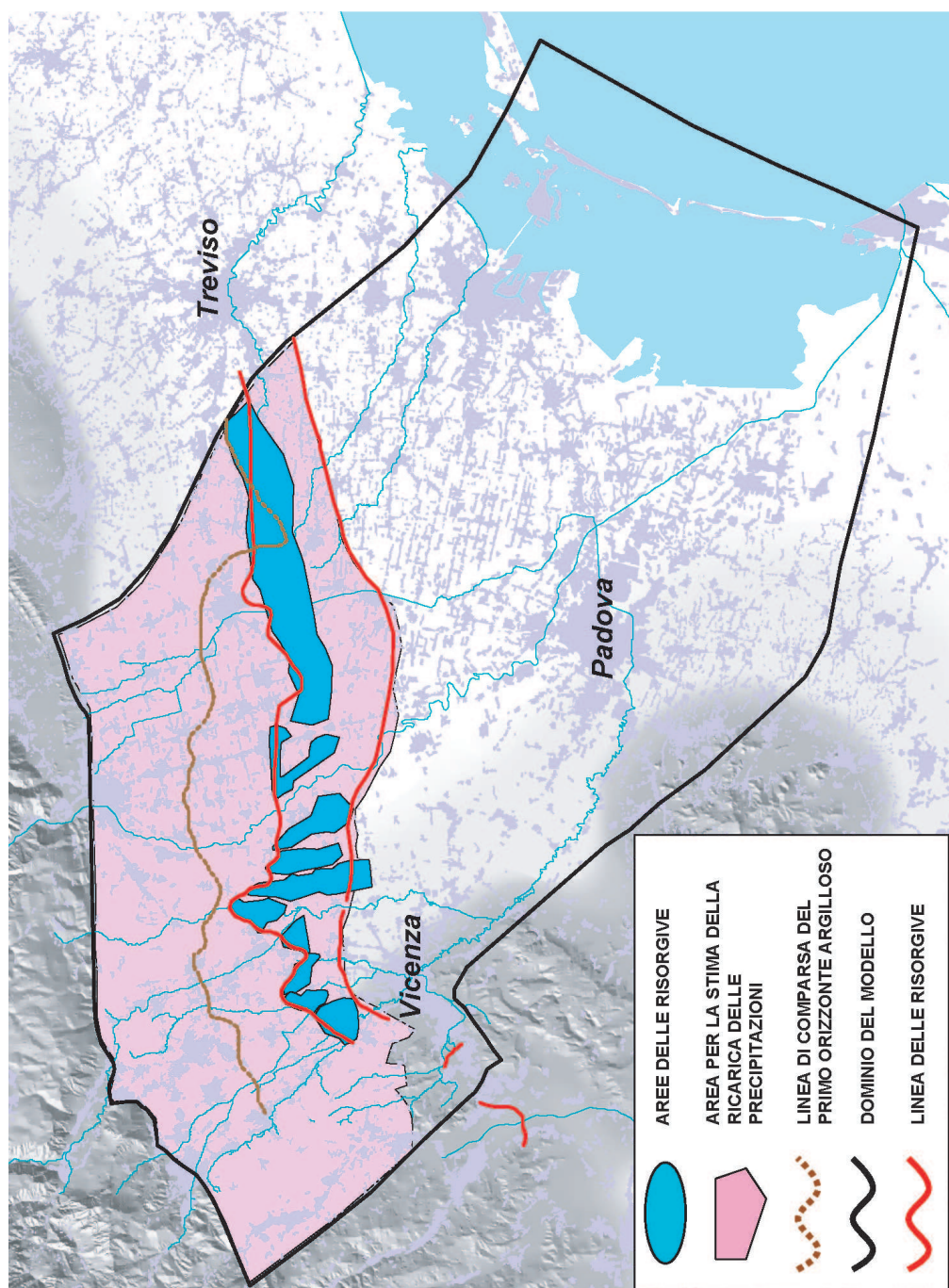


Figura 2.3: Area all'interno della quale è stato stimato l'apporto meteorico efficace alla ricarica della falda.

il deflusso superficiale dal contributo che effettivamente si infiltra e ricarica la falda) con un modello di evapotraspirazione (modello FAO Penman - Monteith) per l'aggiornamento del contenuto d'acqua nel terreno e per la valutazione dei volumi d'acqua che vengono sottratti al deflusso profondo. Dopo aver implementato il modello di evapotraspirazione (che fornisce i valori di evapotraspirazione giornaliera), occorre distinguere tra giorni piovosi e giorni non piovosi. Tale distinzione serve per discriminare l'esecuzione di due distinte procedure successive all'implementazione del modello di evapotraspirazione: una, da utilizzare nel caso di giorni piovosi, che mediante il metodo di Green-Ampt separa le precipitazioni (depurata dall'evapotraspirazione) ripartendola in deflusso superficiale e ipodermico; la seconda, da utilizzare nei giorni non piovosi, considera solamente l'azione dell'evaporazione nell'aggiornare il contenuto d'acqua del suolo per riprodurre correttamente le condizioni iniziali di un successivo evento.

L'applicazione del modello di infiltrazione (evapotraspirazione e separazione dei deflussi) necessita dei seguenti dati meteorologici in input:

- dati pluviometrici orari;
- dati meteorologici giornalieri (temperatura minima e massima giornaliera, umidità relativa dell'aria minima e massima giornaliera, velocità del vento misurata a 2 metri dal suolo e radiazione totale giornaliera nella stessa zona).

I dati pluviometrici orari e meteorologici giornalieri si riferiscono all'anno 2004 e derivano dalle 59 stazioni A.R.P.A.V. elencate in tabella 2.4.

I parametri necessari al modello di evapotraspirazione secondo il metodo della FAO sono:

- il contenuto d'acqua al punto di appassimento delle piante θ_{WP} ;
- la profondità massima alla quale l'acqua può essere estratta dal sottosuolo senza subire restrizioni eccetto che per l'energia disponibile, RAW [mm].

I parametri necessari al modello di separazione dei deflussi secondo il metodo di Green-Ampt sono:

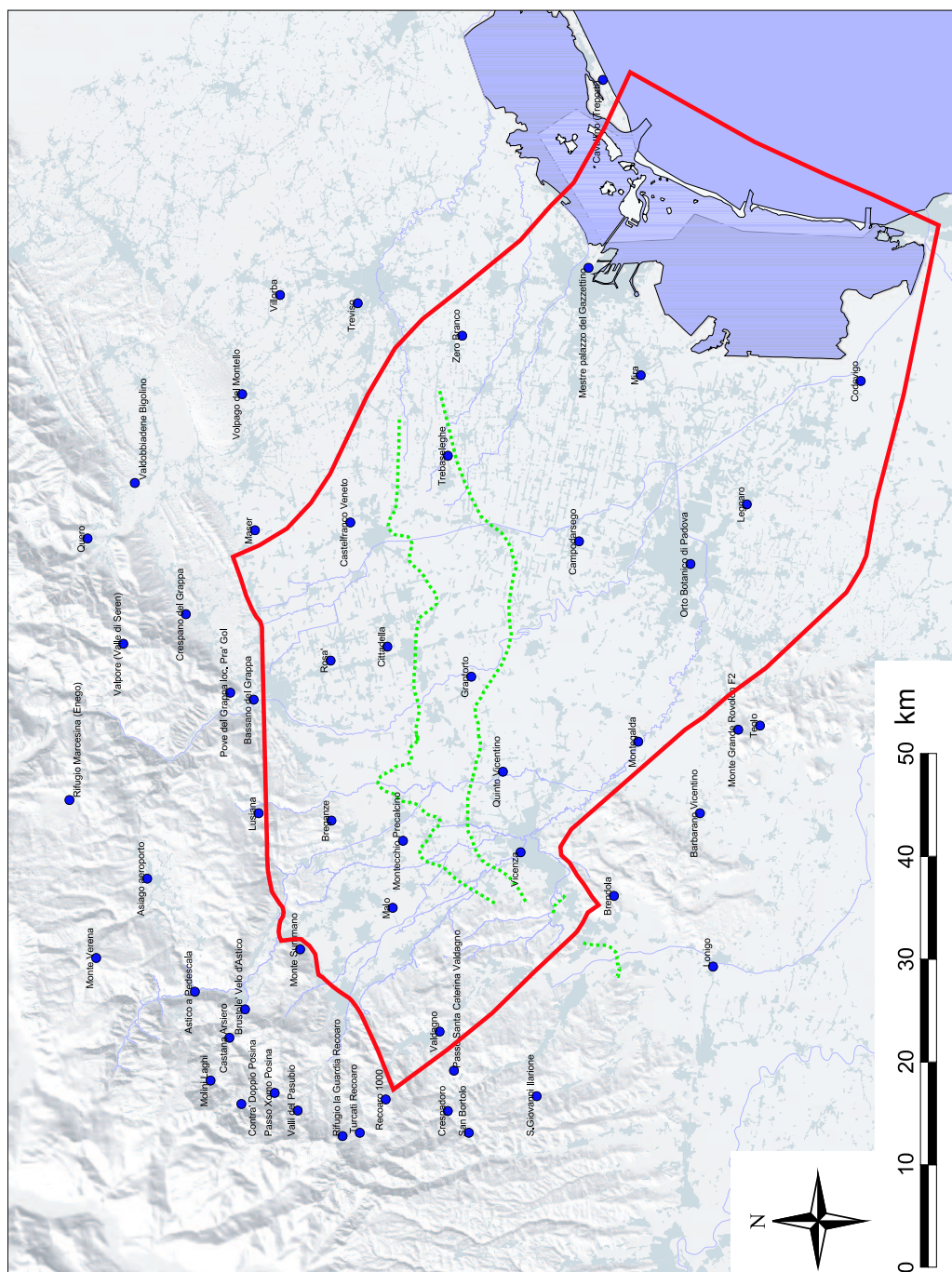


Figura 2.4: 59 stazioni di misura delle precipitazioni e dei dati metereologici appartenenti alla rete A.R.P.A.V..

Tabella 2.1: *Localizzazione delle stazioni pluviografiche sul territorio dell' Alto Vicentino.*

NOME STAZIONE	X Gauss B.	Y Gauss B.	PROVINCIA
Asiago aeroporto	1694869	5084184	VICENZA
Astico a Pedescala	1683840	5079537	VICENZA
Barbarano Vicentino	1701211	5030367	VICENZA
Bassano del Grappa	1712258	5073804	VICENZA
Breganze	1700519	5066236	VICENZA
Brendola	1693183	5038765	VICENZA
Brustole' Velo d'Astico	1682121	5074661	VICENZA
Campodarsego	1727668	5042147	PADOVA
Castana Arsiero	1679369	5076164	VICENZA
Castelfranco Veneto	1729544	5064403	TREVISIO
Cavallino (Treporti)	1772595	5039845	VENEZIA
Cittadella	1717437	5060795	PADOVA
Codevigo	1743297	5014716	PADOVA
Contra' Doppio Posina	1672938	5075022	VICENZA
Crespadoro	1672246	5054903	VICENZA
Crespano del Grappa	1720610	5080406	TREVISIO
Grantorto	1714504	5052654	PADOVA
Legnaro	1731296	5025799	PADOVA
Lonigo	1686304	5029116	VICENZA
Lusiana	1701210	5073345	VICENZA
Malo	1692000	5060290	VICENZA
Maser	1728768	5073708	TREVISIO
Mestre palazzo del Gazzettino	1754303	5041216	VENEZIA
Mira	1743864	5036132	VENEZIA
Molini Laghi	1675208	5078024	VICENZA
Monte Summano	1687964	5069297	VICENZA
Monte Verena	1687119	5089158	VICENZA
Montecchio Precalcino	1698530	5059290	VICENZA
Montegalda	1708173	5036371	VICENZA
Orto Botanico di Padova	1725465	5031295	PADOVA
Passo Santa Caterina Valdagno	1676151	5054310	VICENZA
Passo Xomo Posina	1674012	5071777	VICENZA
Pove del Grappa loc. Pra' Gol	1712940	5076113	VICENZA
Quero	1727948	5089994	BELLUNO
Quinto Vicentino	1705283	5049560	VICENZA
Recoaro 1000	1673358	5060979	VICENZA
Rifugio la Guardia Recoaro	1669793	5065149	VICENZA
Rifugio Marcesina (Enego)	1702486	5091759	VICENZA

NOME STAZIONE	X Gauss B.	Y Gauss B.	PROVINCIA
Rosa'	1716095	5066330	VICENZA
S.Giovanni Ilarione	1673701	5046287	VERONA
San Bortolo	1670129	5052884	VERONA
Teolo	1709767	5024532	PADOVA
Trebaseleghe	1736015	5054913	PADOVA
Treviso città	1750868	5063692	TREVISIO
Turcati Recoaro	1670107	5063499	VICENZA
Valdagno	1679980	5055700	VICENZA
Valdobbiadene Bigolino	1733368	5085364	TREVISIO
Valle Averno	1746123	5026591	VENEZIA
Valli del Pasubio	1672265	5069542	VICENZA
Valpore (Valle di Seren)	1717709	5086487	BELLUNO
Venezia (Ist.Cavanis)	1760365	5036127	VENEZIA
Vicenza (Città)	1697419	5047824	VICENZA
Villorba	1751649	5071267	TREVISIO
Volpago del Montello	1742000	5074920	TREVISIO
Zero Branco	1747685	5053500	TREVISIO

- la conduttività (o conducibilità) idraulica K_{hsat} [mm/h];
- la porosità ϕ ;
- l'altezza piezometrica Ψ_f [mm];
- il contenuto d'acqua iniziale del suolo θ_0 (assunto costante);
- lo spessore dello strato collaborante ΔZ [mm];
- la capacità di campo θ_{FC} ;
- la frazione di acqua immagazzinata nel terreno che viene restituita sotto forma di deflusso sub-superficiale, η .

La porosità, l'altezza piezometrica, lo spessore dello strato collaborante, la capacità di campo, la frazione d'acqua immagazzinata nel terreno che viene restituita come deflusso sub-superficiale, il contenuto d'acqua al punto di appassimento delle piante e RAW dipendono, in primo luogo, dalla classe di tessitura del

terreno, mentre la conducibilità idraulica di un terreno può variare in modo significativo, a parità di caratteristiche pedologiche, in funzione dell'uso del suolo. Per semplicità, è stato quindi assunto che l'uso del suolo influenzi unicamente la conducibilità idraulica K_{hsat} e che gli altri parametri dipendano dalla sola pedologia.

L'informazione pedologica è stata ricavata dalla Carta dei Suoli della Regione Veneto a partire dalla quale l'area di studio (in particolare l'area su cui è stato stimato il contributo delle precipitazioni alla ricarica della falda) è stata suddivisa in 3 zone omogenee dal punto di vista geo-pedologico. Si sono così individuate 3 classi geo-pedologiche corrispondenti a 3 classi di tessitura dei terreni:

- montagna, caratterizzata da terreni di natura sabbiosa-limosa;
- area della pianura a nord delle risorgive, con materiali ghiaiosi-sabbiosi tipici del materasso alluvionale;
- area delle risorgive, con terreni limosi.

Utilizzando le tecniche di telerilevamento si sono create 3 mappe di uso del suolo della zona di interesse a partire da immagini Landsat acquisite nel 1987, nel 2001 e nel 2002 (figure 2.6 e 2.7). Dopo aver verificato che le immagini da satellite fossero corrette radiometricamente e georeferenziate, sono state classificate basandosi su mappe d'uso del suolo disponibili relative agli stessi anni. Le classi di uso del suolo scelte, in base alla precisione dell'immagine, sono:

1. **Acqua** comprendente gli specchi e i corsi d'acqua presenti all'interno del bacino;
2. **Bosco** senza distinzione tra conifere e latifoglie;
3. **Superfici Impermeabili** che comprende rocce, suolo nudo ed edificato;
4. **Ghiaia** situata per lo più lungo il greto dei fiumi;
5. **Prato** comprendente le zone di verde non destinate alla produzione agricola;

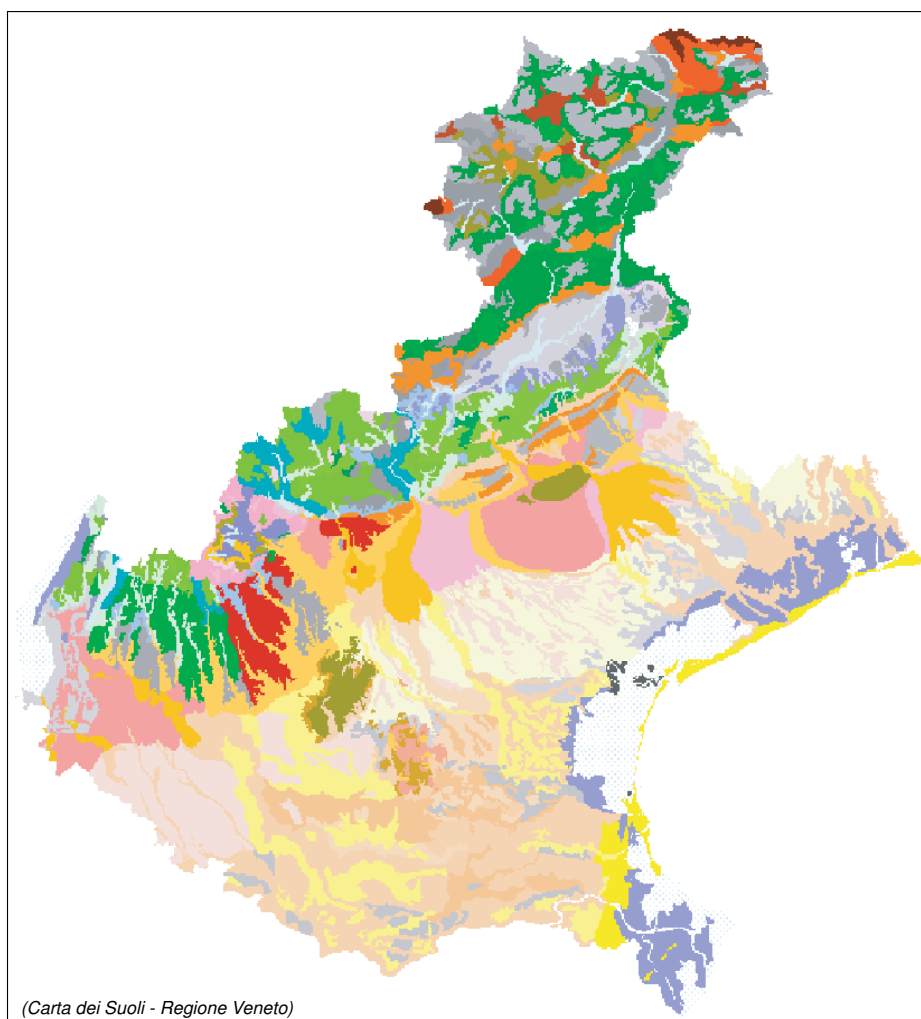


Figura 2.5: *Carta dei Suoli della Regione Veneto*

6. **Terreni Agricoli** senza distinzioni tra i vari tipi.

7. **Nuvole** se presenti, in percentuale elevata, nell'immagine.

Le 7 classi sono state in seguito raggruppate in 4 nuove classi:

- superficie impermeabile;
- bosco;
- terreni agricoli;
- prato/pascolo (comprendente le classi acqua, ghiaia, prato).

Dal confronto delle carte dell'uso del suolo relative agli anni 1987 e 2002 si evidenzia un incremento delle superfici impermeabili del 20% nell'area dell'Alto Vicentino.

Individuate le 3 classi pedologiche e le 4 classi di uso del suolo e assegnati i valori ai parametri dei 2 modelli, è stato possibile implementare il modello accoppiato di infiltrazione. Dall'analisi dei risultati dell'implementazione del modello a partire dai valori di precipitazione relativi all'anno 2002, si può notare che gli eventi piovosi più lunghi e regolari danno luogo a ricariche maggiori rispetto agli eventi brevi ed intensi. Inoltre, si è osservato che, a parità di precipitazione, l'infiltrazione e, conseguentemente, la ricarica alla falda sono diminuite dal 1987 al 2002: tale particolarità è imputata al cambiamento di uso del suolo, in particolare all'impermeabilizzazione dei terreni.

In Tabella 2.2 si riporta un riassunto dei valori dei parametri finora trattati riferiti alle tre macroaree considerate.

Calcolo del contributo delle precipitazioni alla ricarica della falda

Come precedentemente esposto, il modello matematico di flusso è stato implementato e tarato facendo riferimento all'anno 2004. Il modello di infiltrazione è stato utilizzato per ricavare la distribuzione spaziale della portata media annua del contributo delle precipitazioni alla ricarica della falda, stimata in circa



Figura 2.6: Immagine acquisita dal satellite Landsat 7 (2001), rappresentazione a colori quasi naturali della zona scelta per la stima del contributo delle precipitazioni alla ricarica della falda.

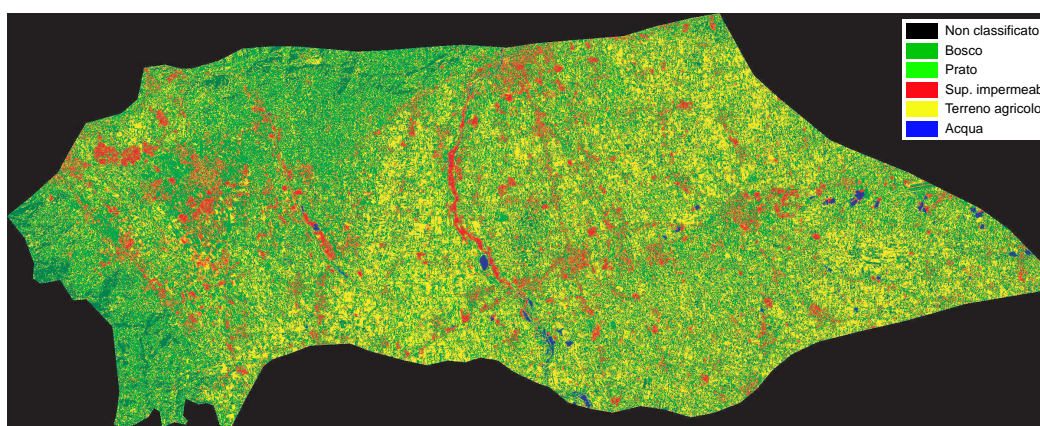


Figura 2.7: Classificazione dell'immagine satellitare, carta di uso del suolo (2001).

Zona (classe pedologica)	k_{hsat} [mm/s]	ϕ [%]	Ψ_f [mm]	θ_0	ΔZ [m]	θ_{FC}	η [%]	θ_{WP}	RAW [mm]
Montagna	0.003	0.45	150	0.2	0.3	0.22	0.8	0.15	8.0
Nord risorgive	0.002	0.48	69	0.2	0.75	0.17	0.4	0.1	6.0
Risorgive	0.0008	0.41	304	0.2	0.75	0.2	0.6	0.14	7.0

Tabella 2.2: *Parametri fondamentali del modello .*

$14m^3/s$ (portata media annua). Nota la distribuzione spaziale della pioggia efficace alla ricarica, è stato possibile assegnare i valori di tale contributo ai nodi superficiali della griglia di calcolo. E' evidente che tale contributo è non nullo solamente in corrispondenza dei nodi superficiali appartenenti all'area che contribuisce alla ricarica della falda, compresa tra i rilievi e la linea inferiore delle risorgive, cioè la linea di comparsa delle risorgive in condizioni di magra.

2.2.2 Dispersione dei corsi d'acqua naturali

Dei diversi contributi alla ricarica della falda quello della dispersione dall'alveo dei corsi d'acqua naturali, favorito dalla natura ghiaiosa del materasso alluvionale, è il più significativo. Si ha dispersione in alveo quando il pelo libero del corso d'acqua è ad una quota superiore rispetto al livello freatico; in caso contrario, sarà l'acquifero ad alimentare il corso d'acqua. Il fenomeno è schematizzato in figura 2.8.

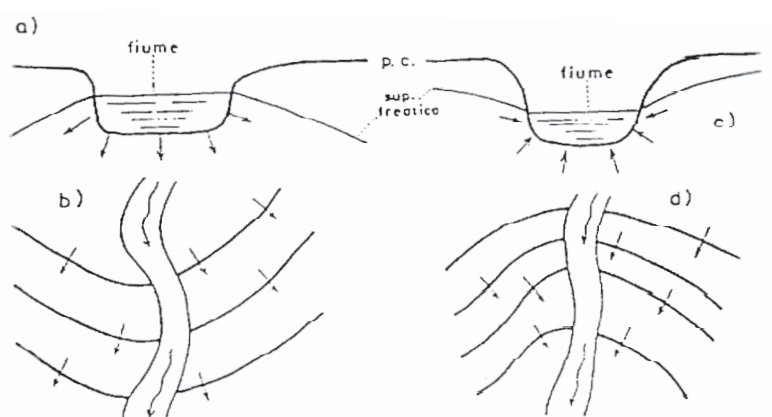


Figura 2.8: Schematizzazione del fenomeno: a) pelo libero superiore al livello di falda, b) dispersione in falda, c) pelo libero inferiore al livello di falda, d) drenaggio della falda.

L'evoluzione spazio-temporale della superficie freaticometrica è determinata dal regime dei diversi contributi di alimentazione (o ricarica) della falda stessa. Come già evidenziato, le portate disperse dai corsi d'acqua rappresentano il principale contributo alla ricarica della falda [1]; di conseguenza il regime della falda freatica è del tutto simile a quello dei fiumi disperdenti alimentatori e, quindi, al regime delle precipitazioni.

Negli ultimi decenni, la percepita e in parte dimostrata diminuzione delle precipitazioni e delle portate medie mensili dei fiumi, è causa, assieme all'impermeabilizzazione degli alvei, di una diminuzione delle portate disperse in falda valutabile in $0,8 - 1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ tra il 1980 e il 1998 [1].

Il regime dei principali corsi d'acqua dell'alta pianura vicentina (Brenta e Astico), è di tipo prealpino, caratterizzato quindi da una prolungata fase di piena primaverile e una seconda fase di piena autunnale, più breve, ma spesso con massimi più elevati. Di riflesso, anche il regime della falda freatica è caratterizzato normalmente da due fasi di piena, una primaverile ed una autunnale, e due fasi di magra, estiva e invernale, in ritardo di circa un mese rispetto al regime fluviale.

Le oscillazioni freatiche sono quindi condizionate dalla variabilità spaziale e temporale del processo di dispersione-ricarica dovuto ai corsi d'acqua naturali. Il processo di dispersione in falda ha inizio allo sbocco in pianura delle valli montane e prosegue per 13–15 *km* sia per il sistema Leogra-Timonchio (tratto disperdente dallo sbocco in pianura delle valli montane fino al sistema delle risorgive) che per il Brenta (tratto disperdente tra Bassano e Friola, tratto drenante tra Friola e Carturo). Il comportamento del torrente Astico è invece caratterizzato da 2 tratti disperdenti: il primo, tra Rocchette e Caltrano, lungo circa 4 *km*, il secondo, tra Sarcedo e Passo di Riva, lungo 6 – 7 *km*. Tra Caltrano e Sarcedo il comportamento è variabile (figura 2.10) [1].

Per la stima della portata media annua dispersa in falda da parte dei corsi d'acqua naturali, si sono stati considerati i tre principali corsi d'acqua (Leogra-Timonchio, Astico e Brenta) che costituiscono circa il 94% del contributo totale delle dispersioni dei fiumi [1]. Sono stati trascurati i contributi dei sistemi minori: il sistema Giara-Orolo, il torrente Igna, il sistema Chiavone-Laverda e il sistema Valderio-Marcoalda.

Le campagne di misure idrometriche condotte dal settembre 1979 al gennaio 1981 dall'A.I.M. di Vicenza [1], hanno permesso di raccogliere una grande quantità di dati relativi alle portate disperse in falda dai principali corsi d'acqua. La stima di questo contributo avviene per differenza tra i valori di portata misurata all'ingresso del corso d'acqua in pianura (o all'inizio di un tratto notoriamente disperdente) e la portata misurata all'altezza del limite settentrionale della fascia delle risorgive (o al termine del tratto disperdente). I numerosi dati raccolti hanno permesso di costruire importanti curve di correlazione tra le portate affluenti (in ingresso al tratto disperdente) e portate disperse in falda. Analogamente,

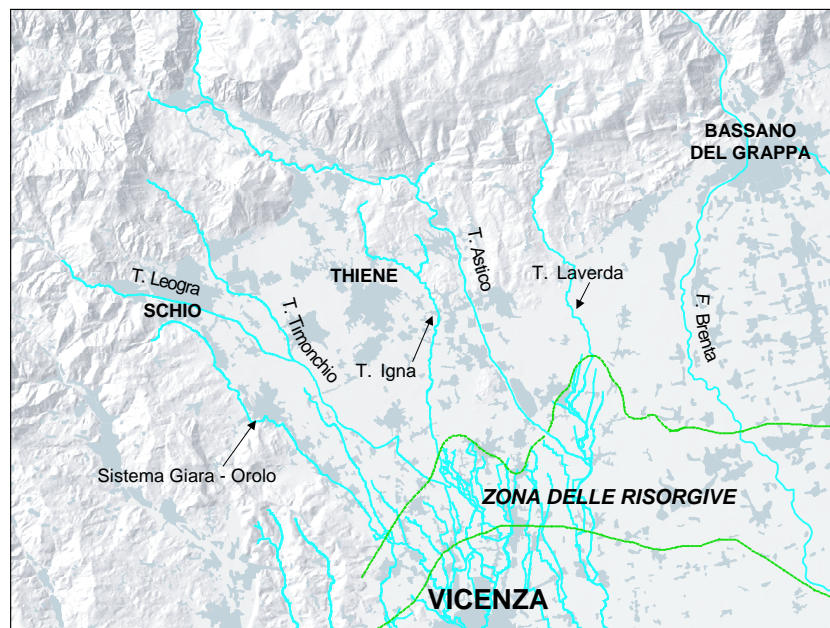


Figura 2.9: *Idrografia generale della zona oggetto di studio.*

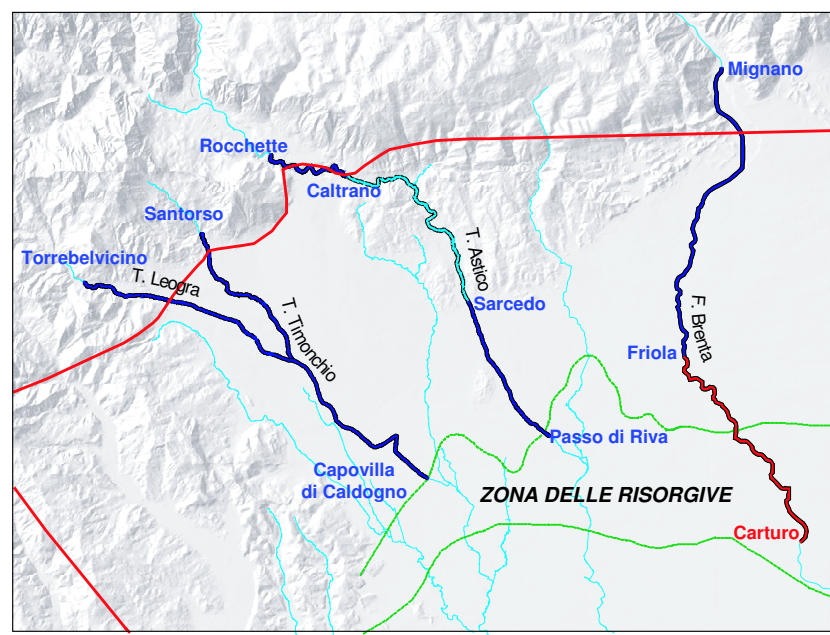


Figura 2.10: *Principali sistemi idrografici: Leogra-Timonchio, Astico e Brenta (in blu sono evidenziati i tratti disperdenti, in rosso i tratti drenanti).*

la differenza tra i valori di portata misurata all'inizio di un tratto drenante e la portata misurata al termine del tratto drenante, fornisce una stima della portata drenata dal corso d'acqua.

Le curve di correlazione tra portate affluenti (in ingresso) e portate disperse in falda ricavate dalle campagne condotte da A.I.M. Vicenza, sono state utilizzate, assieme ai valori di portata affluente misurati nell'anno 2004, nel corrente lavoro di ricerca. I 3 corsi d'acqua principali sono stati discretizzati in una successione di nodi appartenenti alla mesh di calcolo superficiale. Ad ogni nodo del corso d'acqua è stato assegnato un valore di portata media annua (2004) dispersa o drenata.

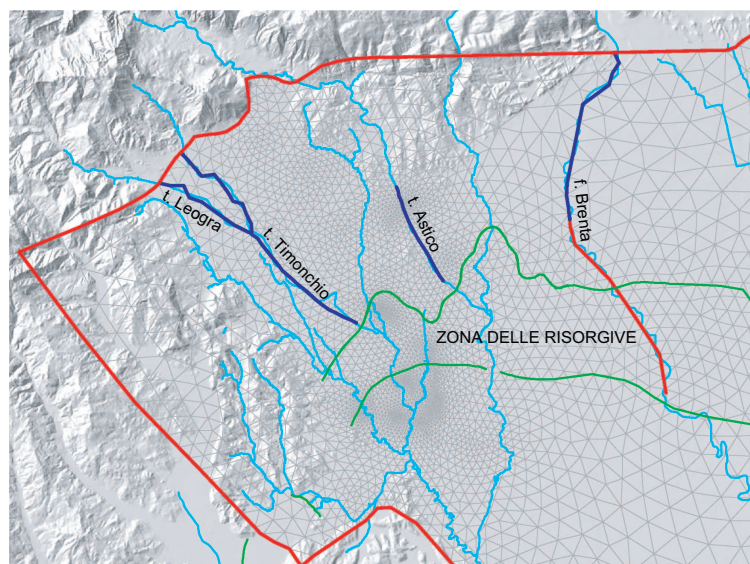


Figura 2.11: Schematizzazione dei corsi d'acqua naturali attraverso la mesh di calcolo.

Sistema idrografico Leogra-Timonchio

Il sistema è costituito dai torrenti Leogra e Timonchio che confluiscono, all'altezza dei comuni di Malo e Marano, in un unico corso d'acqua che conserva il

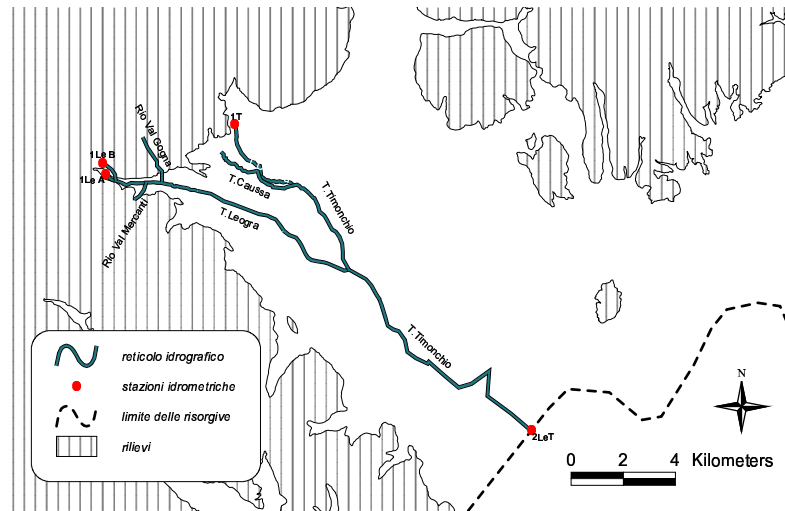


Figura 2.12: *Schema idrografico del sistema Leogra-Timonchio*

nome di Timonchio. Allo sbocco in pianura, il t. Leogra è interessato da una derivazione a scopo idroelettrico, misurata nella stazione 1Le-B, che viene restituita immediatamente a valle della stazione di misura sul t. Leogra 1Le-A (figura 2.12). Per ottenere le portate totali in ingresso al sistema, si sono sommate le portate misurate nella stazione 1Le-A (sul torrente Leogra), nella stazione 1Le-B (derivazione-restituzione idroelettrica), nella stazione 1T sul t. Timonchio e i contributi dei corsi di minore importanza quali il Rio Val Gogna, il t. Causa e il Rio Val Mercanti.

Il tratto disperdente del sistema si estende fino al limite superiore delle risorgive, in corrispondenza del quale sono state misurate le portate residue (stazione 2LeT a Capovilla di Caldogeno).

Le campagne di misura condotte a cavallo tra gli anni '70 e '80 nelle 6 stazioni di monte (portate in ingresso al tratto disperdente) e nella stazione 2LeT di valle (portate in uscita dal tratto disperdente), hanno permesso di tracciare la curva delle dispersioni del sistema Leogra-Timonchio (figura 2.13) che lega le portate complessive affluenti in ingresso alle portate disperse dal sistema lungo l'intero tratto disperdente.

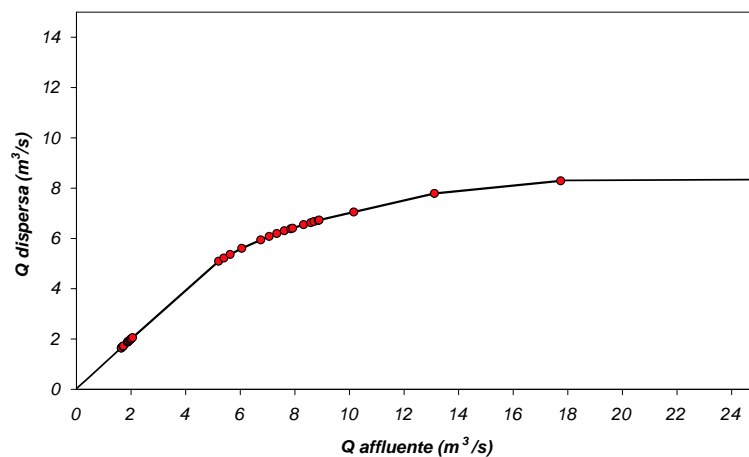


Figura 2.13: *Sistema Leogra-Timonchio. Correlazione tra la portata affluente e la portata dispersa nel mese di marzo 1980 [1].*

Dall'analisi della curva di dispersione, si nota che le portate disperse rimangono costanti per portate complessive in ingresso superiori ai $25 \text{ m}^3/\text{s}$. Per portate inferiori ai $4 \text{ m}^3/\text{s}$, tutta l'acqua in ingresso al sistema viene assorbita e dispersa in falda; per portate comprese tra 5 e $25 \text{ m}^3/\text{s}$ le dispersioni variano proporzionalmente tra 5 e $8 \text{ m}^3/\text{s}$; per portate affluenti superiori a $22 \text{ m}^3/\text{s}$ le dispersioni si stabilizzano sugli $8 \div 9 \text{ m}^3/\text{s}$.

Va però ricordato che in occasione di piene elevate si possono riscontrare nella sezione di valle portate superiori a quelle registrate nella sezione di monte: questo è dovuto in parte ai contributi straordinari provenienti dal ruscellamento superficiale, in parte alla trasformazione da disperdente a drenante di un breve tratto appena a monte della sezione di valle, dovuta all'improvviso innalzamento della falda ricaricata dalle abbondanti precipitazioni. Nelle operazioni di stima della portata media annua dispersa in falda dal sistema, tale fenomeno può essere tuttavia trascurato considerato sia che l'estensione dell'intervallo temporale di interesse (anno) è nettamente superiore alla durata del fenomeno, sia che le portate disperse rimangono costanti per portate in ingresso superiori a $22 \text{ m}^3/\text{s}$.

Nel caso del sistema Leogra-Timonchio, nel mese di Marzo 2006, è stata

condotta una nuova campagna di misura delle portate in ingresso ed in uscita dal sistema al fine di validare, ed eventualmente aggiornare, la curva di correlazione tra portate affluenti e portate disperse [21]. La portata in ingresso relativa alla campagna condotta nel Marzo 2006 ($4,33 \text{ m}^3/\text{s}$) viene totalmente dispersa in falda dal sistema (portata dispersa $4,19 \text{ m}^3/\text{s}$): tale risultato è in accordo con la curva di dispersione ricavata dalle campagne degli anni '80.

Per l'operazione di stima delle portate medie annue disperse dal sistema Leogra-Timonchio da assegnare ai nodi della mesh si è seguita la seguente procedura:

- individuazione dei nodi superficiali della mesh che schematizzano il sistema e suddivisione in 3 gruppi: nodi Leogra prima della confluenza, nodi Timonchio prima della confluenza, nodi Timonchio dopo la confluenza;
- individuazione della curva di correlazione tra le portate misurate nella stazione 1Le-A e le portate totali affluenti (1Le-A, 1Le-B, Rio Val Gogna, t. Causa e Rio Val Mercantia) a partire dai dati misurati nel marzo 1980 (portate espresse in m^3/s);

$$Q_{\text{AFFLUENTI}} = 1.2372 \cdot Q_{\text{LEOGRA}} + 1.8728 \quad (2.1)$$

- generazione delle portate affluenti totali giornaliere a partire dai dati orari registrati nella stazione 1Le-A nel 2004 (utilizzando la relazione 2.1 individuata dalla campagna del marzo 1980);
- calcolo della portata in ingresso al t. Leogra e della portata in ingresso al t. Timonchio (portata affluente t. Leogra 83% della portata affluente totale, portata affluente t. Timonchio 14% della portata affluente totale; le percentuali sono state scelte proporzionali all'area del bacino afferente);
- calcolo del coefficiente di dispersione (CD) del sistema [$\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{km}$] (rapporto tra portate totali disperse e lunghezza totale del tratto disperdente) dai dati giornalieri relativi alla campagna di marzo 2008;

- determinazione della curva di correlazione tra le portate in ingresso al torrente Leogra Q_{LEOGRA} e il coefficiente di dispersione CD (dai dati giornalieri relativi alla campagna di marzo 2008);
- calcolo del coefficiente di dispersione di ogni singolo tratto i (segmento nodo - nodo) del Leogra utilizzando la curva di correlazione tra Q_{LEOGRA} e CD e stima della portata dispersa dal singolo tratto:

$$Q_{i,DISPERSA} = CD \cdot lunghezza_i \quad (2.2)$$

La portata in ingresso al tratto i è pari alla portata in ingresso al tratto precedente depurata della portata dispersa dal tratto precedente. Le relazioni che legano $Q_{i,LEOGRA}$ e CD sono:

1. se $Q_{i,LEOGRA} < 2,4 \text{ m}^3/s$:

$$CD = 0,177 \quad (2.3)$$

2. se $2,4 \text{ m}^3/s < Q_{i,LEOGRA} < 14 \text{ m}^3/s$:

$$\begin{aligned} CD = & 0,000139 \cdot Q_{i,LEOGRA}^3 + 0,04067 \cdot Q_{i,LEOGRA}^2 \\ & + 0,044191 \cdot Q_{i,LEOGRA} + 0,092218 \end{aligned} \quad (2.4)$$

3. se $Q_{i,LEOGRA} > 14 \text{ m}^3/s$:

$$CD = 0,3 \quad (2.5)$$

Analoga procedura è stata seguita per il Timonchio prima della confluenza e dopo la confluenza, in quest'ultimo caso le portate residue del Leogra e del Timonchio prima della confluenza sono state sommate tra di loro per ottenere la portata in ingresso al Timonchio dopo la confluenza. La portata dispersa dal tratto i è stata assegnata al nodo terminale del tratto stesso.

Le portate medie annue 2004 disperse stimate attraverso questa procedura sono:

- Leogra prima della confluenza: $1,31 \text{ m}^3/\text{s}$ in $6,95 \text{ km}$;
- Timonchio prima della confluenza: $0,61 \text{ m}^3/\text{s}$ in $7,56 \text{ km}$;
- Timonchio dopo la confluenza: $1,17 \text{ m}^3/\text{s}$ in $8,87 \text{ km}$;

per un totale di $3,09 \text{ m}^3/\text{s}$ in $23,38 \text{ km}$ e coefficiente di dispersione medio lungo l'intero tratto di $0,132 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}$. Si sottolinea che i valori stimati di portata dispersa si riferiscono solamente alle porzioni del Leogra e del Timonchio interni all'area del dominio del modello e non all'intero tratto disperdente.

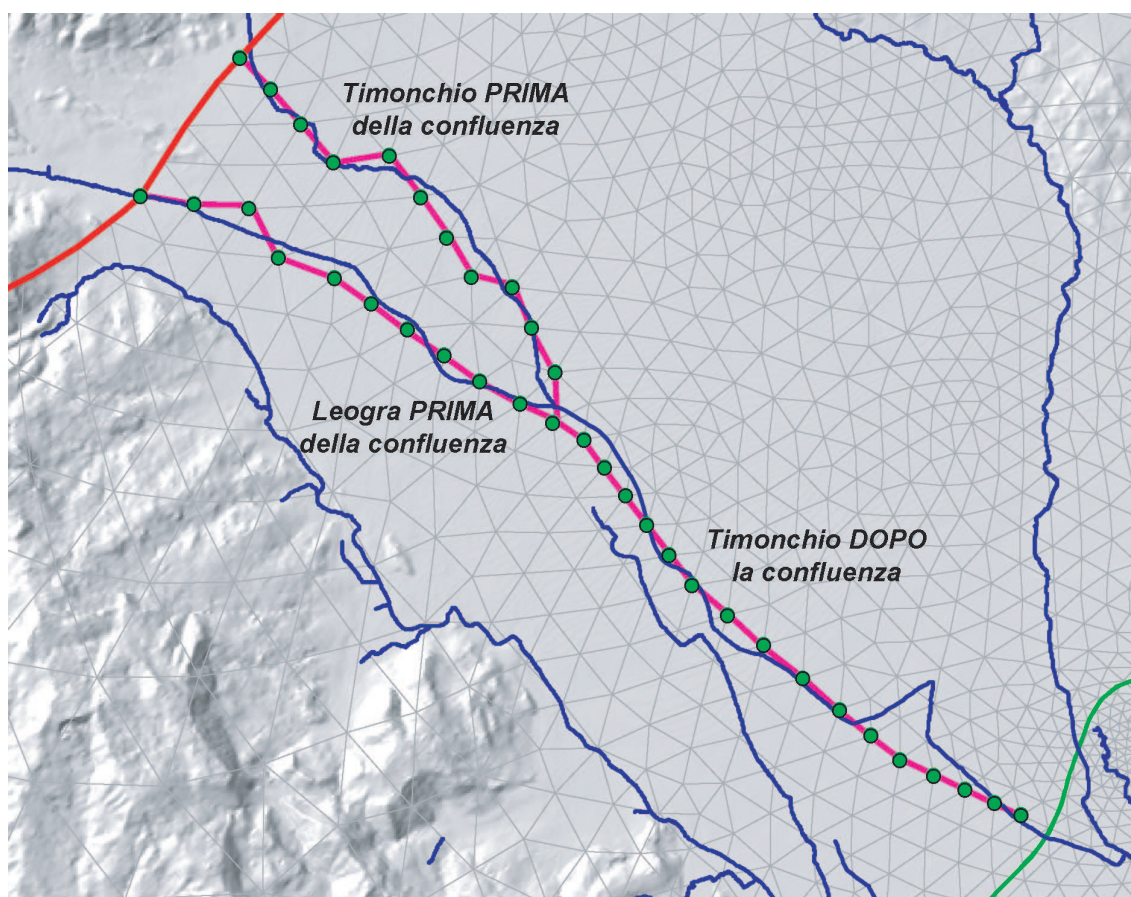


Figura 2.14: Sistema Leogra-Timonchio: schematizzazione in tratti disperdenti e nodi a cui assegnare le portate disperse.

Sistema idrografico Astico

Il sistema dell'Astico viene preso in considerazione all'interno del presente studio a partire da poco a monte dello sbarramento di Meda a Piovene Rocchette (sezione 1A1), dove si trova l'opera di derivazione della centrale di Bessè, appartenente alla ditta *Eusebio energia S.p.a.*, che scarica successivamente nelle vicinanze di Caltrano (figura 2.15). Subito a valle di questa prima restituzione, in prossimità del ponte vecchio di Caltrano, è situata una seconda opera di derivazione della *Centrale Idroelettrica Veneta* che, attraverso un canale a pelo libero situato a fianco del torrente, porta acqua ad alcune centrali, per poi restituire la portata derivata a Calvene. In destra orografica del torrente, a Molini di Zugliano (indicato con Mo nella figura 2.15), si trova la derivazione del Canale Mordini del Consorzio di Bonifica Medio Astico, monitorato a cadenza giornaliera dal Centro Idrico di Novoledo. Parte della portata derivata viene restituita immediatamente a monte del ponte di Sarcedo (indicato con s10 nella figura 2.15). Questo canale alimenta un articolato sistema di canali irrigui che interessa tutta la pianura in prossimità del corso d'acqua. Nel tratto terminale del torrente, a partire dal ponte di Breganze fino a Lupia di Sandrigo, si susseguono una serie di briglie utilizzate in passato come sezioni per le campagne di misura delle portate.

Il torrente Astico, in relazione agli scambi con la falda, viene così suddiviso [1] (figura 2.15):

- tratto Rocchette-Caltrano (1A1-1A2): disperdente;
- tratto Caltrano-Sarcedo (1A2-s10): parzialmente drenante;
- tratto Sarcedo-Passo di Riva (s10-2A): disperdente;
- tratto Passo di Riva-Lupia (2A-3A): drenante (trascurabile).

Il tratto dell'Astico tra Rocchette e Caltrano, con il suo carattere fortemente disperdente in falda, alimenta una significativa direttrice di deflusso sotterraneo (dovuta alla presenza di un paleoalveo del torrente Astico) che ricarica anche le

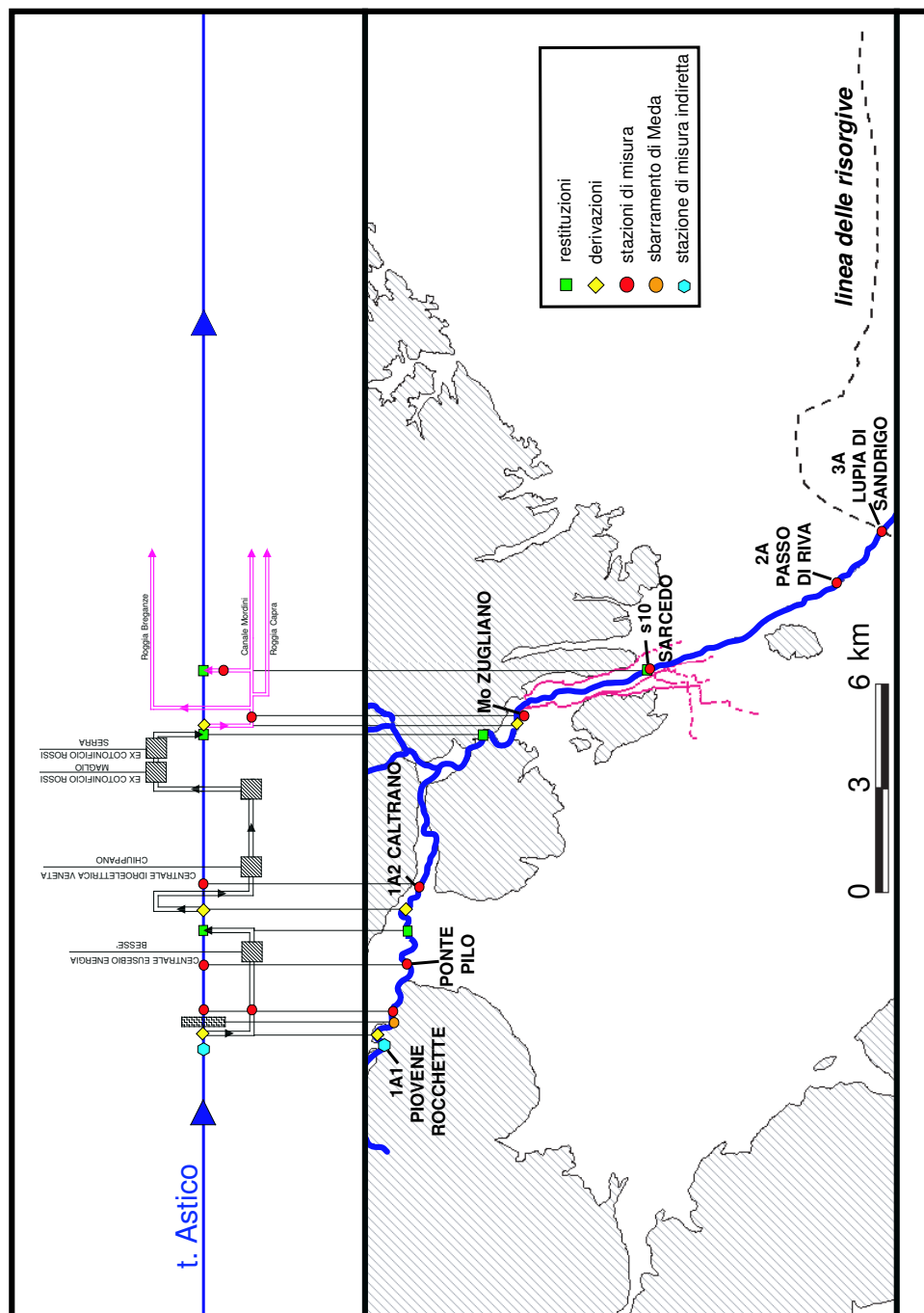


Figura 2.15: Derivazioni, restituzioni e stazioni di misura del sistema idrografico Astico.

falde artesiane più profonde del sistema multistrato presente a nord di Vicenza [1].

Utilizzando una procedura analoga a quella illustrata per il sistema Leogra-Timonchio, si sono stimate le portate medie annue 2004 disperse dai tratti disperdenti Rocchette-Caltrano (1A1-1A2) e Sarcedo-Passo di Riva (s10-2A); il comportamento variabile del tratto Caltrano-Sarcedo ha permesso di trascurare questo contributo. Anche questo sistema idrografico è stato schematizzato in una serie di segmenti e nodi ai quali sono state attribuite le portate medie annue disperse in falda.

La stima delle portate è avvenuta utilizzando le informazioni raccolte nel corso delle campagne condotte da A.I.M. negli anni '80. La curva di correlazione di figura 2.16 [1] è stata elaborata utilizzando le informazioni relative al solo tratto Rocchette-Caltrano (1A1-1A2). La portata in ingresso (sezione 1A1, localizzata appena a monte dello sbarramento di Meda, ossia prima della derivazione della Centrale) è stata ottenuta in via indiretta sommando le portate derivate e le portate sfiorate.

L'andamento anomalo della curva di correlazione deriva proprio dalla presenza presso la centrale idroelettrica di Bessè dello sfioratore di troppo pieno che si attiva per portate superiori ai $10,6 \text{ m}^3/\text{s}$: per valori di portata nella sezione 1A1 inferiori o al limite uguali a $10,6 \text{ m}^3/\text{s}$, tutta l'acqua viene derivata dalla Centrale di Bessè e in seguito restituita più a valle. In questo caso le dispersioni non superano mediamente il valore di $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$ e sono da imputare al solo tratto Bessè-Caltrano, lungo 1 km , a valle della restituzione.

Per portate in ingresso maggiori di $10,6 \text{ m}^3/\text{s}$ le dispersioni crescono rapidamente al crescere della portata affluente, arrivando a $3,6 \text{ m}^3/\text{s}$ dispersi in falda corrispondenti alla portata in ingresso di $19,5 \text{ m}^3/\text{s}$: infatti, le portate derivate dalla centrale raggiungono il valore massimo di $10,6 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre la portata residua rimane in alveo. In questo caso, l'intero tratto Piovene-Caltrano contribuisce a ricaricare la falda.

Utilizzando la curva di correlazione 2.16 e reperiti i valori giornalieri (anno 2004) di portata residua dell'Astico a Ponte Pilo (cioè le portate residue nel tratto

by-passato dalla derivazione) si è stimata la portata dispersa in falda nel tratto, lungo circa 3 km, che va dalla sezione 1A1 fino alla restituzione della centrale di Bessè (esclusa). La stessa curva di correlazione è stata utilizzata per stimare le portate disperse nel tratto Bessè-1A2: in questo caso alle portate residue in alveo misurate a Ponte Pilo si sono sommate le portate giornaliere derivate e restituite dalla Centrale di Bessè.

La portata media annua 2004 dispersa dal tratto Rocchette - Caltrano (1A1-1A2) è pari a $1,36 \text{ m}^3/\text{s}$ in circa 4 km e coefficiente di dispersione medio di $0,34 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}$. Si evidenzia che questo valore di portata di ricarica della falda non viene implementata all'interno del modello matematico di flusso in quanto collocata non internamente al dominio, ma sul confine dello stesso.

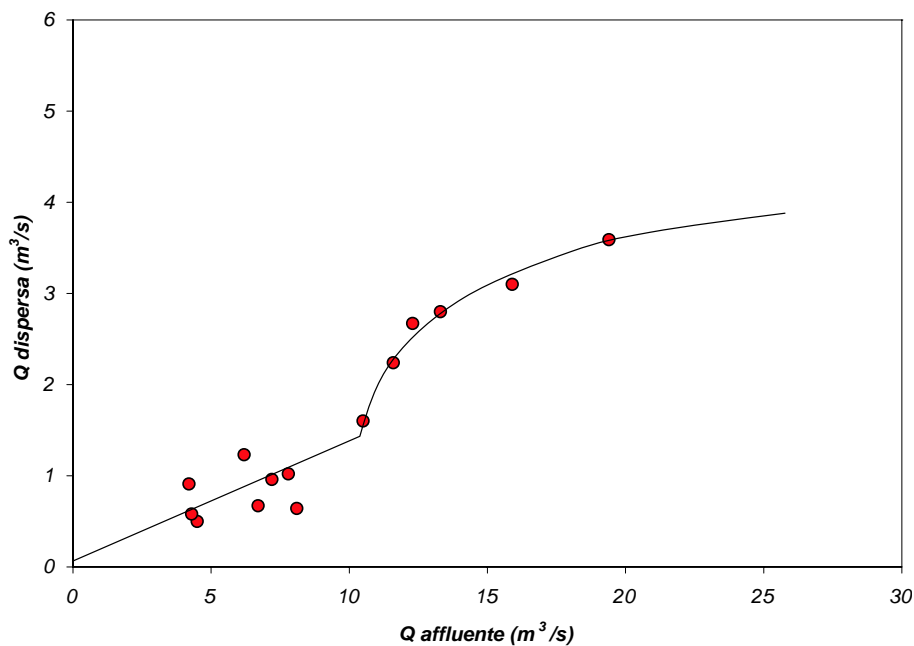


Figura 2.16: *Torrente Astico. Correlazione tra la portata affluente e la portata dispersa nel tratto Rocchette - Caltrano (1A1-1A2) [1].*

Non avendo informazioni dettagliate relative alla dispersione del tratto Sarcedo-Passo di Riva, si è assunto che la capacità disperdente fosse la stessa del tratto Rocchette - Caltrano. Le portate in ingresso al secondo tratto sono state ot-

tenute dalla differenza tra le portate residue nella sezione 1A2 (sezione finale del 1° tratto disperdente) e le portate derivate dal canal Mordini.

La portata media annua 2004 dispersa dal tratto Sarcedo - Passo di Riva (s10-2A) è pari a $3,49 \text{ m}^3/\text{s}$ in $6,7 \text{ km}$ e coefficiente di dispersione medio di $0,52 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}$.

La portata media annua 2004 dispersa dal sistema Astico è pari a $4,85 \text{ m}^3/\text{s}$ in $10,7 \text{ km}$ e coefficiente di dispersione medio di $0,45 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}$.

Sistema idrografico Brenta

Il sistema idrografico del Brenta risulta molto complesso per la presenza di una derivazione idroelettrica con relativa restituzione, di quattro derivazioni a scopo irriguo e di sette scarichi di troppo pieno che reimmettono le acque derivate per l'irrigazione nell'asta principale. Il sistema è ulteriormente complicato dal comportamento del fiume Brenta che, nel tratto tra Mignano e Friola, disperde una notevole parte della sua portata, mentre nel tratto Friola - Carturo drena dalla falda una portata superiore a quella dispersa nel tratto precedente. Per questo motivo, non considerando i contributi delle acque irrigue, l'apporto del fiume agli acquiferi risulta negativo. La figura 2.17 deriva dalle campagne degli anni '79 - '80 e mostra la correlazione tra le portate misurate a Ca' Barzizza (Mignano) e le portate disperse nel tratto Ca' Barzizza - Friola.

A differenza di quanto operato nei casi precedenti (sistema Leogra-Timonchio e sistema Astico), nel caso del Brenta non è possibile trascurare le portate drenate dal fiume nel tratto a valle di Friola.

Per il calcolo dei valori di dispersioni da imporre ai nodi della mesh che schematizzano il fiume Brenta sono state utilizzate le portate medie giornaliere (anno 2004) del Brenta a Mignano (fornite dal Consorzio Pedemontano Brenta) e la curva di correlazione di figura 2.17.

Ricavata la portata media annua dispersa dall'intero tratto disperdente, si è ricavata la portata dispersa dalla sola porzione disperdente interna all'area del

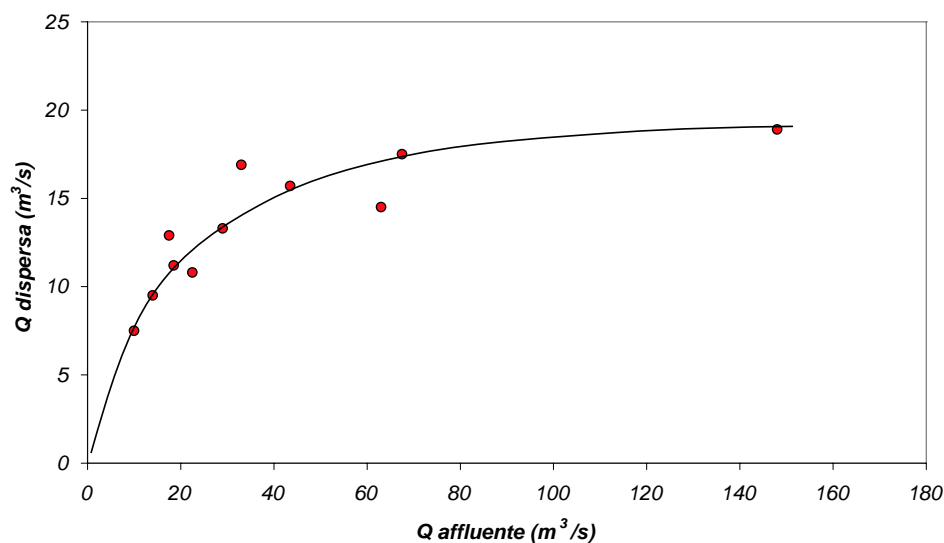


Figura 2.17: *Fiume Brenta. Correlazione tra la portata affluente a Ca' Barzizza - Mignano e la portata dispersa nel tratto Bassano del Grappa - Friola [1].*

dominio del modello (figura 2.11); questa portata è stata in seguito suddivisa nei diversi segmenti che schematizzano il fiume e assegnata ai nodi.

La portata media annua 2004 dispersa dal Brenta (tratto interno al dominio del modello) è stata stimata pari a $15,87 m^3/s$ in $11,74 km$ (coefficiente di dispersione medio pari a $1,35 m^3/s \cdot km$).

Per la stima della portata drenata, si è mantenuto il rapporto tra portata dispersa e portata drenata utilizzato dallo studio AIM - CNR del 1982 [1].

La portata media annua 2004 drenata dal tratto Friola-Carturo è stata stimata pari a $17,64 m^3/s$ in $12,04 km$ (coefficiente di drenaggio medio pari a $1,46 m^3/s \cdot km$).

2.2.3 Dispersione dei canali irrigui

Nella zona oggetto di studio sono presenti tre sistemi irrigui che contribuiscono alla ricarica dell'acquifero indifferenziato:

- il Sistema irriguo Medio Astico;
- il Sistema irriguo Destra Brenta;
- il Sistema irriguo Sinistra Brenta;

Il primo, appartenete all'area di competenza del Consorzio Medio Astico Bacchiglione, deriva la maggior parte dell'acqua che utilizza dall'Astico, a Zugliano, attraverso il Canal Mordini (con portate derivate variabili tra 0,5 e 3,5 m^3/s).

Gli altri due sistemi, apparteneti all'area di competenza del Consorzio Pedemontano Brenta, derivano l'acqua dal Brenta (la derivazione più importante è quella del Canal Modeaco a Bassano del Grappa) e si estendono in destra e sinistra idrografica.

Come evidenziato dalla figura 2.18, la dispersione delle canalette irrigue è stata stimata per le sole canalette presenti all'interno del dominio del modello e a nord della linea delle risorgive (il contributo dell'irrigazione alla ricarica della falda è significativo solo nella zona a nord delle risorgive).

Si noti che la rete irrigua del Sistema Destra Brenta si sviluppa anche all'interno della fascia delle risorgive, in particolare nella zona caratterizzata dalla presenza di un paleoalveo del Brenta che parte dalle zone di Friola e Grantorto e si sviluppa verso sud fino all'altezza di Grisignano e Mestrino [1]. Il paleoalveo, caratterizzato da sedimenti più grossolani di quelli delle aree circostanti, esercita un'intensa azione drenante. Pertanto, l'agricoltura richiede un'intensa irrigazione di superficie che viene realizzata attraverso i canali del Consorzio Pedemontano Brenta. Non è possibile, infatti, utilizzare l'acqua delle risorgive, in quanto non presenti in questa zona.

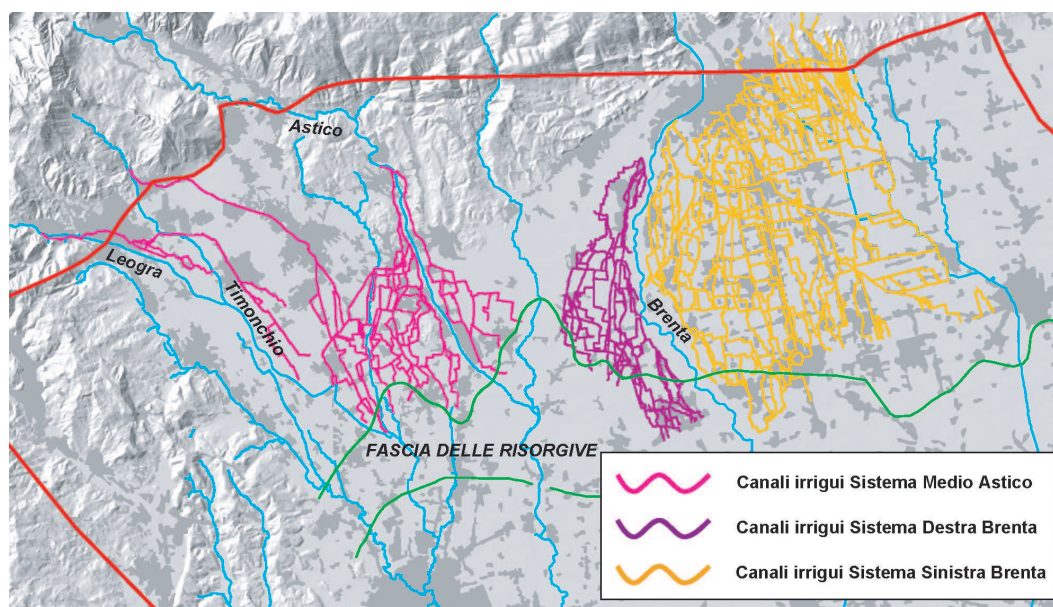


Figura 2.18: *Schema generale dei sistemi irrigui considerati.*

Sono state poi utilizzate le correlazioni ricavate dalle campagne degli anni 1979-1981 [1], che legano le portate in ingresso (o affluenti) alle portate disperse dalle canalette per i tre diversi sistemi irrigui¹.

Per ottenere i valori di portata in ingresso da assegnare ai nodi della griglia computazionale del modello di flusso quale contributo alla ricarica della falda dovuto alla dispersione dei canali irrigui, è stato attribuito ad ogni elemento triangolare della mesh superficiale la misura (in metri) della lunghezza totale dei tronchi dei canali irrigui interni all'elemento stesso. Conoscendo quindi la dispersione media per unità di lunghezza dei canali irrigui (ottenuta dividendo le portate medie annue disperse dall'intero sistema per la lunghezza complessiva dei canali) è stato stimato il valore di dispersione da attribuire al singolo elemento e, di conseguenza, ai tre nodi afferenti.

¹Si precisa che è stato ritenuto trascurabile il contributo alla ricarica della falda da parte delle acque spagliate rispetto a quello dell'acqua dispersa dal fondo delle canalette in continuazione dai vari sistemi (incidenza del contributo dell'acqua spagliata sul contributo totale alla ricarica della falda: Medio Astico 1,5%, Destra Brenta 3,5%, Sinistra Brenta 8,6% [1]).

Sistema Irriguo Medio Astico

Il sistema irriguo Medio Astico viene alimentato dal Canal Mordini (tramite derivazione del t. Astico a Zugliano), dalla Roggia Thiene (derivata dal t. Timonchio a Santorso) e dalla Roggia Schio-Marano (derivata dal t. Leogra a Schio).

Analogamente alle campagne di misura delle portate dei corsi d'acqua naturali, condotte per stimare le dispersioni in falda, sono state condotte (nel periodo 1975-1980) 16 campagne idrometriche, in periodi e regimi diversi, in 15 differenti sezioni di misura, ubicate subito a valle delle derivazioni (portate in ingresso) e alla fine dei tratti disperdenti (o prima delle eventuali restituzioni) [1]. In questo modo, è stato possibile determinare le leggi che correlano le portate in ingresso nel sistema irriguo alle portate disperse. Si evidenzia che, negli anni in cui sono state condotte le campagne sul sistema irriguo Medio Astico, non era ancora attiva la derivazione della Roggia Schio-Marano. Pertanto, la curva di correlazione si riferisce alle portate derivate dal Canal Mordini a Zugliano e dalla Roggia Thiene a Santorso e disperse dai soli canali alimentati da queste derivazioni (è esclusa quindi la Roggia Schio-Marano).

Utilizzando i dati di portata media giornaliera affluente (derivata in parte dal Canal Mordini a Zugliano, in parte dalla Roggia Thiene a Santorso ²) nel corso del 2004, attraverso la curva di correlazione di figura 2.20, si è stimata la portata dispersa dalla rete di canali e, calcolata la lunghezza totale della rete dei soli canali principali alimentati dal Canal Mordini e dalla Roggia Thiene (186 km), si è calcolata la dispersione media per unità di lunghezza di canale (5,7 l/(s·km)). La dispersione unitaria è stata utilizzata per stimare la portata dispersa in falda dall'intera rete irrigua, lunga circa 200 km (compresa la roggia Schio-Marano). In totale si è stimata una dispersione media annua relativa all'anno 2004 di circa 1,14 m³/s.

²Portata media annua 2004 derivata dal Canal Mordini 1,52 m³/s, portata media annua 2004 derivata dalla Roggia Thiene 0,07 m³/s,.

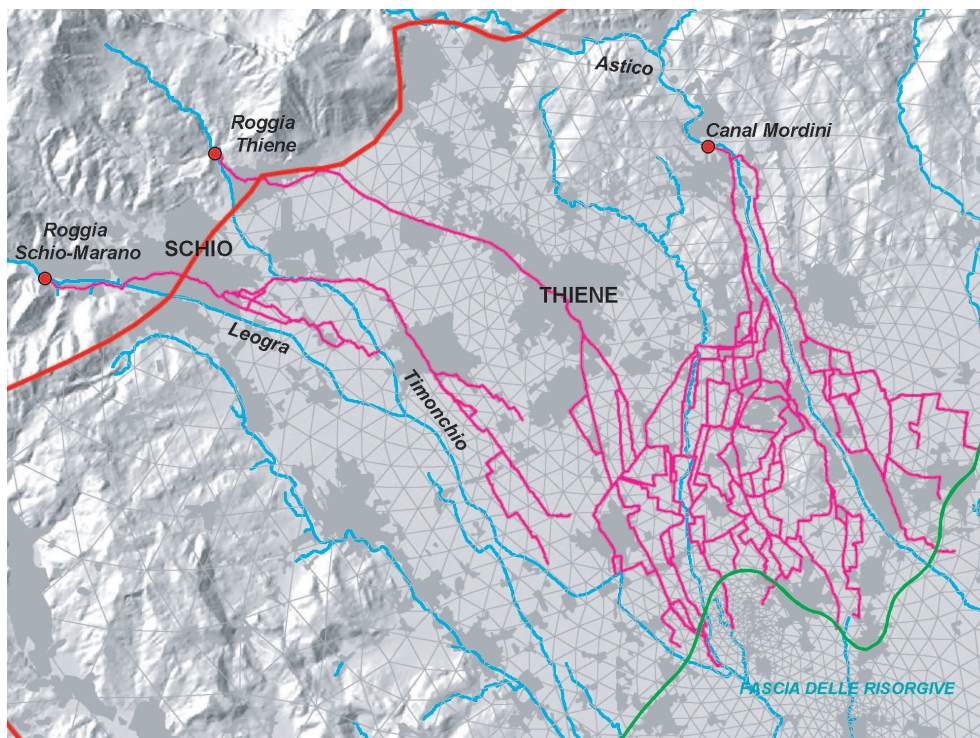


Figura 2.19: *Sistema Irriguo Medio Astico.*

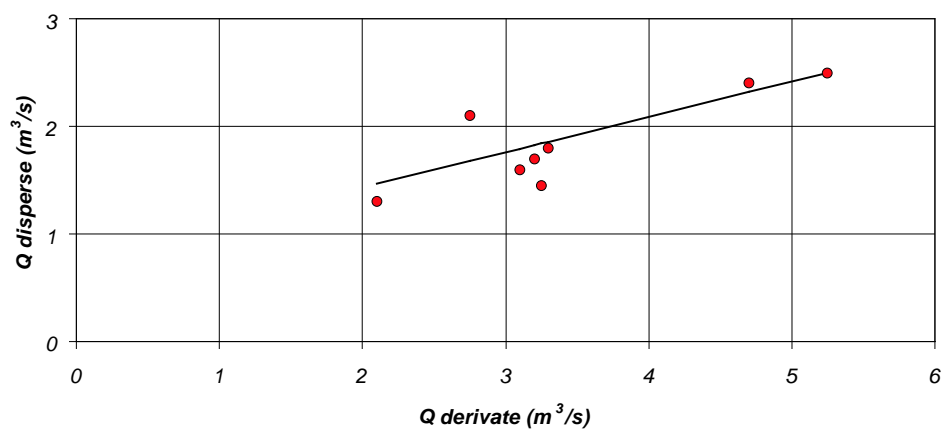


Figura 2.20: *Correlazione tra portate derivate (Canal Mordini e Roggia Thiene) e portate disperse del Sistema Irriguo Medio Astico.*

Sistema Destra e Sinistra Brenta

Le portate in gioco nei sistemi irrigui Destra e Sinistra Brenta sono ben più elevate rispetto a quelle del sistema Medio Astico. I due sistemi irrigui del Brenta sono quasi interamente alimentati dalla derivazione sul Brenta a Bassano del Grappa che alimenta, in sinistra orografica, il Canal Modeaco con portate medie annue 2004 dell'ordine dei $23 \text{ m}^3/\text{s}$. Parte della sua portata viene derivata dalla Roggia Rosà ($Q_{media,2004} = 2 \text{ m}^3/\text{s}$) e dalla Roggia Dolfina-Bernarda ($Q_{media,2004} = 6,5 \text{ m}^3/\text{s}$) oppure scaricata tramite lo scarico S.Lazzaro. Il sistema Sinistra Brenta viene inoltre alimentato dalle Pompe S. Vito ($Q_{media,2004} = 1,7 \text{ m}^3/\text{s}$). La portata residua del Canal Modeaco, sottopassa il Brenta e va ad alimentare il sistema Destra Brenta tramite il Canale Unico e la Roggia Isacchina con complessivi $Q_{media,2004} = 12,4 \text{ m}^3/\text{s}$ (figura 2.21).

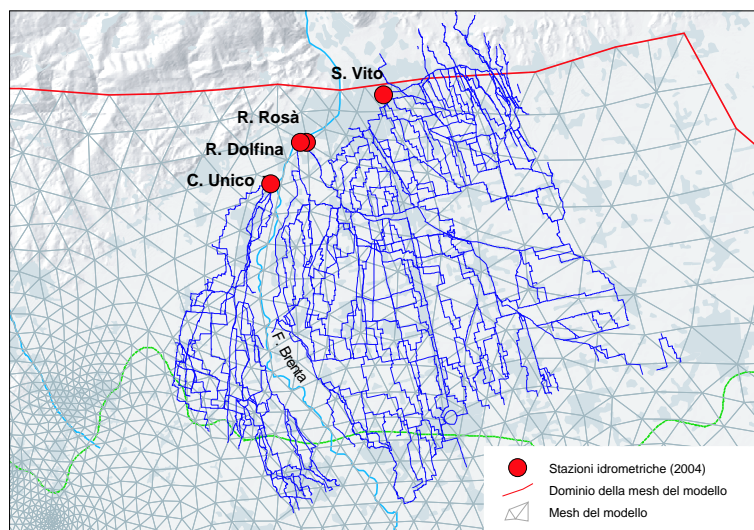


Figura 2.21: *Sistemi Irrigui Destra e Sinistra Brenta.*

Come illustrato per il sistema irriguo Medio Astico, utilizzando le curve di correlazione tra le portate in ingresso e le portate disperse dalle canalette irrigue ricavate dalle campagne condotte nel periodo 1975-1980 (figure 2.22 e 2.23), si sono calcolate le portate totali disperse nel corso del 2004 dalle canalette irrigue interne al dominio del modello.

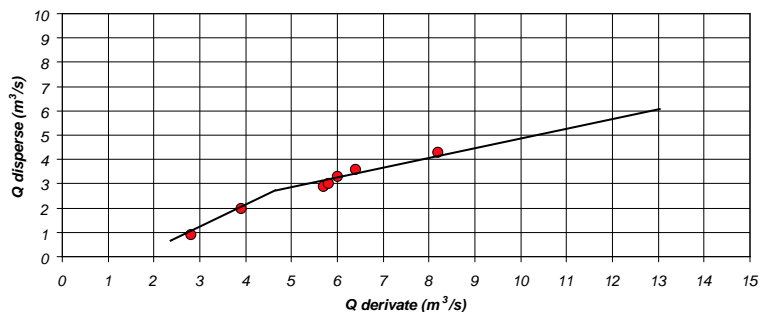


Figura 2.22: Correlazione tra portate derivate e portate disperse del Sistema Irriguo Destra Brenta.

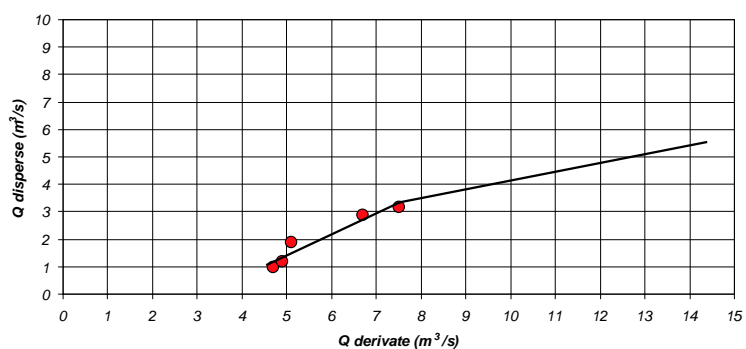


Figura 2.23: Correlazione tra portate derivate e portate disperse del Sistema Irriguo Sinistra Brenta.

Sistema irriguo	Lunghezza rete (interna al dominio)	Portata dispersa (media annua 2004)	Dispersione unitaria
Destra Brenta	153 km	5,69 m ³ /s	37,2 l/(s · km)
Sinistra Brenta	509 km	3,93 m ³ /s	7,7 l/(s · km)

2.2.4 Portate uscenti dalle risorgive

Un'importante fonte di informazione sul regime della falda è rappresentata dal regime delle risorgive. Si considerano risorgive tutte quelle acque emergenti dall'acquifero che originano un vero e proprio reticolo superficiale ben distinto da quello dei corsi d'acqua naturali o artificiali. In genere si distingue tra risorgive di sbarramento, generate dall'ostacolo frapposto dai terreni a bassa permeabilità alla libera circolazione dell'acqua sotterranea, e risorgive di emergenza, dovute all'intersezione della superficie freatica dell'acquifero indifferenziato con la superficie topografica. L'intervento umano ha parzialmente modificato il loro aspetto creando numerosi punti di emergenza dove le portate estratte sono favorite con opere artificiali (fontanili).

Le risorgive possono essere considerate come il troppo pieno del sistema idrogeologico generale. Il loro regime, infatti, è strettamente connesso al regime del serbatoio sotterraneo: nel gennaio 2001, dopo la stagione delle piogge, le portate uscenti dalle risorgive del sub bacino Astico ³ arrivano ai $17 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre nell'agosto del 2003, anno particolarmente siccitoso, le portate raggiungevano a malapena i $3 \text{ m}^3/\text{s}$. Negli ultimi 10 – 15 anni è stata notata la scomparsa di numerosi fontanili e la riduzione generalizzata delle portate di risorgiva. Non esistendo stazioni di misura permanenti delle risorgive, è stato tarato un sistema che consente la stima delle portate complessive dei fontanili presenti nel sub bacino dell'Astico a partire dalla quota freaticometrica del pozzo 27 di Caldogno, per il quale si hanno a disposizione dati relativi a partire dal 1971. La relazione tra la quota piezometrica del pozzo 27 e la portata sfiorante dalle risorgive appartenenti al sub bacino Astico è stata individuata utilizzando i dati delle campagne di misura condotte negli anni 1977-1983, che prevedevano la misura delle portate sfioranti dalle singole risorgive afferenti al sub bacino. La relazione individuata ha permesso di stimare una diminuzione della portata complessiva dei fontanili del sub bacino Astico di $2,0 - 2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (si è infatti passati da

³Le risorgive del sub bacino Astico alimentano il reticolo superficiale che comprende il Retrone, il Bacchiglione, l'Astichello, il Caveggiara, il Tribolo ed il Tesina.

una portata media annua di circa $10 \text{ m}^3/\text{s}$ agli inizi degli anni '80, all'attuale portata di $7,5 - 8,0 \text{ m}^3/\text{s}$ [2]. Avendo assunto le risorgive come indicatore della potenzialità idrica complessiva del bacino, si conferma così l'impoverimento progressivo delle falde, indicato inoltre dall'abbassamento della superficie freatica e dalla diminuzione della pressione degli acquiferi artesiani, che indica uno sfruttamento delle risorse non compatibile con le quantità disponibili.

Per stimare la portata media annua 2004 uscente dalle risorgive, si è quindi utilizzata la relazione che lega la quota piezometrica del pozzo 27 (in particolare, il valore medio registrato nel 2004 uguale a $52,35 \text{ m s.l.m.m.}$) con la portata sfiorante dalle risorgive del sub bacino Astico (zone 1, 2, 3, 4 di figura 2.24). Grazie al dettaglio dei dati raccolti nel corso delle campagne, è stato possibile assegnare una portata diversa ad ognuna delle 4 aree in cui è suddiviso il bacino dell'Astico, aumentando così la precisione della distribuzione spaziale delle portate.

Inoltre, ulteriori campagne di monitoraggio condotte negli anni '77 - '80, hanno individuato la relazione esistente tra la portata dei fontanili del sub-bacino Astico e la portata delle risorgive presenti nei territori compresi tra il Tesina ed il Brenta, che verrà di seguito indicata sub bacino destra Brenta. I dati raccolti hanno dimostrato che la portata del sub bacino Astico è pari al 55%, mentre quella del sub bacino destra Brenta è del 45% (fatto 100% il totale uscente dai 2 sub bacini) [1]. La causa del minor flusso sfiorante dai territori del Brenta è da imputare al drenaggio del fiume stesso che, in tale zona, sottrae una notevole quantità d'acqua alle risorgive. Anche in questo caso, è stato possibile assegnare una portata percentuale ad ognuna delle aree 5 aree (5, 6, 7, 8, 9) appartenenti al sub bacino. Si noti che a questo sub bacino appartengono anche alcune risorgive in sinistra Brenta (area 9 in figura 2.24).

Pur avendo a disposizione stime relative alle portate di risorgiva solo per quanto riguarda i territori della parte occidentale del dominio del modello (dai monti Lessini al fiume Brenta), si è cercata una stima anche delle portate delle risorgive presenti nei territori in sinistra Brenta (area 10 in figura 2.24). A partire dalla portata complessiva dei 2 sub bacini per i quali si avevano a disposizione delle informazioni, si è calcolata una *densità di portata* data dal rapporto tra

la portata e lo sviluppo lineare in direzione est-ovest della linea superiore di comparsa delle risorgive (circa 32 km), ottenendo, per l'anno 2004, un valore pari a $0,59 \text{ m}^3/(s \cdot \text{km})$. Questa densità, moltiplicata per lo sviluppo lineare in direzione est-ovest della linea superiore di comparsa delle risorgive dei territori in sinistra Brenta (circa 27 km), ha fornito la stima della portata sfiorante dai corrispondenti fontanili.

In figura 2.24, sono riportate le 10 aree in cui sono state raggruppate le risorgive nel corso della fase di assegnazione della portata sfiorante. A loro volta, queste 10 aree sono raggruppate in 3 sub bacini, per i quali sono state stimate le seguenti portate medie annue 2004:

- sub bacino Astico: $10,65 \text{ m}^3/s$;
- sub bacino destra Brenta: $8,71 \text{ m}^3/s$;
- sub bacino sinistra Brenta: $16,19 \text{ m}^3/s$;

per un totale pari a $35,55 \text{ m}^3/s$

La portata totale relativa ad ognuna delle 10 aree di risorgiva è stata in seguito ripartita tra tutti i nodi della mesh di calcolo appartenenti all'area corrispondente.

2.2.5 Prelievi pubblici e privati

Un importante fattore di bilancio è rappresentato dai numerosissimi pozzi di prelievo ad uso acquedottistico, irriguo e privato (a sua volta suddiviso in uso domestico potabile, irriguo e industriale).

Prelievi pubblici Per quanta riguarda il prelievo pubblico ad uso acquedottistico, a partire dagli anni '60 si è registrato un significativo aumento dei prelievi (aumento dei consumi idrici A.M.A.G. = +400%), ben superiore al tasso di crescita della popolazione (incremento demografico Padova = +10%). Per soddisfare questa sempre maggiore domanda, le aziende acquedottistiche hanno via

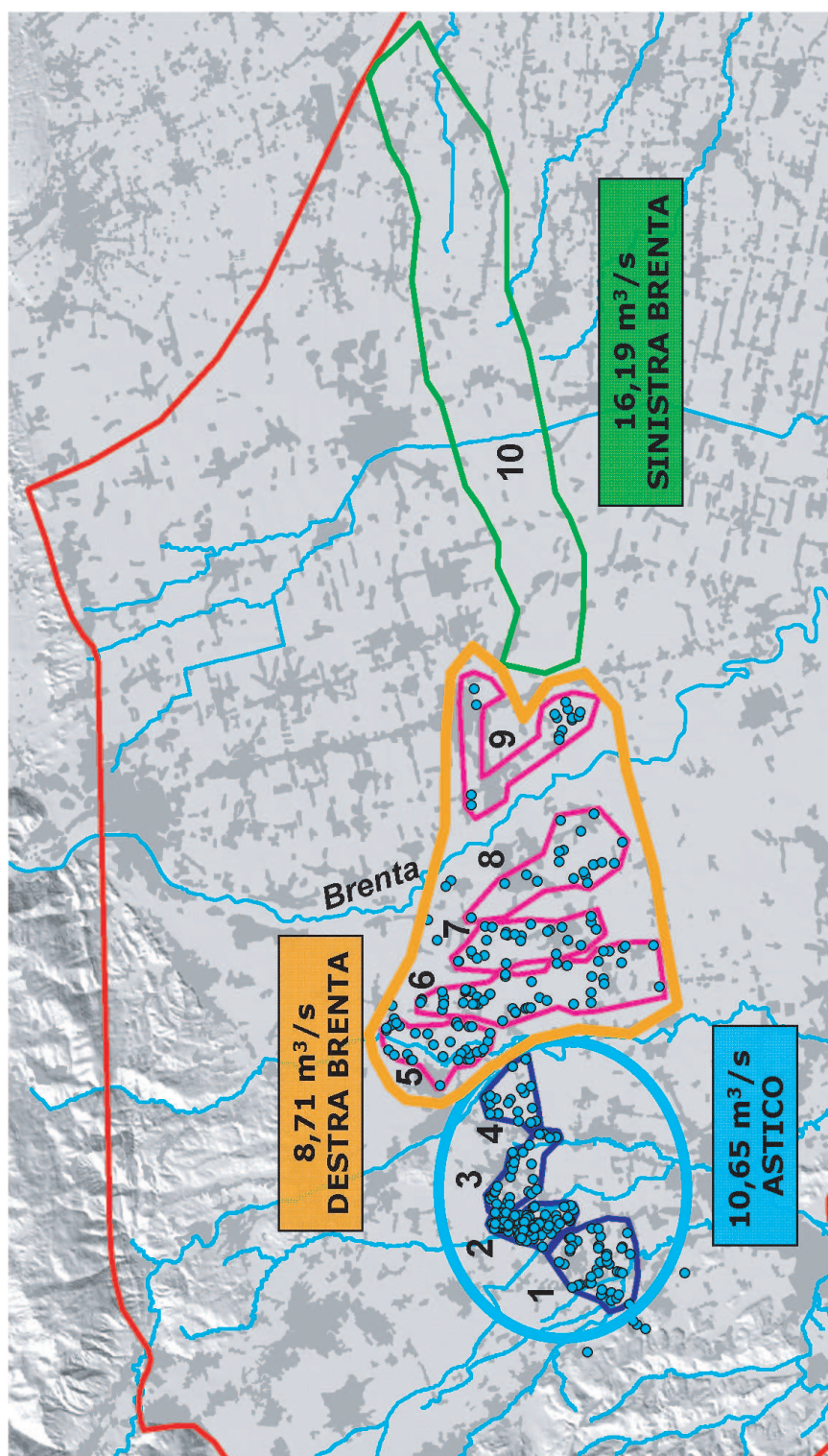


Figura 2.24: *Suddivisione delle risorgive in 3 sub bacini e 10 aree.*

via dismesso i pozzi di attingimento poco profondi e le sorgenti scarsamente affidabili, realizzando nuovi pozzi spinti fino a grandi profondità. Inoltre, ai pozzi di prelievo al servizio dei comuni della provincia di Vicenza, si aggiungono quelli che alimentano le reti acquedottistiche della città di Padova: circa il 60% del prelievo acquedottistico totale dalle falde dei territori del Vicentino viene quindi distribuito fuori dalla provincia.

Nell'area di interesse gli attingimenti acquedottistici sono gestiti dalle aziende AIM di Vicenza, ACEGAS-APS di Padova, AVS di Thiene e ETRA di Cittadella, presso le quali sono state reperite le informazioni relative alle portate emunte, al posizionamento dei tratti filtranti e ai livelli statici e dinamici di ogni singolo pozzo. La stima della portata media annua totale prelevata è pari a $3,74 \text{ m}^3/\text{s}$, così ripartita tra i 4 gestori:

- AIM: $0,83 \text{ m}^3/\text{s}$;
- APS: $1,35 \text{ m}^3/\text{s}$;
- AVS: $0,16 \text{ m}^3/\text{s}$;
- ETRA: $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$.

La portata media annua 2004 è stata suddivisa tra tutti i tratti filtranti del pozzo, per ognuno dei quali è stato individuato il nodo della mesh computazionale più vicino alla profondità media del filtro stesso. Inoltre, per simulare correttamente la lunghezza del filtro nel modello di flusso, a partire dal nodo più vicino alla profondità media del filtro, sono stati individuati il nodo sovrastante e quello sottostante. Al termine di questa operazione ad ogni tratto filtrante di ogni pozzo corrispondono 3 nodi ad ognuno dei quali è stata assegnata $1/3$ della portata emunta attribuita al filtro.

I prelievi ad uso irriguo sono gestiti dai Consorzi di Bonifica e Irrigazione, che prelevano acqua sia dai corsi d'acqua superficiali, sia dai corpi idrici sotterranei. I pozzi di soccorso, utilizzati nei mesi estivi, permettono di garantire anche nei periodi di magra dei corsi d'acqua un'adeguata irrigazione alle coltivazioni (portata media annua totale prelevata stimata pari a $4,23 \text{ m}^3/\text{s}$).

NOME POZZO	COMUNE	Q media annua (l/s)	CENTRALE O DIRAMAZIONE	GESTORE
Pozzo profondo 1	Villaverla	100.00		APS
Pozzo profondo 2	Villaverla	100.00		APS
Pozzo profondo 3	Villaverla	100.00		APS
SORGENTI	Villaverla	52.00		APS
Pozzo Sega	Dueville	21.00		APS
Pozzo Paoletti	Dueville	36.00		APS
Pozzi Cogo	Dueville	11.00		APS
Pozzo Vergani	Dueville	36.00		APS
Pozzo Marconi	Dueville	51.00		APS
Pozzo 4A	Vicenza	0.00		APS
Pozzo 20	Monticello C.O	45.00	dirE	APS
Pozzo 21	Monticello C.O	45.00	dirE	APS
Pozzo 22	Monticello C.O	23.00	dirE	APS
Pozzo 9	Monticello C.O	76.00	dirE	APS
Pozzo 1	Monticello C.O	2.00	dirA	APS
Pozzo 3	Monticello C.O	5.00	dirA	APS
Pozzo 7	Monticello C.O	17.00	dirB	APS
Pozzo 5	Monticello C.O	9.00		APS
Pozzo 11	Monticello C.O	36.00		APS
Pozzo 18	Monticello C.O	7.00		APS
Pozzo 12	Caldogno	105.00	dirC	APS
Pozzo 13	Caldogno	135.00	dirC	APS
Pozzo 14	Vicenza	90.00	dirC	APS
Pozzo 15	Vicenza	72.00	dirC	APS
Pozzo 16	Vicenza	48.00	dirC	APS
Pozzo 17	Monticello C.O	48.00	dirC	APS
Pozzo 19	Vicenza	46.00	dirD	APS
Pozzo 1A	Vicenza	5.00	dirD	APS
Pozzo 2A	Vicenza	0.00	dirD	APS
Pozzo 3A	Vicenza	5.00	dirD	APS
Pozzo 5A	Vicenza	19.00	dirD	APS
Pozzo ca' del Maglio	Breganze	22.00		AVS
Pozzo Sarcedo Camerine	Sarcedo	12.00		AVS
Pozzo Vanzi Fara	Fara	6.50		AVS
Pozzo Vanzi Breganze	Fara	48.00		AVS
Pozzo Fara Campagnola	Lugo	14.39		AVS
Pozzo Lugo Asteghetto 1	Lugo	?		AVS
Pozzo Lugo Asteghetto 2 - 3	Lugo	?		AVS
Pozzo Lugo Molan	Lugo	12.00		AVS
Pozzo Lugo Graziani	Lugo	1.70		AVS
Pozzo Calvene Pralunghi	Calvene	2.25		AVS
Pozzo Ferrarin	Thiene	0.84		AVS
Pozzo via Marche (2)	Thiene	21.00		AVS
Pozzo Molinette	Malo	11.00		AVS
Pozzo Isola Castelnuovo	Isola	11.52		AVS

Tabella 2.3: Pozzi di acquedotto inseriti nel modello (portate medie annue 2004).

NOME POZZO	COMUNE	Q media annua (l/s)	CENTRALE O DIRAMAZIONE	GESTORE
Bedin n. 1 Fabbris	Vicenza	35.47	BEDIN	AIM
Bedin n. 4 Prato	Vicenza	34.24	BEDIN	AIM
Porto Godi n. 2	Vicenza	11.33	BEDIN	AIM
Cricoli n. 3	Vicenza	40.96	BEDIN	AIM
Cricoli n. 5	Vicenza	12.85	BEDIN	AIM
Quintarello	Vicenza	6.50	BERTESINA	AIM
Bertesinella	Vicenza	95.00	BERTESINA	AIM
Lago d'Iseo - pozzo 1	Vicenza	88.70	LAGHETTO	AIM
Lago di Como - pozzo 2	Vicenza	50.30	LAGHETTO	AIM
Lago Maggiore - pozzo 3	Vicenza	41.60	LAGHETTO	AIM
Moracchino - nuovo pozzo 31	Vicenza	133.35	TRENTO	AIM
Moracchino - pozzo 32	Vicenza	19.90	TRENTO	AIM
Lobbia n. 33	Vicenza	69.52	TRENTO	AIM
Lobbia n. 34	Vicenza	54.37	TRENTO	AIM
Trento n. 1	Vicenza	0.07	TRENTO	AIM
Trento n. 2	Vicenza	2.29	TRENTO	AIM
Moracchino - pozzo 10	Vicenza	0.00	TRENTO	AIM
Moracchino - pozzo 11	Vicenza	0.00	TRENTO	AIM
Moracchino - pozzo 12	Vicenza	0.00	TRENTO	AIM
Moracchino - pozzo 14	Vicenza	0.00	TRENTO	AIM
Moracchino - pozzo 15	Vicenza	0.00	TRENTO	AIM
Moracchino - pozzo 16	Vicenza	0.00	TRENTO	AIM
Moracchino - pozzo 17	Vicenza	0.00	TRENTO	AIM
Moracchino - pozzo 18	Vicenza	0.00	TRENTO	AIM
Moracchino - pozzo 20	Vicenza	0.00	TRENTO	AIM
Moracchino - pozzo 22	Vicenza	0.00	TRENTO	AIM
Moracchino - pozzo 23	Vicenza	0.00	TRENTO	AIM
Moracchino - pozzo 24	Vicenza	0.00	TRENTO	AIM
Moracchino - pozzo 27	Vicenza	2.22	TRENTO	AIM
Moracchino - pozzo 28	Vicenza	2.22	TRENTO	AIM
Moracchino - pozzo 29	Vicenza	2.22	TRENTO	AIM
Moracchino - pozzo 30	Vicenza	2.22	TRENTO	AIM
S.Rocco	Bressanvido	9.00		AIM
S.Benedetto	Bressanvido	7.70		AIM
Molinetto, via Barco	Caldogno, via Barco	20.30		AIM
Monte Grappa	Costabissara	15.00		AIM
Masieron	Montecchio P.	13.40		AIM
Astichello	Montecchio P.	9.50		AIM
Molino Abbazia	Monticello C.O	17.20		AIM
pz. comunale 2 Capitello	Sandrigo	10.00		AIM
pz. comunale 1 Capitello	Sandrigo	10.00		AIM
Scaligeri	Vicenza	11.50		AIM
pz. Comunale Schiavon; Lott. Artigianale	Schiavon	4.30		AIM-ETRA

NOME POZZO	COMUNE	Q media annua (l/s)	CENTRALE O DIRAMAZIONE	GESTORE
Rivarotta	Bassano del Grappa	6.23		ETRA
Melagrani	Bassano del Grappa	19.99		ETRA
SCroce1	Bassano del Grappa	6.67		ETRA
SCroce2	Bassano del Grappa	32.83		ETRA
pz1	Carmignano di Brenta	107.09		ETRA
pz2	Carmignano di Brenta	107.09		ETRA
pz3	Carmignano di Brenta	107.09		ETRA
pz4	Carmignano di Brenta	107.09		ETRA
pz5	Carmignano di Brenta	107.09		ETRA
pz6	Carmignano di Brenta	107.09		ETRA
pz7	Carmignano di Brenta	107.09		ETRA
ComunaleCartigliano	Cartigliano	1.03		ETRA
exConsorzioGrappa1 - S.Zeno 1	Cassola	4.65		ETRA
exConsorzioGrappa2 - S.Zeno 2	Cassola	4.15		ETRA
1	Fontaniva	6.32		ETRA
2	Fontaniva	6.04		ETRA
3	Fontaniva	0.00		ETRA
4	Fontaniva	0.00		ETRA
5	Fontaniva	13.87		ETRA
6	Fontaniva	10.53		ETRA
7	Fontaniva	0.00		ETRA
8	Fontaniva	14.65		ETRA
9	Fontaniva	6.36		ETRA
10/A	Fontaniva	0.00		ETRA
11/B	Fontaniva	0.00		ETRA
12/C	Fontaniva	0.00		ETRA
13/D	Fontaniva	0.00		ETRA
Mottinello1	Galliera Veneta	17.99		ETRA
Mottinello2	Galliera Veneta	0.00		ETRA
Anconetta1 (DISMESSO)	Marostica	disnesso		ETRA
Anconetta2 (DISMESSO)	Marostica	disnesso		ETRA
Boscaglie	Marostica	0.00		ETRA
Torresin1	Marostica	15.33		ETRA
Torresin2	Marostica	16.44		ETRA
exLaverda Cantarana 1	Mason Vicentino	18.19		ETRA
exLaverda Cantarana 2	Mason Vicentino	2.99		ETRA
pzVilux	Molvena	2.06		ETRA
exLaverda Gazzo1	Pianezze	4.05		ETRA
exLaverda Gazzo2	Pianezze	7.26		ETRA
Crocerone	Rosà	3.46		ETRA
Rosàcentro (via Roma)	Rosà	25.80		ETRA
Travettore1	Rosà	0.00		ETRA
Travettore2	Rosà	9.62		ETRA
Borromea	Rosà	0.00		ETRA
SanLorenzo (Selle S.Marco)	Rossano Veneto	14.18		ETRA
ComunaleRossano (centro)	Rossano Veneto	3.10		ETRA
3 Sega	S. Martino di Lupari	23.15		ETRA
4 Sega	S. Martino di Lupari	17.22		ETRA
spietroingu1	S. Pietro in Gu	18.67		ETRA
spietroingu2	S. Pietro in Gu	16.58		ETRA
ComunaleCusinati	Tezze sul Brenta	7.75		ETRA
ComunaleGranella	Tezze sul Brenta	3.44		ETRA
ComunaleStroppari	Tezze sul Brenta	24.96		ETRA
pz. Polegge 1	Vicenza	88.31		ETRA
pz. Polegge 2	Vicenza	chiuso		ETRA
pz. Polegge 3	Vicenza	88.31		ETRA
pz. Polegge 4	Vicenza	88.31		ETRA

Consorzio Medio Astico Bacchiglione		Q media annua (l/s)
POZZO	COMUNE	
Pozzo Rozzampia	Thiene	29.59
Pozzo Ca Molle	Sarcedo	24.66
Pozzo Lupiola	Sandrigo	13.15
Pozzo Breganze	Breganze	0.33

Consorzio Pedemontano Brenta		Q media annua (l/s)
POZZO	COMUNE	
Pozzo FIOR	Via Rinascenza - Fontaniva	147.95
Pozzo VAGLIO	Via Basse Brenta-S. Croce Bigolina	143.84
Pozzo CASARETTA	Via Casaretta - Cittadella	143.84
Pozzo OSPITALE	Via Ospitale - Carmignano di Brenta	143.84
Pozzo DIEDA	Via Vegre di Sotto - Pozzoleone	123.29
Pozzo MACELLO CITTADELLA	Via Palladio - Cittadella	123.29
Pozzo BOSCHETTI	Via Boschetti - Fontaniva	123.29
Pozzo GIACHELE	Via Fornace - Tezze sul Brenta	123.29
Pozzo OLIVETTO	Via Sega - Loria	115.07
Pozzo SPESSA nuovo	Via Provinciale Spessa - Carmignano	106.85
Pozzo SPESSA nuovo	Via Provinciale Spessa - Carmignano	106.85
Pozzo TESINA	Via Rivana - Sandrigo	102.74
Pozzo LONGA	Via Bosella - Longa di Schiavon	102.74
Pozzo VALLAZZA	Ancignano - Sandrigo	102.74
Pozzo BRESSANVIDO	Via Bettinardi - Bressanvido	102.74
Pozzo CUMANA	Via Fornace Poianella - Bressanvido	102.74
Pozzo ANCIGNANO	Via Soella Ancignano - Sandrigo	102.74
Pozzo MEZZALIRA	Via S. Benedetto - Bressanvido	102.74
Pozzo ALBERERIA	Via Albereria - S.Pietro in Gu'	102.74
Pozzo VEGRE	Via Bassanese Superiore - Pozzoleone	102.74
Pozzo CERESINA	Via Capolina - S. Pietro in Gu'	102.74
Pozzo CERESONE	Via Poston - S.Pietro in Gu'	102.74
Pozzo S.VALENTINO	Via S. Valentino - Pozzoleone	102.74
Pozzo BORGHI nuovo	Via Borghi Camazzole - Carmignano	102.74
Pozzo BORGHI nuovo	Via Borghi Camazzole - Carmignano	102.74
Pozzo BELVEDERE	Via 29 Aprile - Pozzoleone	102.74
Pozzo MACELLO GALLIERA	Via Montegrappa - Galliera Veneta	102.74
Pozzo TOSO ex GOBBI	Via Postumia - S. Martino di Lupari	102.74
Pozzo MAI	Via Del Telarolo - Cittadella	98.63
Pozzo CASTELLO DI GODEGO	Via Postumia - Castello di Godego	94.52
Pozzo SCAPIN	Via Olivari - Galliera Veneta	94.52
Pozzo ARMEDOLA	Via Armedola - S.Pietro in Gu'	90.41
Pozzo TERGOLA	Via Bosco Poianella - Bressanvido	82.19
Pozzo TURCA	Via S. Benedetto - Bressanvido	82.19
POZZO FRATTA	VIA VECCHIETTA TREVISANA	82.19
Pozzo CA' ALTA	Via Strada Alta Poianella - Bressanvido	61.64
Pozzo CARRARO	Via Barra - S. Pietro in Gu'	61.64
Pozzo SESSO vecchio	Via Ca' Sesso - S.Pietro in Gu'	61.64
Pozzo BISSARA	Via Ospitale - Carmignano di Brenta	61.64
Pozzo CHIESA	Via Chiesa - S.Pietro in Gu'	57.53
Pozzo LIROSA	Boa Casara - Bressanvido	44.38
Pozzo LANZE'	Via S.Giuseppe Lanze' - Quinto Vicentino	41.10

TOTALE (l/s)	4229.92
TOTALE (m ³ /s)	4.23

Tabella 2.4: Pozzi pubblici ad uso irriguo inseriti nel modello (portate medie annue 2004).

Prelievi privati La facilità di approvvigionamento, la qualità dell'acqua at-tinta, i bassi costi della risorsa idrica e le carenze del servizio acquedottistico comportano che nel settore produttivo i prelievi autonomi (prelievi privati ad uso industriale) da acque superficiali e da pozzi rappresentino più dell'80% dell'acqua complessivamente utilizzata. Le attività che evidenziano una maggiore domanda idrica nella provincia di Vicenza sono l'industria della carta, l'industria chimica-farmaceutica, la lavorazione di minerali non metalliferi, l'industria della concia e l'industria alimentare. Si può comunque affermare che, mentre la do-manda idrica per unità di prodotto, grazie all'innovazione tecnologica, presenta una tendenza alla diminuzione, la domanda idrica totale risulta in crescita sia per l'incremento delle produzioni, sia per una maggiore diffusione di usi impropri di acqua (soprattutto per la necessità di rispettare la qualità dello scarico finale).

La grande facilità di reperimento di acqua nel sottosuolo, soprattutto nei comuni ubicati immediatamente a valle della fascia dei fontanili, ha favorito anche lo sfruttamento ad uso domestico potabile delle acque sotterranee prelevate da falde in pressione ad erogazione spontanea, poste a debole profondità. Tale circostanza è causa ed effetto della totale assenza, in alcuni comuni, di acque-dotti pubblici (Dueville e Pozzoleone) o del loro parziale sviluppo (Schiavon, Bressanvido, Bolzano Vicentino).

Data la difficoltà di acquisire dati certi, il numero di pozzi artesiani privati (ad uso industriale, domestico potabile ed irriguo) che si alimentano dagli acquiferi in pressione può essere solo stimato.

Per la stima del prelievo privato, si è partiti dal Censimento condotto dal Cen-tro Idrico di Novoledo nel biennio 1997-1998 in collaborazione con l'Istituto Tec-nico Statale B. Boscardin di Vicenza, in 11 Comuni del Vicentino situati in cor-rispondenza della fascia delle risorgive. L'indagine ha evidenziato che il maggior prelievo è da imputare ai pozzi artesiani (cioè pozzi ad efflusso libero), sebbene il loro numero sia inferiore a quello dei pozzi freatici (37 milioni di $m^3/anno$ erogati da 2500 pozzi artesiani, 3 milioni di $m^3/anno$ sollevati da 5700 pozzi freatici). Ciò giustifica la scelta di trascurare nel modello di flusso il contributo dei pozzi freatici. La portata emunta dai solo pozzi salienti negli 11 comuni è confrontabile

al prelievo acquedottistico necessario per servire due importanti città quali Padova e Vicenza (portata media annua dei pozzi artesiani $1,17 m^3/s$; portata per la città di Padova $1,7 m^3/s$; portata per la città di Vicenza $0,65 m^3/s$). Le informazioni relative alla profondità di attingimento hanno permesso di individuare 6 classi di profondità media (30, 50, 90, 120, 160, 210 metri dal p.c.) che sono risultate del tutto confrontabili con le profondità medie dei 6 acquiferi in pressione individuati nella fase di ricostruzione del modello geostrutturale (in particolare, i prelievi privati della classe di profondità media 30 metri sono stati suddivisi tra l'acquifero freatico e il primo acquifero in pressione).

Le informazioni sono state confrontate, aggiornate e completate con i dati dell'indagine effettuata dalla Regione Veneto nel 1999, che raccoglie i dati delle denunce pervenute agli Uffici Provinciali del Genio Civile aggiornate al 1995 e, per la Provincia di Vicenza, con i dati del Genio Civile di Vicenza delle denunce aggiornate al 2006.

Al termine della fase di raccolta ed elaborazione dati, si sono ottenute le stime delle portate prelevate da 64 Comuni della Provincia di Padova, Vicenza e Treviso, suddivise per profondità media di attingimento (portata media annua totale prelevata = $4,28 m^3/s$).

COMUNI	PROVINCIA	freatico-1°										TOTALE	TOTALE
		2° pressione	3° pressione	4° pressione	5° pressione	6° pressione	6° pressione	6° pressione	6° pressione	6° pressione	6° pressione	mc/s	mc/anno
Altavilla Vicentina	VI	-9.91E-03	-5.73E-03	-2.05E-02	-2.38E-02	-5.73E-03	-2.64E-03	-6.83E-02	-2.152 668				
Bozzano Vicentino	VI	-9.77E-04	-9.77E-04	-1.95E-03	-1.56E-02	-2.35E-02	-1.12E-02	-5.42E-02	-1 710 301				
Breganze	VI	-8.58E-03	-2.16E-03	-1.25E-04	-8.89E-05	-6.23E-05	-3.56E-07	-1.10E-02	-347 472				
Bressanvido	VI	0.00E+00	-8.89E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-8.89E-03	-280 356				
Caldogno	VI	-3.75E-02	-1.17E-02	-1.84E-03	-1.84E-03	0.00E+00	0.00E+00	-5.28E-02	-1 666 287				
Camisano Vicentino	VI	0.00E+00	0.00E+00	-5.22E-03	0.00E+00	-7.31E-03	-2.09E-02	-3.34E-02	-1 053 390				
Cartigliano	VI	-6.02E-03	-1.64E-03	-1.09E-03	-5.47E-04	0.00E+00	0.00E+00	-9.31E-03	-293 460				
Costabissara	VI	-1.55E-01	-1.17E-02	-1.17E-02	-3.08E-03	-6.16E-04	0.00E+00	-1.82E-01	-5 729 505				
Creazzo	VI	-3.87E-03	-2.24E-03	-8.01E-03	-9.30E-03	-2.24E-03	-1.03E-03	-2.67E-02	-841 690				
Dueville	VI	-1.21E-01	-6.82E-03	-1.15E-02	-1.57E-03	0.00E+00	0.00E+00	-1.41E-01	-4 437 020				
Fara Vicentino	VI	-1.19E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-1.19E-02	-373 760				
Grisignano di Zocco	VI	0.00E+00	0.00E+00	-2.78E-03	0.00E+00	-3.89E-03	-1.11E-02	-1.78E-02	-560 640				
Grupolo delle Abbadesse	VI	0.00E+00	0.00E+00	-6.64E-03	0.00E+00	-9.30E-03	-2.66E-02	-4.25E-02	-1 340 280				
Isola Vicentina	VI	-1.47E-02	-2.49E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-1.43E-02	-540 930				
Malb	VI	-1.17E-02	-2.63E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-1.43E-02	-450 410				
Marano Vicentino	VI	-4.63E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-4.63E-03	-146 000				
Mason Vicentino	VI	-6.49E-04	-6.83E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-7.18E-04	-22 630				
Molvena	VI	-2.55E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-2.55E-03	-80 300				
Montebelluno	VI	-2.21E-02	-1.53E-02	-8.07E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-3.82E-02	-1 206 017				
Montebelluno	VI	0.00E+00	0.00E+00	-1.44E-03	0.00E+00	-2.02E-03	-5.77E-03	-9.24E-03	-291 270				
Montebelluno	VI	-1.77E-04	-1.34E-05	-1.34E-05	-3.53E-06	-7.06E-07	0.00E+00	-2.08E-04	-6 570				
Montebelluno	VI	-1.10E-02	-1.80E-02	-1.53E-01	-1.33E-01	-1.87E-02	-1.29E-03	-3.35E-01	-10 564 560				
Nove	VI	-3.71E-03	-5.30E-04	-5.30E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-4.77E-03	-150 380				
Pozzoleone	VI	-8.68E-03	-4.34E-02	-2.89E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-5.50E-02	-1 733 020				
Quinto Vicentino	VI	-2.91E-03	0.00E+00	0.00E+00	-5.81E-03	-8.72E-03	-1.22E-01	-1.40E-01	-4 400 896				
Rosa'	VI	-2.41E-02	-4.30E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-2.84E-02	-894 250				
Rossano Veneto	VI	-1.53E-02	-2.36E-03	-1.18E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-1.89E-02	-594 950				
Sandriago	VI	-2.12E-02	-1.06E-01	-7.08E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-1.34E-01	-4 240 570				
Sarcedo	VI	-1.68E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-1.68E-02	-530 710				
Schiavon	VI	-2.35E-02	-2.96E-03	-2.02E-03	0.00E+00	0.00E+00	-1.41E-06	-2.85E-02	-898 630				
Tezze sul Brenta	VI	-2.57E-02	-2.85E-03	0.00E+00	-3.17E-04	0.00E+00	0.00E+00	-2.88E-02	-909 580				
Thiene	VI	-3.37E-02	-7.60E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-4.13E-02	-1 301 590				
Torri di Quartesolo	VI	0.00E+00	0.00E+00	-3.60E-03	0.00E+00	-5.04E-03	-1.44E-02	-2.30E-02	-725 869				
Vicenza	VI	-1.28E-01	-7.39E-02	-2.64E-01	-3.07E-01	-7.39E-02	-3.41E-02	-8.81E-01	-27 783 216				
Villaverla	VI	-8.56E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-8.56E-03	-270 100				
Zane'	VI	-2.57E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-2.57E-03	-81 030				
Zugliano	VI	-7.96E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-7.96E-03	-251 120				

Tabella 2.5: *Prelievo privato (portate medie annue 2004).*

COMUNI	PROVINCIA	freatico-1°										TOTALE	TOTALE
		2° pressione mc/s	3° pressione mc/s	4° pressione mc/s	5° pressione mc/s	6° pressione mc/s	TOTALE mc/s	TOTALE mc/anno					
Camignano di Brenta	PD	-9,23E-03	-4,24E-02	-4,65E-03	-1,51E-02	-2,27E-02	-1,09E-02	-1,05E-01	-3,309,820				
Cittadella	PD	-7,07E-02	-2,29E-02	-2,34E-03	-1,24E-02	-1,74E-02	-2,42E-02	-1,50E-01	-4,726,020				
Fontaniva	PD	-4,03E-03	-1,55E-02	-2,34E-03	-1,16E-02	-1,74E-02	-2,42E-02	-7,51E-02	-2,368,120				
Gazzo	PD	-6,39E-04	0,00E+00	0,00E+00	-1,28E-03	-1,92E-03	-2,68E-02	-3,07E-02	-967,250				
Grantorto	PD	-8,23E-04	-3,82E-04	-7,64E-04	-6,99E-03	-1,05E-02	-2,29E-02	-4,24E-02	-1,336,630				
Piazzola sul Brenta	PD	0,00E+00	0,00E+00	-8,56E-04	-1,71E-03	-2,57E-03	-3,60E-02	-4,11E-02	-1,295,750				
San Giorgio in Bosco	PD	-9,91E-04	-9,91E-04	-1,98E-03	-1,59E-02	-2,38E-02	-1,14E-02	-5,50E-02	-1,735,210				
San Pietro in Gu	PD	-1,18E-03	-1,18E-03	-2,36E-03	-1,89E-02	-2,84E-02	-1,36E-02	-6,56E-02	-2,069,550				
Camposampiero	PD	-5,24E-04	-5,24E-04	-1,05E-03	-8,38E-03	-1,26E-02	-6,02E-03	-2,91E-02	-916,880				
Campo San Martino	PD	-6,15E-04	-6,15E-04	-1,23E-03	-9,84E-03	-1,48E-02	-7,07E-03	-3,41E-02	-1,076,750				
Galliera Veneta	PD	-1,04E-02	-3,36E-03	-3,44E-04	-1,82E-03	-2,55E-03	-3,55E-03	-2,20E-02	-694,960				
Loreggia	PD	-3,40E-04	-3,40E-04	-6,81E-04	-5,45E-03	-8,17E-03	-3,91E-03	-1,89E-02	-595,680				
Piombino Dese	PD	-7,63E-04	-7,63E-04	-1,53E-03	-1,22E-02	-1,83E-02	-8,78E-03	-4,24E-02	-1,335,900				
San Martino di Lupatari	PD	-4,55E-02	-1,47E-02	-1,50E-03	-7,99E-03	-1,12E-02	-1,56E-02	-9,65E-02	-3,042,640				
Santa Giustina in Colle	PD	-3,14E-04	-3,14E-04	-6,27E-04	-5,02E-03	-7,53E-03	-3,61E-03	-1,74E-02	-548,960				
Tombolo	PD	-4,37E-02	-1,41E-02	-1,44E-03	-7,66E-03	-1,07E-02	-1,49E-02	-9,25E-02	-2,917,080				
Trebaseleghe	PD	-1,66E-03	-1,66E-03	-3,33E-03	-2,66E-02	-3,99E-02	-1,91E-02	-9,23E-02	-2,910,510				
Villa del Conte	PD	-8,34E-04	-8,34E-04	-1,67E-03	-1,33E-02	-2,00E-02	-9,59E-03	-4,63E-02	-1,459,270				
Castelfranco Veneto	TV	-7,40E-02	-2,39E-02	-2,44E-03	-1,30E-02	-1,82E-02	-2,53E-02	-1,57E-01	-4,945,020				
Castello di Godego	TV	-1,42E-02	-2,18E-03	-1,09E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-1,75E-02	-550,420				
Loria	TV	-7,39E-03	-1,14E-03	-5,69E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-9,10E-03	-286,890				
Morgano	TV	-1,07E-03	-1,07E-03	-2,14E-03	-1,71E-02	-2,57E-02	-1,23E-02	-5,94E-02	-1,873,180				
Quinto di Treviso	TV	-3,51E-03	-3,51E-03	-7,03E-03	-5,62E-02	-8,43E-02	-4,04E-02	-1,95E-01	-6,148,060				
Resana	TV	-3,10E-02	-1,08E-02	-3,26E-03	-2,35E-02	-3,47E-02	-2,33E-02	-1,26E-01	-3,987,260				
Riese Pio X	TV	-1,03E-02	-1,59E-03	-7,93E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-1,27E-02	-400,040				
Vedelago	TV	-1,99E-02	-6,42E-03	-6,56E-04	-3,48E-03	-4,88E-03	-6,78E-03	-4,21E-02	-1,327,140				
Zero Branco	TV	-1,83E-03	-1,83E-03	-3,66E-03	-2,93E-02	-4,39E-02	-2,11E-02	-1,02E-01	-3,204,700				
TOTALE											-4,28	-134,891,118	

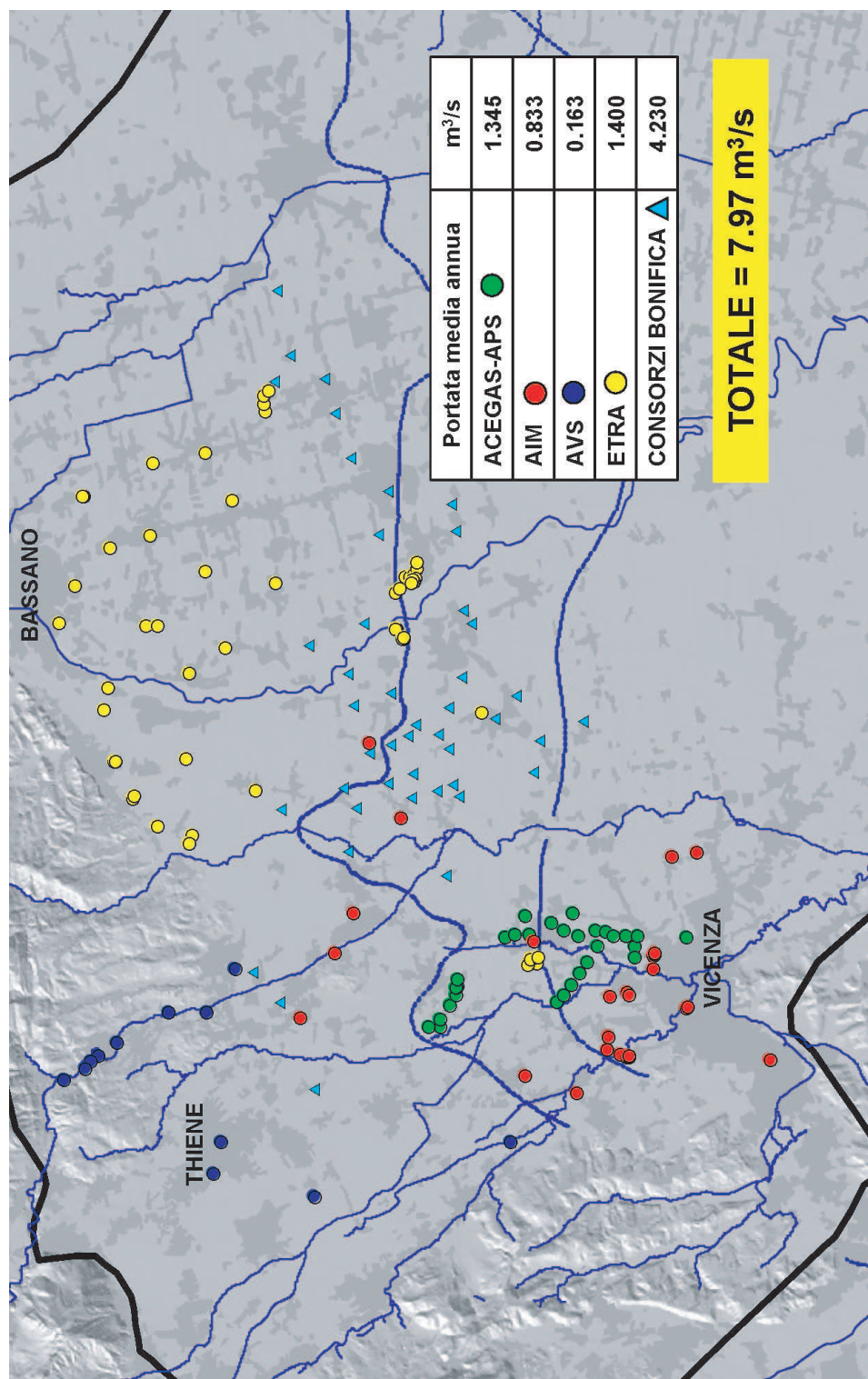


Figura 2.25: Prelievi pubblici ad uso acquedottistico ed irriguo.

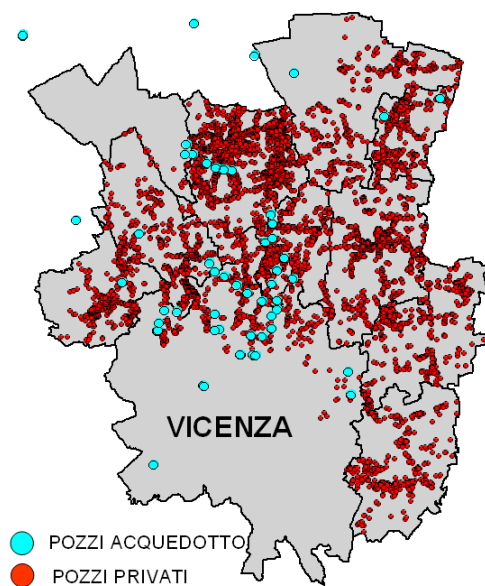


Figura 2.26: *Prelievo privato: censimento del Centro Idrico di Novoledo (1997-1998).*

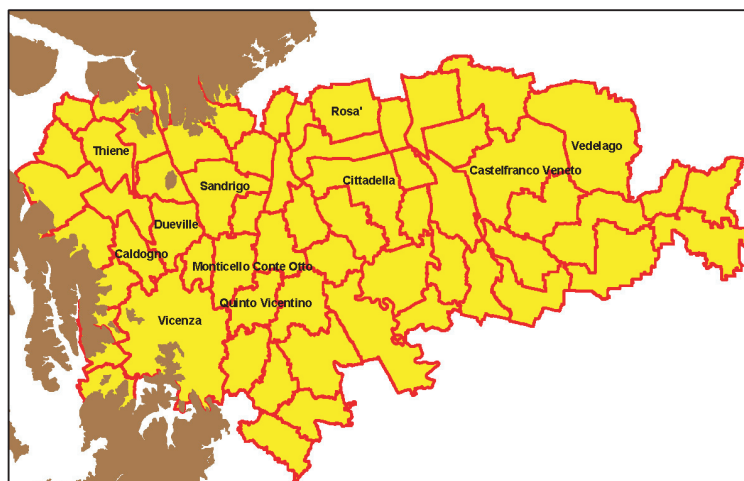


Figura 2.27: *Prelievo privato: 64 Comuni in cui sono stati stimate le portate prelevate .*

Una volta stimate le portate medie annue (relative all'anno 2004) in ingresso al sistema, ossia gli afflussi che determinano la ricarica degli acquiferi sotterranei:

1. l'apporto meteorico efficace efficace alla ricarica della falda ($P_e = 13,51 \text{ m}^3/s$);
2. le dispersioni dai corsi d'acqua naturali ($Q_d = 5,42 \text{ m}^3/s$);
3. le dispersioni delle canalette irrigue ($I_d = 11,05 \text{ m}^3/s$);

e i principali deflussi, in uscita dal sistema:

1. le portate uscenti dalle risorgive ($R = 35,55 \text{ m}^3/s$);
2. i prelievi artificiali ($U = 12,25 \text{ m}^3/s$) ad uso:
 - acquedottistico ($3,74 \text{ m}^3/s$);
 - irriguo ($4,23 \text{ m}^3/s$);
 - privato (industriale, potabile domestico, irriguo) ($4,28 \text{ m}^3/s$);

queste portate sono state assegnate ai nodi della mesh di calcolo tridimensionale. Si evidenzia che gli afflussi A_s e i deflussi D_s attraverso i confini del modello (in particolare, le portate entranti dall'Altopiano di Asiago e le portate sotterranee uscenti attraverso le frontiere meridionali) non vengono assegnate in input al modello perchè vengono calcolate durante l'implementazione del modello stesso. Durante la fase di taratura si è cercato, in primo luogo, di riprodurre correttamente la piezometria reale a disposizione, ma anche di ottenere dei valori plausibili per gli afflussi A_s e i deflussi D_s .

Esplicitando il bilancio in termini quantitativi si può scrivere:

$$\sum Q_{affl} = \sum Q_{defl} \pm \Delta S \quad (2.6)$$

$$P_e + Q_d + I_d + A_s = R + U + D_s \pm \Delta S \quad (2.7)$$

dove ΔS indica la possibile variazione delle quantità d'acqua accumulate nel bacino (storage). Nel nostro caso, lavorando in condizioni stazionarie, il termine ΔS è nullo, mentre la somma dei termini A_s e D_s è uguale ma con segno opposto alla somma delle portate assegnate in input ($-18,33 \text{ m}^3/s$).

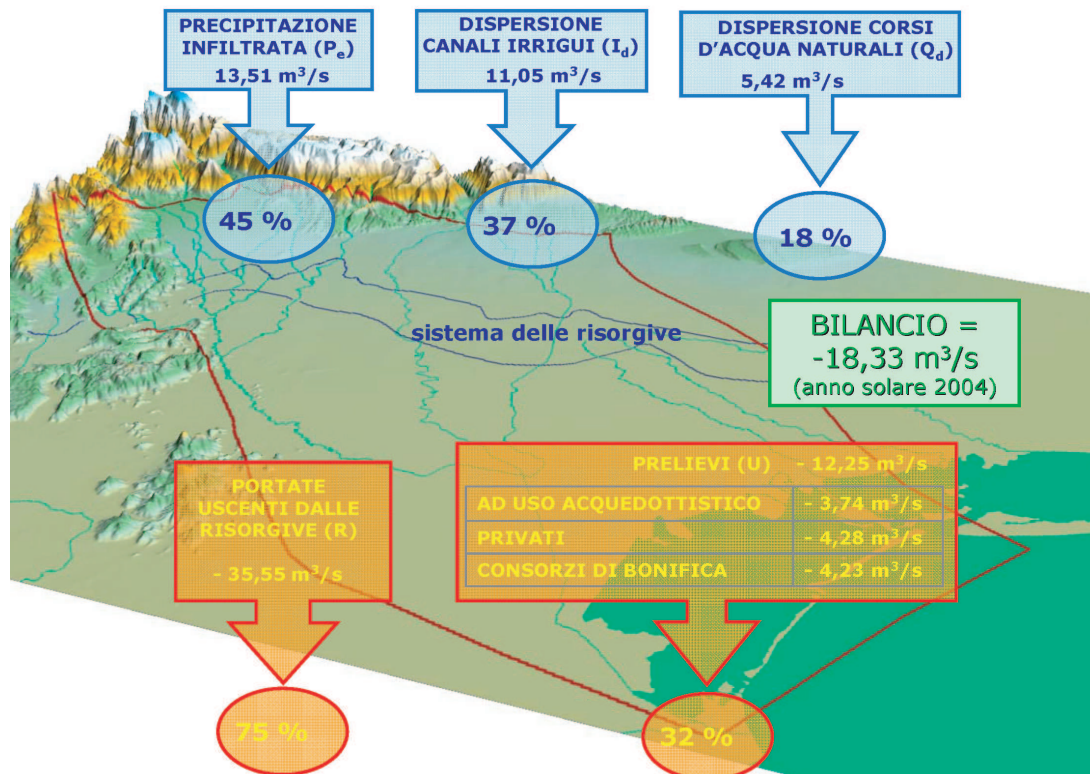


Figura 2.28: *Bilancio idrologico: portate in ingresso e portate in uscita.*

2.3 La ricarica artificiale

Il processo di ricarica artificiale consiste nell'immissione forzata di acqua superficiale nel sottosuolo, per mezzo di strutture naturali o artificiali. Obiettivo primario degli interventi di ricarica forzata è l'alimentazione e la ripressurizzazione delle falde, per consentire il successivo sfruttamento dell'acqua sotterranea; in casi particolari la ricarica artificiale può essere utilizzata per ripristinare le condizioni naturali di una falda modificate dall'attività umana, ad esempio per ridurre la subsidenza o per migliorare la qualità delle acque [25].

In letteratura [29], si individuano due tipi di ricarica artificiale:

1. la ricarica *diretta* o profonda: è realizzata mediante strutture di iniezione (generalmente pozzi) ed è efficace nell'alimentare le falde in pressione, al di sotto di livelli impermeabili. Tale sistema è generalmente poco usato poiché i dispositivi di iniezione subiscono un processo di progressivo intasamento che deriva soprattutto dalla deposizione di materiali fini portati in sospensione dall'acqua superficiale iniettata. L'intervento più efficace contro tale inconveniente è un trattamento preventivo delle acque di immissione; tuttavia si verifica comunque una lente diminuzione della permeabilità dei terreni circostanti. Il metodo indiretto necessita inoltre di numerosi accorgimenti circa le caratteristiche chimiche e fisiche dell'acqua che viene immessa (temperatura, torbidità, chimismo, etc.) per evitare di andare ad alterare l'equilibrio chimico-fisico della falda;
2. la ricarica *indiretta* o superficiale: è realizzata mediante strutture di infiltrazione che consentono l'immissione d'acqua direttamente dalla superficie del suolo; è particolarmente adatta per le falde freatiche (acquiferi maggiormente interessati dai processi di alimentazione artificiale) ed ha il vantaggio di permettere facili ispezioni e manutenzioni. Il dispositivo di infiltrazione più usato è rappresentato dai bacini di dispersione, realizzati normalmente con lo scavo di vasche o di trincee, profonde alcune metri e di dimensioni

areali molto variabili (fino a qualche ettaro), che sono in grado di offrire notevoli capacità di infiltrazione.

2.3.1 Dispositivi di alimentazione forzata

I dispositivi di iniezione

Le strutture di iniezione vengono usate per immettere acqua nel sottosuolo in profondità, e rappresentano l'unico modo per ricaricare falde piuttosto profonde poste al di sotto di coperture impermeabili. I dispositivi di iniezione sono formati normalmente da pozzi, la cui portata singola è spesso molto limitata: per tale ragione vengono impiegati in numero elevato per ogni impianto [26]. Il processo di progressivo intasamento in questi dispositivi costituisce un problema difficile, poiché si verifica in profondità entro l'acquifero, in zone non direttamente accessibili: l'intasamento deriva soprattutto dalla deposizione dei materiali fini portati in sospensione dall'acqua superficiale iniettata. L'intervento più efficace contro il progressivo intasamento è un trattamento preventivo dell'acqua di immissione. Tuttavia, una lenta diminuzione della permeabilità si verifica quasi sempre. Essa può comunque essere eliminata con lo spurgo periodico dei pozzi mediante pistonnaggio. È conveniente che i dispositivi di iniezione, unici adatti all'alimentazione di falde profonde, nonché alla ricarica di acquiferi in roccia, siano alimentati con acque di qualità prossima a quella potabile per evitare complesse ed impegnative operazioni di manutenzione: le acque utilizzate sono quindi generalmente pretrattate [25].

I bacini di dispersione

Il sistema più usato per la ricarica superficiale consiste in bacini di dispersione profondi alcuni metri e di superficie variabile [26]. I bacini di dispersione sono generalmente utilizzati per la ricarica artificiale di falde freatiche alloggiato entro acquiferi alluvionali sabbioso-ghiaiosi, dove la superficie freatica si trova da pochi metri ad alcune decine di metri al di sotto del fondo del bacino. Lo spes-

sore del mezzo insaturo che separa il fondo del bacino dalla superficie freatica gioca un ruolo fondamentale nei processi di depurazione microbiologica dell'acqua utilizzata per la ricarica.

L'inconveniente che si verifica nei bacini di dispersione è il progressivo intasamento della superficie disperdente; tale intasamento ha come effetto una riduzione della capacità di filtrazione del fondo del bacino al trascorrere del tempo. L'intasamento è prodotto dalla sedimentazione dei materiali fini in sospensione nell'acqua utilizzata e quindi dipende dalla qualità dell'acqua di alimentazione e dalle caratteristiche del terreno. Attualmente il procedimento più usato per ridurre il problema dell'intasamento progressivo è rappresentato dalla pulizia periodica del fondo e delle scarpate delle vasche disperdenti, mediante asportazione e sostituzione del materiale intasato, per uno spessore fino a 1 m.

Gli impianti a manutenzione periodica sono costituiti generalmente da due o più vasche di dispersione che lavorano alternativamente, consentendo la pulizia periodica alternata, senza interrompere l'immissione d'acqua alle falde.

La scelta del tipo di dispositivo di alimentazione artificiale dipende dallo scopo da raggiungere e da molteplici fattori [25]:

- disponibilità di acqua per la ricarica;
- caratteristiche chimico-fisiche dell'acqua di ricarica;
- caratteristiche chimiche dell'acqua di falda;
- spessore e permeabilità del terreno sovrastante la falda;
- spessore e permeabilità della falda;
- differenza di quota tra la superficie d'acqua di falda e d'acqua di ricarica;
- topografia della zona considerata.

É evidente che la disponibilità costante o periodica di acqua per la ricarica è il primo requisito che deve essere soddisfatto per la riuscita dell'operazione.

Anche le proprietà chimico-fisiche dell'acqua di ricarica sono molto importanti e ciò per diverse ragioni: la qualità chimica dell'acqua superficiale deve essere compatibile con quella di falda in modo da evitare il più possibile eventuali reazioni chimiche che possono causare una diminuzione della permeabilità del terreno; inoltre l'acqua superficiale deve essere priva di solidi in sospensione per evitare il più possibile fenomeni di intasamento.

L'acquifero, inoltre, deve avere una permeabilità e spessori sufficientemente alti in modo da poter assorbire grandi quantità di acqua. In particolare, la permeabilità e lo spessore dello strato sovrastante la falda sono due fattori molto importanti che influenzano enormemente il tipo di ricarica e la sua efficacia. Quando tali terreni hanno basse permeabilità e/o grandi spessori, conviene operare con una ricarica di tipo profondo, cioè tramite pozzi; nel caso contrario di terreni molto permeabili e/o di piccolo spessore si può operare con una ricarica di tipo superficiale.

Un ulteriore fattore da considerare è la differenza di quota tra la superficie freatica e il pelo libero dell'acqua di ricarica: il livello d'acqua in falda deve essere inferiore a quello dell'impianto di ricarica, in quanto tale differenza è la forza motrice che permette l'infiltrazione.

Infine, è molto importante anche la topografia della zona interessata, specialmente se si opera con ricarica superficiale mediante bacini e si necessita quindi di grandi superfici pianeggianti.

2.3.2 I fattori che influenzano la ricarica

La possibilità di effettuare la ricarica artificiale dipende da numerosi fattori, che riguardano sia il terreno, sia l'acqua di falda, sia l'acqua di ricarica, e che si possono suddividere in diverse categorie [29]:

- *fattori geologici e idrogeologici*: affinché la ricarica sia possibile ed efficace, sono necessari valori adeguati di permeabilità del sottosuolo, in modo

che sia facilmente consentita l'infiltrazione dell'acqua. Comunemente, nel ricaricare acquiferi in materiali sciolti, può essere sufficiente osservarne granulometria ed uniformità, ma ci sono esempi di ricarica in acquiferi rocciosi fratturati dove tale analisi non è sufficiente. La falda contenuta nel sottosuolo deve possedere direzioni, velocità di deflusso e regime idonei alla ricarica, che consentano di raggiungere lo scopo desiderato. In alcuni casi può anche essere utile osservare la composizione mineralogica dell'acquifero, per rendere minimo il rischio di compromettere con l'acqua di ricarica l'equilibrio esistente tra l'acqua di falda e il terreno;

- *fattori idrologici*: è necessario valutare la presenza e la disponibilità di acqua in prossimità dell'impianto di ricarica; la quantità d'acqua disponibile deve essere compatibile col progetto di ricarica elaborato e adeguato alle possibilità d'infiltrazione dell'acqua stessa nel sottosuolo. Inoltre l'acqua deve essere disponibile per un periodo di tempo sufficiente, in modo che la ricarica prodotta sia efficace e duratura;
- *fattori chimico-fisici*: devono essere valutate le caratteristiche chimico-fisiche dell'acqua di ricarica, e la conseguente compatibilità di questa con l'acqua di falda. Come fattori fisici si valutano soprattutto temperatura, pH e contenuto di solidi in sospensione, mentre per gli aspetti chimici si osservano i contenuti in sali e gas disciolti. Particolare attenzione viene posta alla torbidità dell'acqua di ricarica, perché l'intasamento delle strutture dispersive a causa dei materiali fini richiede laboriose manutenzioni.

2.3.3 Problemi di intasamento

Ogni impianto di ricarica artificiale tende, con il tempo, a ridurre la propria potenzialità, cioè diminuisce l'intensità d'infiltrazione. Tali inconvenienti sono dovuti principalmente alle complesse reazioni che intervengono tra l'acqua di ricarica, il terreno (insaturo e saturo) e l'acqua di falda. Le cause d'intasamento possono essere di natura meccanica, fisica, chimica e biologica [25].

Processi meccanici

L'intasamento di natura meccanica è prodotto dalla presenza di solidi in sospensione nell'acqua di ricarica, i quali tendono ad incunarsi nei vuoti tra i grani del terreno. Tale processo interessa generalmente solo la prima parte del terreno, per uno spessore di qualche decina di centimetri, ed è più intenso negli impianti funzionanti con acqua stagnante o ferma, rispetto a quello che si ha negli impianti ad acqua corrente.

Processi fisici

In questo caso il principale fattore d'intasamento è la temperatura dell'acqua di ricarica, che generalmente è diversa da quella del terreno e dell'acqua di falda. Le variazioni di temperatura dell'acqua di falda, che si manifestano soprattutto nelle immediate vicinanze della zona di ricarica, possono causare diversi fenomeni:

- variazione della viscosità e della densità dell'acqua di falda con conseguente variazione della conducibilità idraulica del terreno (essa aumenta se si ha un riscaldamento dell'acqua, mentre diminuisce in caso contrario);
- modifiche nelle condizioni di vita dei microrganismi contenuti in falda;
- precipitazione di alcuni composti chimici.

Processi chimici

Le differenze nella composizione chimica dell'acqua di falda e di quella di ricarica possono provocare delle reazioni che alterano la conducibilità idraulica del terreno:

- la trasformazione di composti ferrosi (solubili) in composti ferrici (insolubili) in seguito ad azione ossidante;
- rigonfiamento e flocculazione delle particelle argillose contenute nel terreno, in seguito a scambi ionici quando l'acqua di ricarica contiene materiale organico o ioni di sodio.

In ogni caso le reazioni chimiche (ossidazioni, riduzioni, scambi ionici) comportano molto spesso la formazione di composti insolubili che precipitando intasano gradualmente il terreno riducendone la conducibilità idraulica (precipitazione del carbonato di calcio, di solfati e idrossidi di calcio, bario, stronzio, magnesio, composti di ferro e manganese). Tali processi però sono in genere abbastanza lenti.

Processi biologici

Appartengono a questo tipo di processi la crescita e lo sviluppo di alghe e di particolari batteri [27]. Le alghe trovano condizioni favorevoli per lo sviluppo specialmente durante il periodo estivo e quando gli impianti sono a funzionamento continuo; la loro eliminazione fa ritornare l'impianto alla sua efficienza originaria. La presenza di ossigeno nell'acqua di ricarica favorisce la crescita di batteri; questi ultimi provocano a loro volta un aumento di anidride carbonica nell'acqua, con conseguente aumento della sua aggressività. Se però la ricarica viene sospesa e quindi l'ossigeno si esaurisce, le colonie batteriche si autodistruggono ed il terreno torna alle condizioni originarie, o quasi. Per questo motivo è consigliabile operare a periodi alterni di ricarica e di sosta.

2.3.4 Esempi di ricarica artificiale

Nel mondo l'utilizzo della ricarica artificiale non è idea recente, e se ne possono trovare esempi anche agli inizi del 1900, segno che è noto e rilevante il problema del mantenimento e della conservazione delle acque sotterranee, sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo [25] [28].

- In California il primo impianto di ricarica artificiale risale al 1895 e negli anni '80 se ne potevano contare già più di 300, che immettevano nel sottosuolo complessivamente una portata di circa $60 \text{ m}^3/\text{s}$.

Uno di questi impianti venne realizzato nella Central Valley, una delle più grandi valli alluvionali al mondo, per evitare costosi processi di depurazione e redistribuzione dell'acqua a città e industrie. L'impianto, costituito da 10

bacini di ricarica e attentamente monitorato da pozzi, piezometri e stazioni meteorologiche (allo scopo di valutare l'evaporazione), fu in grado di disperdere nel sottosuolo $56400 \text{ m}^3/\text{d}$, corrispondenti a $0,65 \text{ m}^3/\text{s}$. La trasformazione ecologica dell'area, che da zona semiarida diventò zona acquatica, creò però alcuni problemi.

- In Francia, nell'impianto predisposto a Bale sulle alluvioni glaciali del Reno, le portate venivano prelevate da un fiume vicino, in un tratto con acque di discreta qualità, e incanalate attraverso un sistema di fossati a 4 bacini di ricarica; fossati e bacini erano coperti da uno strato di ghiaia per limitare l'intasamento, che comunque si è in seguito verificato ed ha reso necessari interventi di pulizia. La ricarica è stata di circa $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$; essa serviva soprattutto a mantenere, a valle dell'impianto dove il fiume era invece inquinato, la superficie freatica oltre l'altezza idrometrica del fiume stesso. In questo modo il fiume era impossibilitato a disperdere la sua acqua inquinata nel sottosuolo. Venne così raggiunto un doppio risultato: di ricarica della falda e di miglioramento qualitativo dell'acqua sotterranea.
- In Israele è stato messo a punto un sistema di ricarica artificiale entro un acquifero sabbioso e di calcari e dolomie fratturate, che immette nel sottosuolo tramite pozzi circa $10 \text{ m}^3/\text{s}$; l'acqua proviene, attraverso una derivazione, dal Lago di Tiberiade. In questo modo la qualità dell'acqua sotterranea, ad elevato contenuto salino, viene migliorata e vengono ostacolate le intrusioni saline.
- In Germania divenne necessaria la ricarica artificiale nel bacino della Ruhr a causa dell'intasamento di pareti e fondo dell'alveo fluviale e per l'elevato inquinamento. Già nel 1935 si procedette a ricaricare la falda attraverso bacini, dopo pretrattamenti dell'acqua (clorazione e decantazione); successivamente si rese indispensabile predisporre dei filtri in ghiaia per l'eccessivo intasamento che si verificava a causa dei processi biologici.

Nel mondo sono noti numerosi altri esempi di ricarica artificiale della falda, soprattutto negli USA, ma anche in Svezia, Brasile, Gran Bretagna e Spagna.

In Italia, sono invece noti solo progetti a scopo di studio e ricerca: la dispersione che si potrebbe ottenere attraverso l'uso dei siti scavati è stata quantificata durante l'esperienza di ricarica artificiale nel trevigiano nel 1989 [29]. Qui sono state predisposte due vasche di dispersione di dimensioni pressochè uguali (30×30 m in superficie, 10×10 m sul fondo, con profondità di $5,5$ m). Sono state effettuate più prove di diversa durata e con diverso carico in vasca; queste prove hanno permesso di calcolare una dispersione compresa tra i $40 \div 50$ l/s (nel corso della prova di durata 12 giorni e con carico in vasca di $100 \div 130$ cm) e i $130 \div 180$ l/s (nel corso della prova di durata 39 giorni e con carico in vasca di $520 \div 550$ cm). La portata specifica dispersa mediamente attraverso il fondo del bacino è risultata di $0,1$ l/(s · m²).

2.3.5 Tipologia degli interventi di ricarica

La necessità, da più parti manifestata, di effettuare nuovi prelievi ad uso acquedottistico, deve essere obbligatoriamente preceduta dagli interventi per ricaricare la falda con lo scopo di conseguire un duplice obiettivo:

- frenare, possibilmente invertire, l'attuale tendenza al progressivo abbassamento dei livelli freatici e piezometrici degli acquiferi vicentini;
- compensare i nuovi prelievi che il Piano d'Ambito dell'A.A.T.O. Bacchiglione ha previsto tra l'Astico ed il Brenta e che sono stati indicati in circa $1,2$ m³/s.

Questi interventi, per risultare efficaci soprattutto per il complesso delle falde artesiane presenti nei comuni di Caldogno, Dueville, Monticello C. Otto e Vicenza, dovranno essere realizzati in zone di alta pianura. In particolare, gli impianti per la ricarica artificiale si dovranno posizionare a monte della linea di imbocco degli acquiferi in pressione, ad una distanza non inferiore a $2 \div 3$ km dalla stessa, preferibilmente laddove lo spessore insaturo è maggiore di $35 \div 40$ m.

Studi effettuati in passato hanno ipotizzato che questo limite possa trovarsi lungo l'allineamento: S. Vito di Leguzzano - Molinetta - Molina (Malo) - località S. Anna e Marascare (Dueville) - Mirabella (Breganze). La posizione di questa linea di imbocco degli acquiferi profondi è stata confermata durante la fase di ricostruzione del modello geostrutturale (capitolo 3).

Per conseguire l'obiettivo sopra richiamato di accrescere i fattori di ricarica della falda si può fare ricorso quanto meno a tre tipologie di intervento:

1. mediante l'utilizzo delle canalette di adduzione e distribuzione delle acque irrigue della rete gestita dai consorzi di bonifica e che oggi è in parte in via di dismissione a seguito della conversione dei sistemi di irrigazione verso il pluvio-irriguo;
2. mediante l'utilizzo di aree appositamente individuate e trasformate a colture di tipo arboreo in cui immettere acqua, attraverso una rete di canali di distribuzione organizzati con quote e pendenze opportune (A.F.I., ossia aree forestali di infiltrazione);
3. mediante l'utilizzo di ex-cave o di nuovi siti estrattivi appositamente allestiti con l'intento di assolvere alla duplice funzione di laminare le piene dei corsi d'acqua a carattere torrentizio, ma soprattutto di accumulare acqua da rilasciare poi nel sottosuolo.

Utilizzo della rete irrigua

Gli Studi di Dal Prà, hanno evidenziato che la portata infiltrata nel sottosuolo dal fondo dei canali irrigui non rivestiti, nelle zone di alta pianura è pari a circa $8 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{km})$. Ciò significa che, per garantire una portata di infiltrazione di $1 \text{ m}^3/\text{s}$, è necessario poter disporre di circa $120 \div 130 \text{ km}$ di rogge. L'attuale tendenza da parte dei Consorzi di irrigazione e bonifica di sostituire il tradizionale sistema di irrigazione a scorrimento con quello più efficiente denominato a pioggia, comporta un'inevitabile perdita dell'importante contributo dato dalle acque irrigue alla ricarica della falda. Peraltro ciò non impedisce che, nei periodi non irrigui, la

vecchia rete di adduzione e distribuzione delle acque, che nell'area di alta pianura è articolata in centinaia di chilometri, possa essere restituita al fondamentale ruolo di sistema di ricarica artificiale della falda. Per rendere possibile questa funzione è necessaria, sia da parte dei Consorzi di irrigazione e bonifica, sia da parte degli operatori agrari i cui terreni sono attraversati dalle canalette irrigue, l'assunzione di precisi impegni in merito alla periodica manutenzione e pulizia del fondo delle canalette irrigue dismesse e sostituite dai sistemi di adduzione mediante condotte forzate, per mantenerne inalterata la capacità disperdente. Sarà necessario predisporre protocolli di intesa e convenzioni tra i diversi soggetti interessati che prevedano una costante manutenzione del fondo delle canalette per asportare i materiali fini, privilegiando per questo tipo di intervento, i canali non rivestiti situati a monte della linea di imbocco degli acquiferi profondi.

Utilizzo di aree boscate - A.F.I.

Un ulteriore sistema per aumentare la capacità di infiltrazione delle acque può essere rappresentato dalla loro distribuzione, anche in questo caso nei mesi non irrigui, all'interno di aree boscate. Ciò richiede l'individuazione di siti particolarmente idonei da riconvertire verso colture di tipo arboreo in cui immettere acqua, nei mesi non irrigui, attraverso una rete di canali di distribuzione organizzati con quote e pendenze opportune. Per le stesse considerazioni sviluppate precedentemente, i siti più idonei dove realizzare sistemi di ricarica nell'ambito di progetti di forestazione, sono da ricercare nel territorio dei comuni di Breganze, Schio, Thiene e Marano. Un'iniziativa di questo genere è allo studio nell'area del bosco planiziale di proprietà del comune di Rosà, situato in località Le Prese (in comune di Tezze sul Brenta).

Utilizzo di siti di cava

Sperimentazioni condotte nell'autunno-inverno 2001-02 e 2003-04, utilizzando il sito della ex-cava Ferraro, hanno confermato la possibilità di riconvertire i siti di cava non più attivi verso un uso alternativo, di elevata valenza sociale

ed ambientale, rispetto all'impianto di discarica, che oggi non può e non deve essere in contrasto con quanto previsto dal PRAC (D.G.R. 3121/2003). Con una prima serie di prove, grazie anche al regime idrico particolarmente favorevole del torrente Astico e delle rogge da esso derivate, è stato possibile immettere in cava una portata idrica di $200 \div 250$ l/s per circa 6 mesi, corrispondente ad un volume complessivamente disperso pari a $3 \div 3,5$ milioni di m^3 . Tutta l'acqua immessa nel fondo della ex-cava si è agevolmente infiltrata nel sottosuolo, interessando peraltro solo le porzioni di cava a quote più ribassate.

2.4 Utilizzo dei siti di cava

Le attività estrattive presenti nella zona di studio prelevano materiali inerti dal sottosuolo ghiaioso attraverso cave a cratere molto profonde. Questi crateri presenti nel sottosuolo possono facilmente diventare bacini di dispersione a scopo di ricarica artificiale, nel momento in cui sia possibile immettervi acqua con una certa facilità [28]. Il vantaggio delle cave presenti nell'Alto Vicentino sta nelle loro dimensioni: alcune raggiungono i 30 *m* di profondità (e raramente sono inferiori a 10 *m*) e arealmente occupano superfici anche di alcune centinaia di migliaia di *m*². Buona parte delle cave esistenti nell'area oggetto del presente studio sono situate all'interno dell'area di ricarica della falda, per cui si suppone che vi sia continuità nei materiali dello spessore insaturo (cioè tra il fondo della cava e la superficie freatica). Un censimento delle cave del 1987 aveva individuato circa una sessantina di siti adibiti a cava, o a discarica o ad attività di lavaggio delle ghiaie; alcuni siti erano già abbandonati, altri in escavazione, altri ancora in fase di riempimento come discariche. Numerosi di questi siti non sono ora più rilevabili sul territorio, perchè colmati o ripristinati ad uso agricolo; sopra alcuni di essi ora sorgono stabilimenti produttivi (per esempio, alcuni stabilimenti della zona industriale di Schio). In Tabella 2.6 sono elencati i siti estrattivi presenti nel territorio in esame, che prendono il nome dalla località in cui si trovano. Oltre alla località sono indicati il comune di appartenenza e la ditta che li ha in concessione. La localizzazione dei siti nel territorio è invece visualizzata in Figura 2.29.

Tuttavia, affinché questa attività di ricarica risulti efficace, i siti devono necessariamente soddisfare alcuni requisiti:

1. il sito deve trovarsi nella zona di ricarica, individuata dal materasso alluvionale ghiaioso-sabbioso indifferenziato presente a nord della linea di comparsa della prima lente a bassa permeabilità, ossia a nord dell'imbocco degli acquiferi profondi. E' evidente che qualsiasi intervento di ricarica, per poter contribuire alla ricarica degli acquiferi profondi, debba ricadere nella zona di ricarica;

2. il sito deve avere una superficie tale da giustificare l'utilizzo per la ricarica;
3. non deve essere presente attività di discarica, o, in alternativa, questa deve interessare un'area limitata e adeguatamente impermeabilizzata;
4. la profondità dello scavo deve essere ad una quota superiore di almeno 10 *m* rispetto al massimo innalzamento della falda sottostante;
5. il sito deve trovarsi a distanza ragionevole dai corsi d'acqua dai quali derivare le portate idriche da infiltrare e nei quali eventualmente restituire, a valle dell'impianto, le portate idriche in eccesso.

A partire da queste condizioni, sono stati selezionati 15 siti idonei alla ricarica artificiale; per ognuno dei siti estrattivi potenzialmente utilizzabili per la ricarica di tipo industriale è stata compilata una scheda monografica le informazioni utili alla stesura di una graduatoria della idoneità/compatibilità alla ricarica (dati generali della cava, provvedimenti autorizzativi, termini temporali, stato attuale, caratteristiche dimensionali, informazioni relative all'attività di ricarica). Le schede sono riportate in **Appendice C**. Al fine di ricaricare in modo equilibrato gli acquiferi alimentati dai diversi sistemi idrografici dell'Alto Vicentino (sistema Leogra-Timonchio, sistema Astico nel tratto Piovene-Caltrano, sistema Astico nel tratto Sarcedo-Montecchio Precalcino) sarebbe opportuno individuare al minimo un sito per ognuno dei tre sistemi indicati. I siti che sono risultati maggiormente idonei alla ricarica artificiale della falda sono:

- per il Sistema Leogra- Timonchio: Cava Vianelle,
- per il Sistema Astico nel tratto Piovene-Caltrano: Cava Colombara (Bai),
- per il Sistema Astico nel tratto Sarcedo - Montecchio Precalcino: Cava Casoni, Cava Quartieri e Cava Levà (Ferraro).

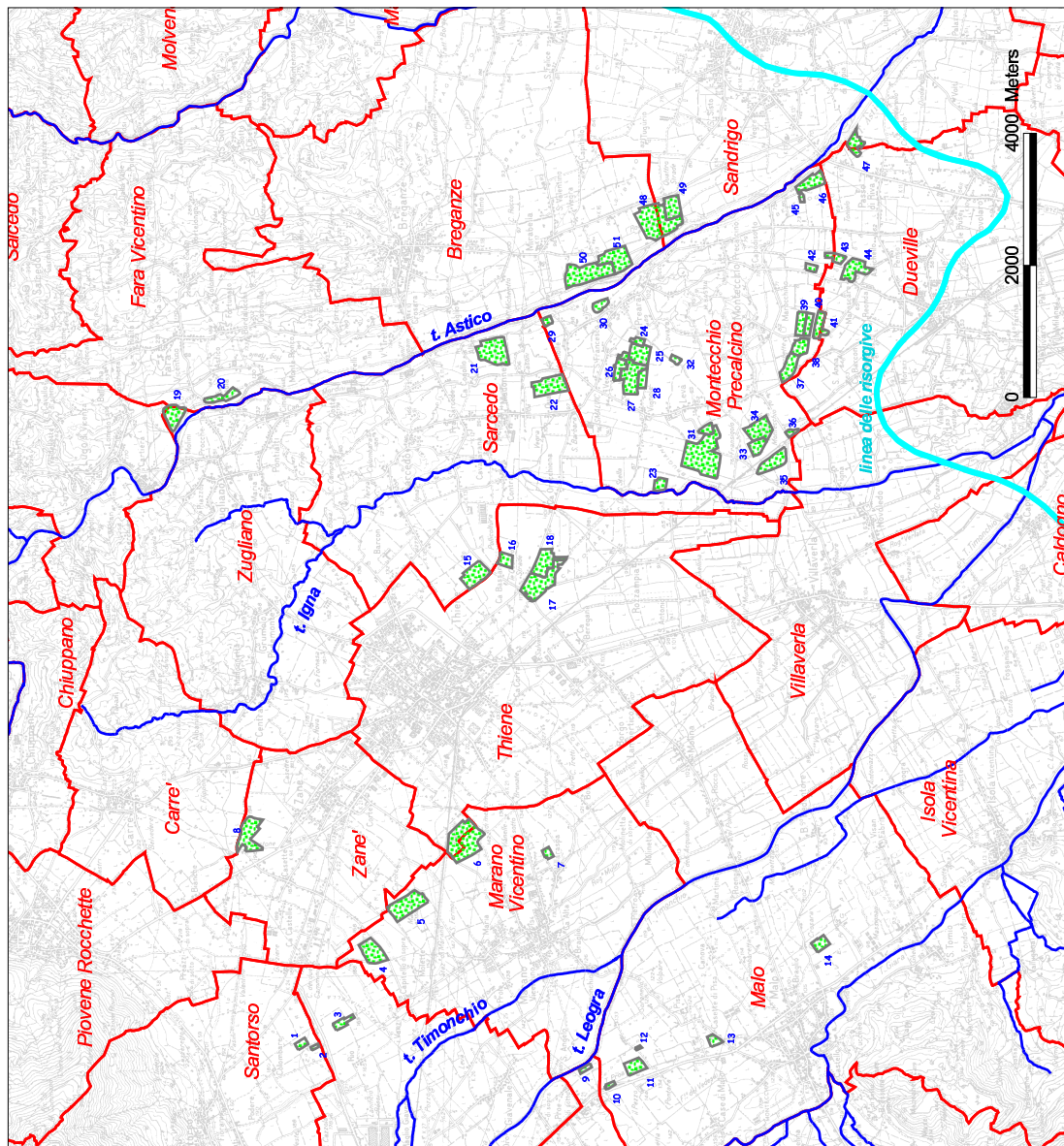


Figura 2.29: Siti estrattivi dell'Alto Vicentino.

Tabella 2.6: *Siti estrattivi dell'Alto Vicentino.*

NUMERO	COMUNE	LOCALITÀ	DITTA
1	Santorso	Colombare	Pierantoni S.p.A.
2	Santorso	Colombare	Pierantoni S.p.A.
3	Schio	Macchiavella	Ruaro-Dal Santo
4	Marano Vicentino	Vegli	Comune Marano
5	Marano Vicentino	Brogiane	Vaccari S.p.A.
6	Marano Vicentino	Vianelle	EGI Zanotto
7	Marano Vicentino	Villaraspa	Dal Santo F.lli
8	Zanè	Colombara-Bai	Betonrossi S.p.A.
9	S. Vito Leguzzano	Proe	Grotto Sergio
10	Malo	Rivalta	Grotto Adriano
11	Malo	Sorano	Grotto Adriano
12	Malo	Sorano	
13	Malo	Casette Pisa	Comune Malo
14	Malo	Cà Crosara	
15	Sarcedo	Giberte	Adige Bitumi S.p.A.
16	Thiene	Cà Orecchiona	EGI Zanotto
17	Thiene	Ranzolin-Rozzampia	SIG S.p.A.
18	Thiene	Ranzolin	Calcestruzzi S.p.A.
19	Zugliano	Molini	Selgea+Calcestruzzi S.p.A.
20	Fara Vicentino	Isola	Selgea+Calcestruzzi S.p.A.
21	Sarcedo	Casoni	Girardini S.p.A.
22	Sarcedo	Quartieri	SIG S.p.A.
23	Montecchio Precalcino	Igna-Levè-Ferraro	Carta Isnardo
24	Montecchio Precalcino	Campassi-Palugara	F.lli Rigon
25	Montecchio Precalcino	Campassi-Cavedagnona	Seganfreddo
26	Montecchio Precalcino	S. Francesco	Guarda
27	Montecchio Precalcino	Vignole	Martini S.p.A.
28	Montecchio Precalcino	Vegre	Girardini S.p.A.
29	Montecchio Precalcino		
30	Montecchio Precalcino	Preara	Vaccari S.p.A.
31	Montecchio Precalcino	Levè	Carta Isnardo
31	Montecchio Precalcino	Levè	Carta Isnardo
32	Montecchio Precalcino	Campassi	Thiene Giacomo
33	Montecchio Precalcino	Terraglioni	EGI Zanotto
34	Montecchio Precalcino	Terraglioni	EGI Zanotto
35	Montecchio Precalcino	Terraglioni	EGI Zanotto
36	Montecchio Precalcino	Terraglioni	EGI Zanotto
37	Montecchio Precalcino	Selgaroni	Amm.ne Prov.le
38	Montecchio Precalcino	Selgaroni	Amm.ne Prov.le
39	Montecchio Precalcino	Selgaroni	Amm.ne Prov.le
40	Montecchio Precalcino	Selgaroni	Amm.ne Prov.le
41	Montecchio-Dueville	Grumello	Panozzo
42	Montecchio Precalcino	Cà Fusato	Doppieri
43	Montecchio-Dueville	Astichello	
44	Dueville	Astichello	Gallo+Cooperativa
45	Montecchio Precalcino	Bentivoglio	SIG S.p.A.
46	Montecchio Precalcino	Bentivoglio	SIG S.p.A.
47	Dueville-Sandrigo	Giaroni	SIG S.p.A.
48	Sandrigo-Breganze	Mirabella	Girardini S.p.A.
49	Sandrigo	Termini	SIG S.p.A.
50	Breganze	Mirabella	Vaccari S.p.A.
51	Breganze	Mirabella	Girardini S.p.A.

2.4.1 Oscillazioni della falda

Lo spessore del terreno insaturo in corrispondenza dei siti estrattivi è dato dalla differenza tra la quota assoluta del piano campagna (ricavata dal Modello Digitale del Terreno - DTM) e la quota assoluta della falda, relativa ad un certo istante temporale (ottenuta dall'interpolazione spaziale mediante kriging con trend lineare a partire dai valori misurati durante le diverse campagne di misura) in corrispondenza del punto centrale della cava in diversi istanti temporali. Analogamente, lo spessore insaturo reale è pari alla differenza tra la quota assoluta del fondo cava e la quota assoluta della falda, relativa ad un certo istante temporale. Per la valutazione dello spessore insaturo massimo e minimo vengono utilizzate le isofreatiche corrispondenti alle campagne di monitoraggio più vicine alla situazione di massimo e di minimo innalzamento della superficie freatica:

- campagna di monitoraggio di aprile 1977 (figura 2.30) in cui il livello freatico nel pozzo 27 di Caldogno ha registrato il massimo assoluto per il periodo 1971-oggi (55,29 *m* s.l.m.m., il 9 Maggio 1977);
- campagna di monitoraggio del 18-19 novembre 2003 (figura 2.31) in cui il livello freatico nel pozzo 27 di Caldogno ha registrato il minimo assoluto per il periodo 1971-oggi (48,44 *m* s.l.m.m., il 27 Ottobre 2003).

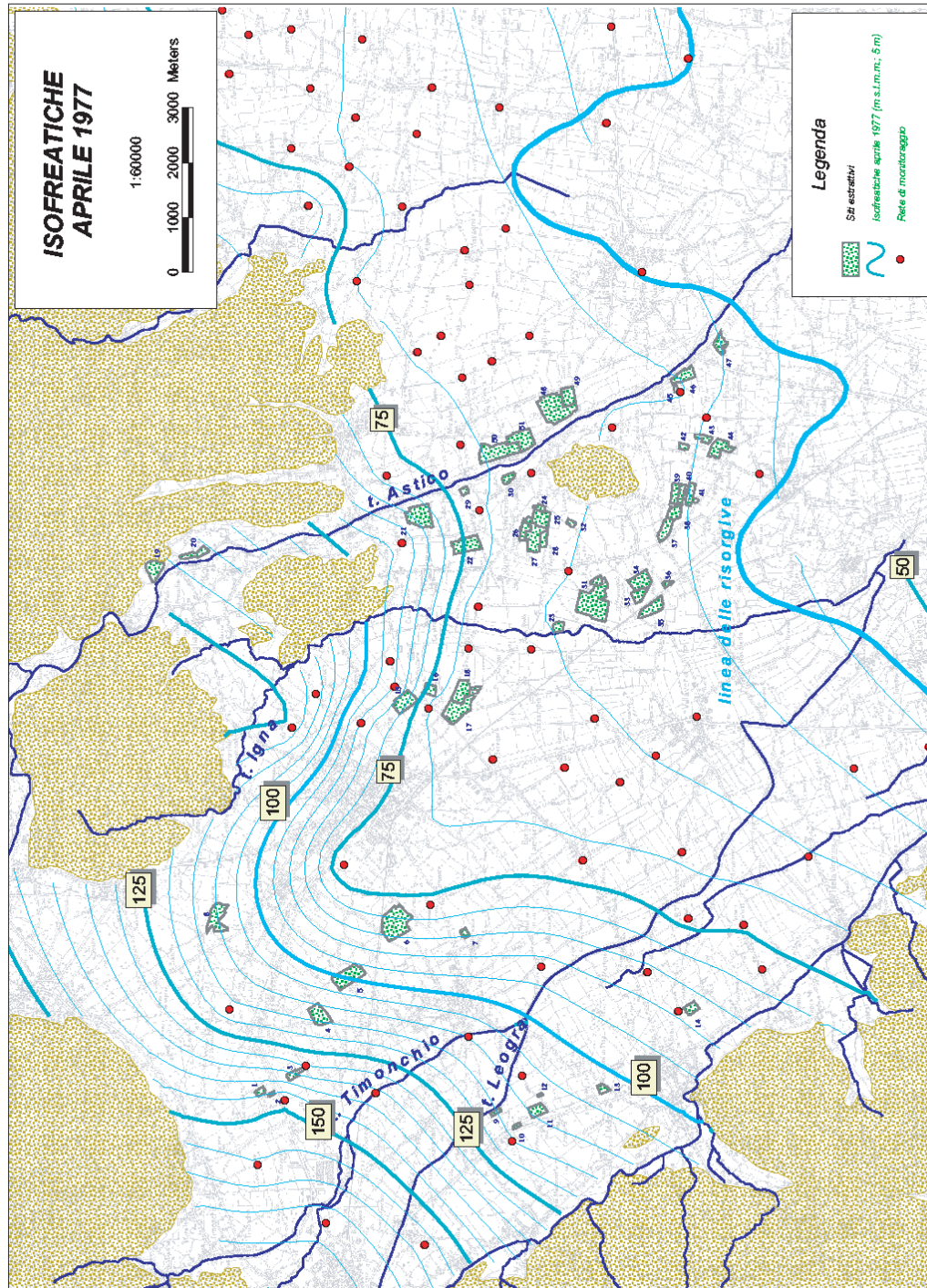


Figura 2.30: Isofreatiche, aprile 1977.

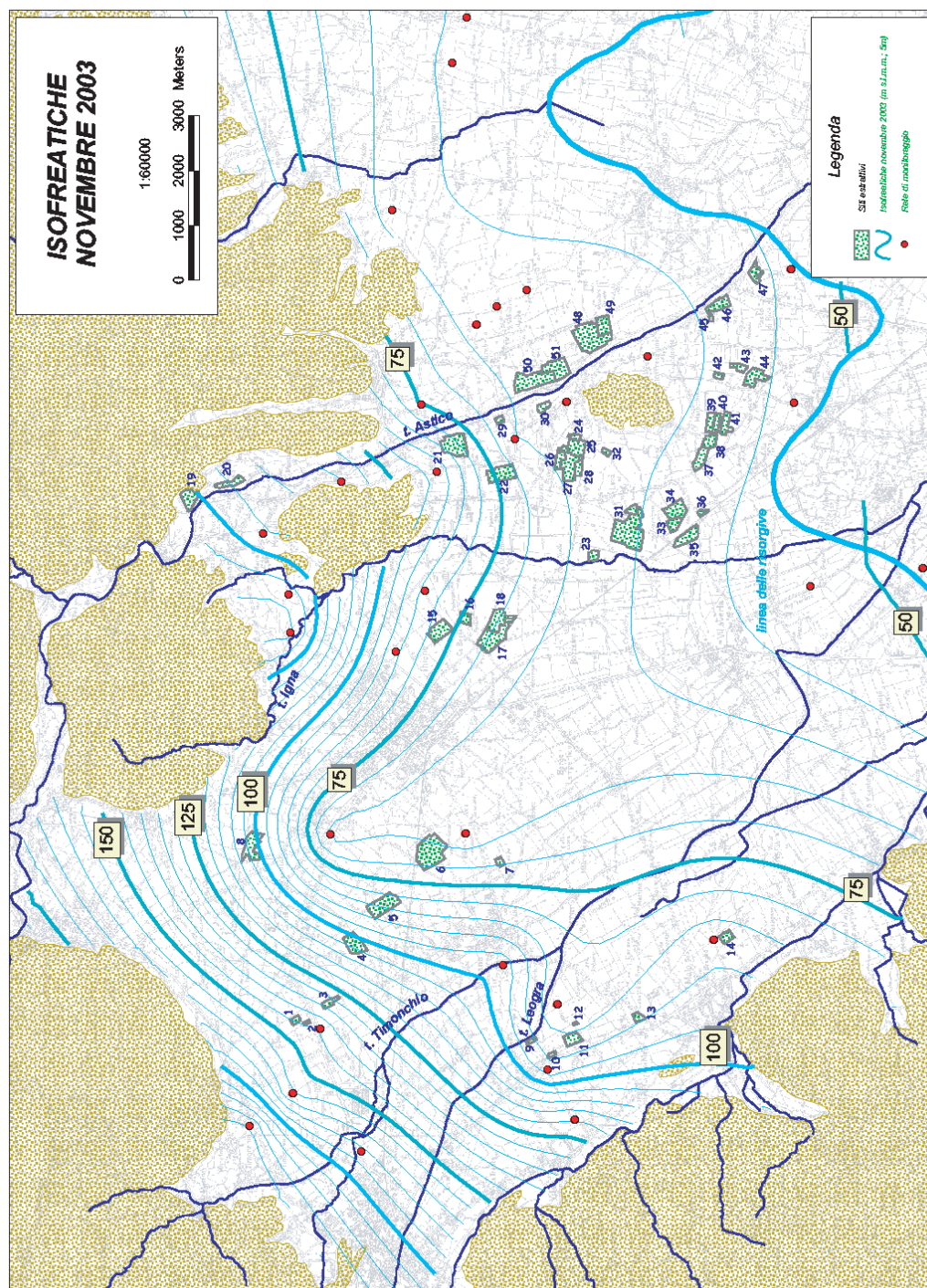


Figura 2.31: *Isofreatiche, novembre 2003.*

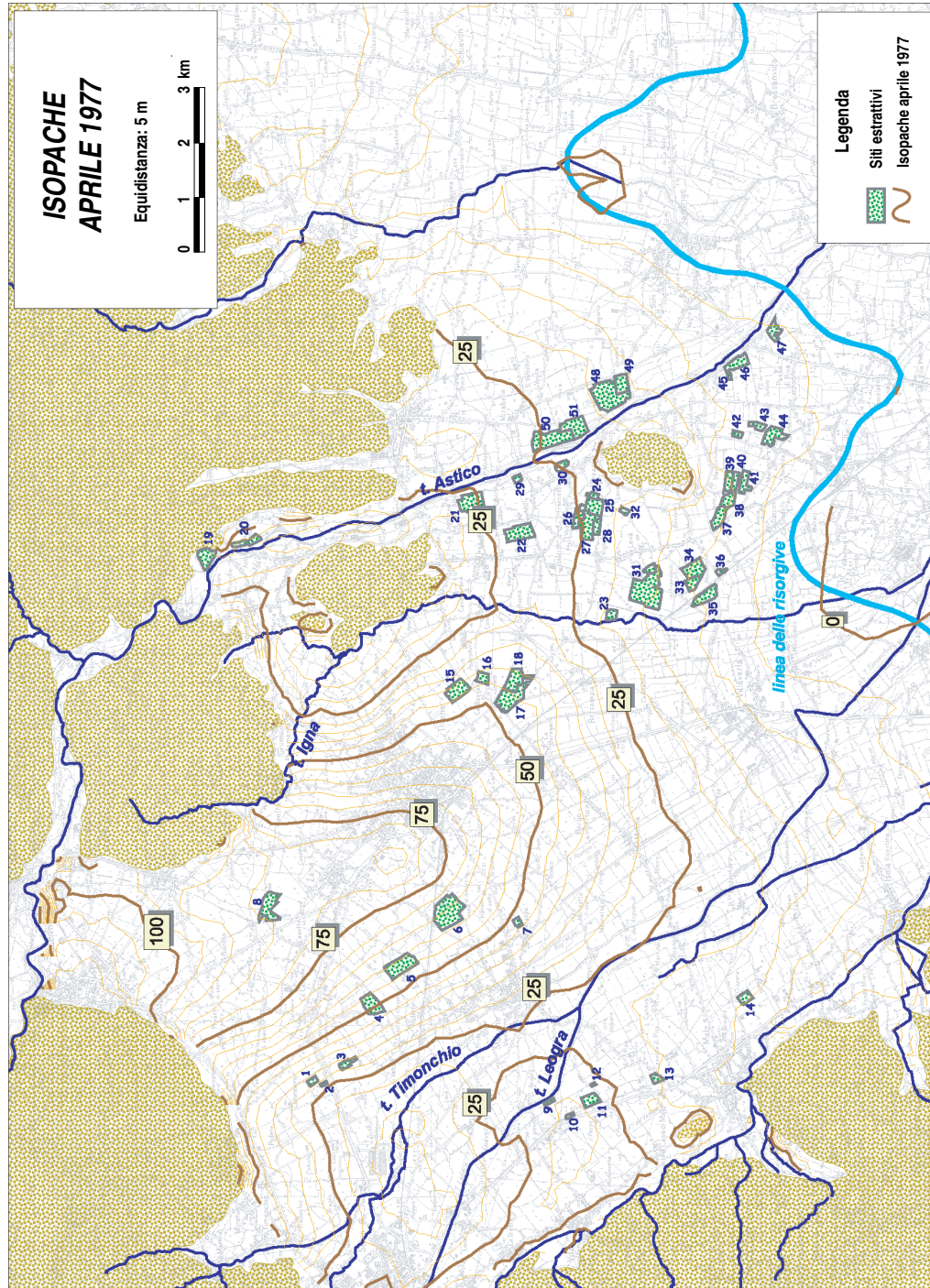


Figura 2.32: Isopache del materasso alluvionale soprastante la superficie di massimo innalzamento della falda: aprile 1977 [22].

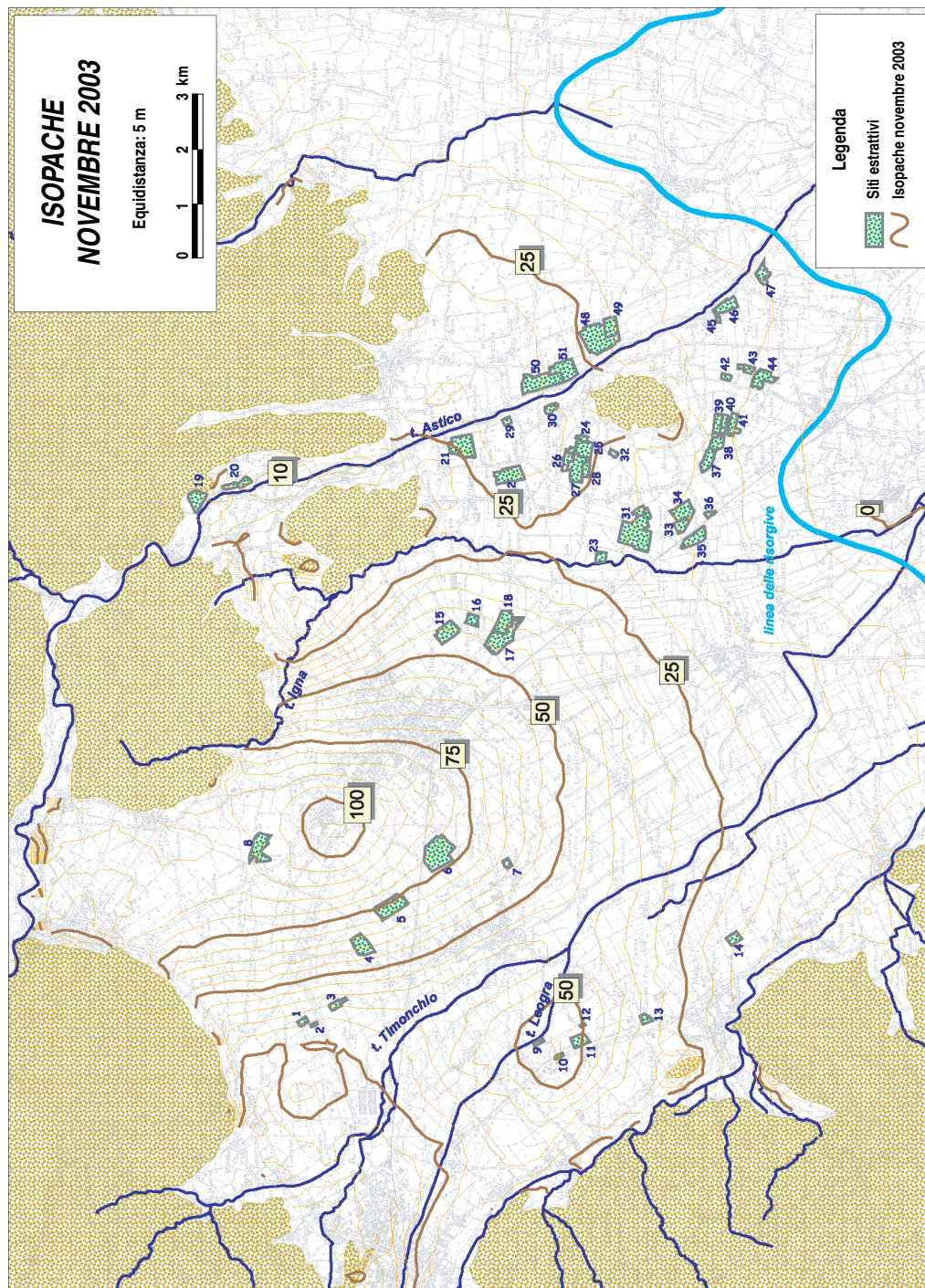


Figura 2.33: *Isopache del materasso alluvionale soprastante la superficie di minimo innalzamento della falda: novembre 2003 [22].*

Dall'analisi degli spessori del materasso insaturo sottostante i siti estrattivi, nelle condizioni di massimo e di minimo innalzamento della falda, si può osservare che i siti selezionati per la ricarica hanno uno spessore minimo (corrispondente al massimo innalzamento della falda) di almeno 20 metri dal piano campagna. Tuttavia risulta fondamentale la raccolta delle informazioni relative alla profondità dello scavo, per poter ricavare lo spessore insaturo reale o residuo. Si osserva, inoltre, che in alcuni casi lo spessore insaturo massimo risulta inferiore allo spessore insaturo minimo: questo è dovuto alla non perfetta sovrapposizione della serie dei pozzi di monitoraggio del livello della falda freatica nelle due campagne di misura. Di conseguenza, questa diversa localizzazione dei punti di appoggio per l'interpolazione spaziale del livello piezometrico registrato ha comportato delle difformità nell'andamento finale delle isofreatiche. Tuttavia, è possibile ricavare un valore almeno indicativo dello spessore insaturo sottostante (Tabella 2.7).

Tabella 2.7: Massimo e minimo innalzamento della falda e spessori dell'insaturo.

NUMERO	COMUNE	LOCALITA'	DISCARICA	PC	m s.l.m.m.	MINIMO INNALZAMENTO FALDA m s.m.m.		MINIMO INNALZAMENTO FALDA m s.m.m.		OSCIILLAZIONE (m)	PROFONDITA' SCAVO (m)	AREA (m ²)	AREA ha
						MASSIMO SPESSORE INSATURO (m)	INSATURO (NOV '03)	FALDA (NOV '03)	INSATURO (APR '77)				
1	Santorso	Colombare	Pierantoni Spa	173,65	28,06	145,59	27,04	146,61	1,02	6,370	19,234	1,9	
2	Santorso	Colombare	Pierantoni Spa	173,65	28,06	145,59	27,04	146,61	1,02	6,370	19,234	1,9	
3	Schia	Mechawalla	D	168,17	32,63	133,54	28,17	138,00	4,46	4,56	31,503	3,2	
4	Mariano Vicino	Vegri	Comune Mariano	164,83	61,00	103,83	51,47	113,36	9,88	20	97,882	9,8	
5	Mariano Vicino	Boianale	Vaccari Spa	156,61	70,27	86,34	55,37	101,24	14,90	20	143,231	14,3	
6	Mariano Vicino	Vignale	EG Zanotto	144,43	79,06	65,37	64,74	79,69	14,32	25	232,790	23,3	
7	Mariano Vicino	Villanova	D	139,99	61,50	69,49	46,60	84,38	14,90	20	18,253	1,8	
8	Zepè	Colombara	SEGEA Spa	102,02	88,51	109,70	81,83	109,70	7,88	20	12,0051	12,3	
9	S. Vito Leuzzano	Prese	Gonzo Senio	144,68	53,98	90,69	29,75	114,63	24,23	23	12,630	1,3	
10	Milano	Rhate	Grotto Adriano	144,97	55,20	89,77	31,65	113,32	23,55	25	10,106	1,0	
11	Milano	Sorano	Grotto Adriano	139,59	62,62	86,97	29,51	110,37	23,11	25	54,451	5,4	
12	Milano	Sorano	Grotto Adriano	139,59	62,62	86,97	29,51	110,37	23,11	25	36,94	3,7	
13	Milano	Caratteria	Comune Malo	122,81	35,21	87,61	20,83	101,99	22,27	25	25,242	2,5	
14	Milano	Ca Crovara	Comune Malo	102,79	44,50	88,20	14,59	89,20	0,00	30	38,809	3,9	
15	Saredo	Gabene	Miljo Biumi Spa	124,75	46,00	78,58	4,82	82,63	4,82	30	102,661	10,2	
16	Thiene	Ca Onchion	EG Zanotto	115,43	41,57	74,00	42,46	72,98	-1,09	30	37,910	3,8	
17	Thiene	Banzolin	SIG Spa	110,26	41,52	66,95	43,63	66,94	-4,37	30	163,196	16,3	
18	Thiene	Banzolin	Calenzuola Spa	107,94	37,98	68,94	40,98	67,16	-4,79	30	103,119	10,3	
19	Zugliano	Mohini	Stige-Calcistr.	138,20	11,28	128,95	15,82	122,38	-4,57	20	80,685	8,0	
20	Fan Vicentino	Isola	Stige-Calcistr.	133,80	14,65	119,15	17,20	116,60	-2,55	20	49,493	4,9	
21	Saredo	Casoni	Girardin Spa	108,76	24,80	83,96	23,26	85,50	1,54	21	15,448	1,5	
22	Saredo	Quartieri	SIG Spa	102,93	30,51	72,43	28,58	74,35	1,93	25	12,1626	1,2	
23	Montecchio Prec.	Leva	Carla Inarado	85,79	21,34	64,45	19,15	64,64	2,19	20	31,484	3,1	
24	Montecchio Prec.	Campassi	F.lli Rigoni	91,08	27,86	63,22	23,36	67,72	4,50	20	19,145	1,9	
25	Montecchio Prec.	Campassi	Segninfredo	89,10	22,54	66,56	22,54	66,56	3,58	20	83,388	8,3	
26	Montecchio Prec.	S. Francesco	Guida	91,76	27,66	64,10	24,82	66,84	2,84	20	41,767	4,2	
27	Montecchio Prec.	Vignole	Marini Spa	91,76	27,66	64,10	24,82	66,84	2,84	20	136,135	13,6	
28	Montecchio Prec.	Vegre	Girardin Spa	88,64	25,44	63,21	22,43	66,21	3,01	20	34,189	3,4	
29	Montecchio Prec.	Preara	Vaccari Spa	100,00	33,13	66,87	27,86	72,14	5,27	20	16,707	1,7	
30	Montecchio Prec.	Leva	Carla Inarado	92,34	29,12	63,22	23,25	69,09	5,87	16	30,576	3,1	
31	Montecchio Prec.	Leva	Carla Inarado	79,83	19,35	60,48	16,03	63,81	3,32	26	26,012	2,6	
32	Montecchio Prec.	Campassi	Thiene Giacomo	79,67	19,31	60,35	15,92	63,75	3,39	16	27,809	2,7	
33	Montecchio Prec.	Terragliani	EG Zanotto	85,47	23,06	62,41	19,64	65,83	3,42	18	14,239	1,4	
34	Montecchio Prec.	Terragliani	EG Zanotto	67,44	9,68	57,77	5,49	61,95	4,19	18	46,031	4,6	
35	Montecchio Prec.	Terragliani	EG Zanotto	67,44	9,68	57,77	5,49	61,95	4,19	18	96,730	9,7	
36	Montecchio Prec.	Terragliani	EG Zanotto	70,63	13,06	57,57	8,58	62,05	4,48	20	84,289	8,4	
37	Montecchio Prec.	Solaraioni	Amme Piovine	70,12	13,23	56,89	8,81	61,31	4,42	20	13,863	1,4	
38	Montecchio Prec.	Solaraioni	Amme Piovine	72,13	12,86	59,27	10,91	61,22	3,00	20	68,533	6,9	
39	Montecchio Prec.	Solaraioni	Amme Piovine	70,57	12,86	57,72	10,13	60,45	2,73	20	52,134	5,2	
40	Montecchio Prec.	Solaraioni	Amme Piovine	69,83	11,70	56,13	9,27	60,45	2,43	20	46,558	4,7	
41	Montecchio Dueville	Grumello	Panzoso	69,83	9,56	60,56	9,27	60,56	2,43	20	34,067	3,4	
42	Montecchio Prec.	Ca Fusato	Doppieri	66,64	11,96	59,60	7,04	61,58	2,52	20	54,647	5,5	
43	Montecchio Dueville	Aspello	Doppieri	71,09	11,43	61,58	9,50	61,58	2,46	20	17,027	1,7	
44	Dueville	Aspello	Salvo-Cogevantr	69,37	11,43	60,16	9,22	60,16	2,21	20	30,651	3,1	
45	Montecchio Prec.	Bentovello	SIG Spa	64,27	8,84	57,64	6,63	55,43	2,21	20	87,634	8,8	
46	Montecchio Prec.	Bentovello	SIG Spa	71,00	12,00	58,99	5,29	65,71	6,71	20	81,04	8,1	
47	Dueville-Sandigo	GLI Ononi	SIG Spa	71,14	12,44	58,70	6,39	64,74	6,05	20	71,764	7,2	
48	Sandigo-Sargano	Mirabella	Girardin Spa	65,85	9,61	60,65	5,20	60,65	4,41	20	42,252	4,2	
49	Sandigo	Termini	SIG Spa	84,97	22,09	62,88	18,49	66,68	3,60	20	28,264	2,8	
50	Bisanzane	Mirabella	Vaccari Spa	93,23	20,77	69,46	16,84	69,46	3,03	20	74,656	7,5	
51	Bisanzane	Mirabella	Girardin Spa	92,32	23,87	68,45	20,57	69,25	6,00	20	131,550	13,2	
51	Bisanzane	Mirabella	Girardin Spa	91,29	23,37	68,92	22,81	68,98	5,76	20	124,316	12,4	

Idonei per la ricarica della falda
Idonei per la laminazione delle piene

2.5 Prove sperimentali di ricarica forzata in cava

Le prove di ricarica forzata effettuate a partire dall'autunno-inverno 2001-2002, utilizzando il sito della ex cava Ferraro, hanno confermato la possibilità di riconvertire i siti di cava non più attivi verso un uso alternativo rispetto all'impianto di scarica, di elevata valenza sociale e, in prospettiva, anche ambientale. Durante la prima serie di prove, grazie anche ad una stagione favorevole, è stato possibile immettere in cava una portata idrica di $200 \div 250$ l/s per circa 6 mesi, corrispondente ad un volume complessivamente disperso pari a circa $3,0 \div 3,5$ milioni di m^3 . La portata idrica veniva derivata dalla roggia Franzana, mediante apposito manufatto realizzato dal Consorzio di Bonifica Medio Astico Bacchiglione. A tale volume va aggiunto quello disperso dal torrente Igna che, nello stesso periodo, è stato alimentato con una portata di circa 200 l/s, portata che veniva derivata dalla roggia Verlata all'altezza di Madonnetta di Sarcedo. Tutta l'acqua immessa nella ex cava si è infiltrata agevolmente nel sottosuolo, interessando peraltro solo le porzioni di cava a quote più ribassate. Va infatti ricordato che il fondo cava si presenta abbastanza irregolare e pertanto non risulta utilizzabile in modo ottimale. Al fine di valutare:

1. le portate idriche massime che possono essere disperse per m^2 di superficie filtrante, con carichi variabili da 0 a 1 m di battente,
2. l'effetto intasante sul fondo cava dovuto alla naturale torbidità dell'acqua che si infila,

si è reso necessario realizzare una seconda serie di prove, utilizzando una parte del fondo cava, opportunamente sistemata.

La fase sperimentale del presente studio è stata svolta nel periodo aprile-maggio 2006 nel sito sperimentale opportunamente approntato ubicato presso l'ex cava Ferraro nel comune di Montecchio Precalcino (cava numero 23 della figura 2.29). La cava, di proprietà della Carta Isnardo S.p.a., si trova nell'Alta

Pianura a Nord di Vicenza a ridosso del Torrente Igna. L'area appartiene, dal punto di vista geologico, alla potente conoide alluvionale del t. Astico ed è ubicata nella sua destra orografica. Essa occupa una superficie di circa 1,5 ha e possiede una profondità media di $7 \div 9$ m dal piano campagna (le quote del p.c. variano mediamente da 81 a 84 m s.l.m.m. mentre quelle del fondo cava da 74 a 75 m s.l.m.m.).

2.5.1 Approntamento del sito

Scopo della nuova serie di prove è la stima della capacità di infiltrazione del sito. A tal fine sono state realizzate due vasche di volume noto, con fondo regolare che consentono prove di riempimento e svuotamento in tempi ragionevoli con la portata a disposizione di circa 200 l/s. In particolare, le prove vengono condotte al fine di poter acquisire informazioni più precise riguardanti:

- l'effettivo innalzamento della superficie freatica sottostante il sito di ricarica;
- il valore del coefficiente di permeabilità del terreno e della velocità di infiltrazione;
- il valore della portata dispersa in funzione del grado di intasamento;
- l'entità della propagazione dell'intasamento in profondità, in funzione della portata dispersa e della torbidità dell'acqua immessa;
- la profondità a cui spingersi, nel rimaneggiare il fondo cava, per ripristinare le condizioni iniziali;
- la frequenza con cui eseguire le operazioni di pulizia del fondo cava.

All'inizio il sito, già utilizzato a partire dall'autunno 2001 per infiltrare acqua derivata dalla roggia Franzana, presentava il fondo irregolare con presenza di piante ed arbusti (figura 2.34). Per queste nuove prove, è stato ritenuto necessario



Figura 2.34: *Cava Ferraro allagata durante le prime prove di ricarica forzata (gennaio 2006).*

prevedere la pulizia del sito e il livellamento di parte del fondo cava per consentire la realizzazione di due vasche regolari nella parte settentrionale.

Le due vasche hanno dimensioni diverse ($52 \times 54 m$ vasca ovest, $32 \times 32 m$ vasca est). Entrambe possiedono una profondità di $1,5 m$ rispetto le sponde. Simultaneamente alla realizzazione delle vasche sono stati perforati 3 piezometri (denominati P1, P2 e P3) di profondità $27 m$ dal fondo vasca. I piezometri P1 e P3 sono stati realizzati al centro della vasca grande e piccola rispettivamente, dove si prevede di registrare il massimo innalzamento della falda. Il piezometro P2 è posizionato in corrispondenza dell'argine che separa le 2 vasche in direzione nord-sud e consente il monitoraggio della falda sia in caso di utilizzo della vasca est sia in caso di utilizzo della vasca ovest. Per accedere ai piezometri al centro delle vasche sono stati realizzati due arginelli in ghiaia, uno per vasca, larghi circa 2 metri, a partire dal margine della vasca fino al piezometro centrale (figura 2.35).

Il piezometro P1 è stato realizzato tramite la tecnica di perforazione a carotaggio continuo in modo da ricostruire la colonna stratigrafica tramite il prelievo



Figura 2.35: Planimetria della cava e delle due vasche realizzate.

dei campioni carotati. Per la perforazione dei piezometri P2 e P3 è stata utilizzata invece la tecnica a distruzione di nucleo, più rapida, ma senza carotaggio. Si riteneva infatti che le informazioni stratigrafiche del piezometro P1 fossero rappresentative di entrambe le vasche, essendo queste a pochi metri l'una dall'altra. Si precisa che il materiale di scavo è stato solamente movimentato e non asportato dal sito estrattivo.

All'interno delle 2 vasche sono state collocate due aste idrometriche centimetriche dotate di sonda per la misura del battente in continuo (figura 2.36).



Figura 2.36: *Asta idrometrica dotata di sonda per la misura del battente in continuo.*

Sul bordo della vasca piccola è stato poi posizionato un pluviometro per la misura delle precipitazioni giornaliere.

Successivamente è stato effettuato un rilievo topografico di dettaglio delle 2 vasche ai fini di determinare le loro geometrie esatte. Sono stati battuti oltre 170 punti ed è stato utilizzato il caposaldo di livellazione n.267 dell'elemento 103114 come riferimento generale sia per le coordinate, sia per le quote. Interpolando le quote georeferenziate è stato prodotto un modello digitale del terreno di dettaglio

(DTM). In figura 2.37 viene mostrata un'elaborazione 3D del DTM dove sono state evidenziate le posizioni dei tre piezometri.

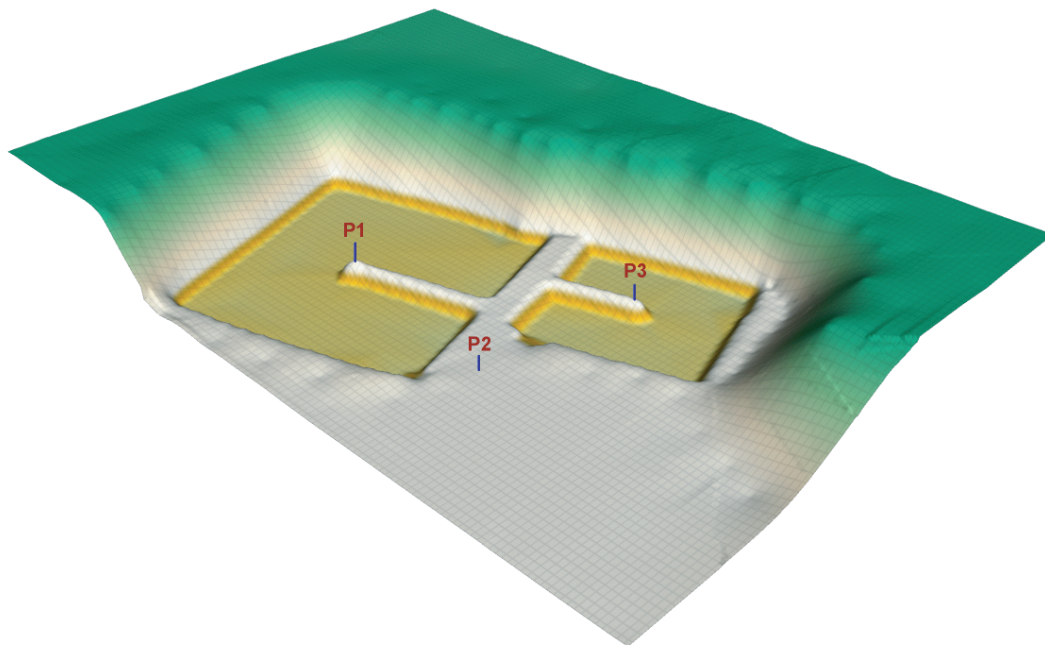


Figura 2.37: *Modello digitale del terreno (DTM) di dettaglio delle vasche.*

Con l'ausilio del DTM prodotto è stata costruita, per entrambe le vasche, la curva che lega il battente d'acqua al volume d'acqua presente nelle vasche stesse. Sono state così determinate, al variare dei livelli in vasca e note le portate in ingresso, le portate idriche infiltrate nel sottosuolo. Sempre utilizzando il DTM è stata possibile calcolare la superficie bagnata al variare del battente in vasca; di conseguenza si è calcolata la portata infiltrata per unità di area ($l/(s \cdot ha)$).

L'acqua viene derivata dalla roggia Franzana mediante apposito manufatto realizzato dal Consorzio di Bonifica Medio Astico Bacchiglione e arriva in prossimità della cava tramite una canaletta a pelo libero e viene convogliata in cava da un successivo tubo in calcestruzzo DN 800 mm, lungo una decina di metri, interrato in una parete della vasca est e terminante in una vasca di dissipazione.

Nella sezione terminale del tubo, dopo aver parzialmente demolito il fondo della vasca di dissipazione, è stato intubato e cementato un pezzo flangiato al quale è stato poi fissato un apposito raccordo (figura 2.38) tramite il quale l'acqua viene convogliata in due tubazioni fuori terra che consentono l'adduzione dell'acqua alle due vasche.



Figura 2.38: *Raccordo dei due tubi DN 300 mm montato sul pezzo flangiato.*

Entrambe le tubazioni erano composte da tubi di acciaio zincato DN 300 *mm*, di lunghezza variabile ($3,5 \div 6$ *m*), raccordati tramite giunti sferici. Esse sono state dotate di regolatore a saracinesca in modo da ricaricare le vasche indipendentemente con portate variabili. La linea della vasca piccola è stata dotata inoltre di un misuratore di portata. La lunghezza complessiva della tubazione che arriva alla vasca grande é 60 *m*, per la vasca piccola 25 *m*. Per evitare fenomeni di escavazione del fondo delle vasche dovuti al getto d'acqua entrante, è stato posizionato un tombino di protezione che funge da dissipatore (figura 2.40).

Al termine della canaletta di adduzione, all'imbocco del tubo DN 800 *mm*, è stata posizionata una griglia con una luce di 5 *cm*. In questo modo è stato possibile trattenere la maggior parte del materiale che inevitabilmente veniva



Figura 2.39: *Tubazioni di adduzione alle vasche.*



Figura 2.40: *Tombino dissipatore per evitare lo scavo del fondo vasca.*

trasportato dall'acqua della canaletta. Tuttavia, in fase sperimentale, per evitare l'intasamento della griglia, è stata necessaria una pulizia manuale della stessa con cadenza almeno bi-giornaliera.

Prima e dopo la conduzione delle prove di ricarica, sono state effettuate analisi di tipo granulometrico sul materiale del fondo cava della vasca utilizzata, per verificarne il progressivo intasamento. E' stata inoltre effettuata una misura di torbidità e di solidi sospesi nell'acqua di ingresso all'impianto di ricarica, per ricercare una possibile correlazione tra la torbidità (o i solidi sospesi) ed il progressivo intasamento del fondo. Inoltre, a partire dall'inizio delle prove, sono stati monitorati i livelli del pozzo d'acquedotto di Cà del Maglio (Breganze) di proprietà dell'AVS. Il pozzo, distante circa 4 km dalla cava, è utilizzato soltanto saltuariamente e fornisce quindi una quota piezometrica indisturbata. Si dispone quindi, lungo tutto il periodo delle prove, dell'andamento della superficie piezometrica indisturbata: tale informazione è fondamentale per depurare i dati freaticometrici dei piezometri in cava dall'andamento stagionale della falda.

Riassumendo i parametri fisici misurati in continuo durante le prove sono:

- livelli di falda nei 3 piezometri (un valore ogni 5 *min*);
- livello del battente nelle 2 vasche (un valore ogni 5 *min*);
- livello del tirante nella canaletta di adduzione (un valore ogni 5 *min*);
- precipitazione giornaliera;
- livelli della falda indisturbata nel pozzo AVS di Cà del Maglio - Breganze.

Le prove sono state effettuate a partire dal 19/04/2006 e si sono protratte fino al 19/05/2006 e sono divise in tre tipologie:

- prove in vasca piccola dal 19/04 al 01/05;
- prove in vasca grande dal 02/05 al 06/05;
- prove in entrambe le vasche dal 08/05 al 19/05.

2.5.2 Risultati

Dall'elaborazione dei dati ottenuti sono stati ricavati i seguenti risultati:

- nel periodo delle prove (aprile-maggio 2006), con un trend generale positivo per la falda freatica dell'Alto Vicentino, sono stati infiltrati ca. 100 mila m^3 d'acqua;
- sono state condotte 4 prove di invaso e svaso nella vasca minore (est) con una portata infiltrata stimata in 200-250 l/s/ha e 2 nella vasca maggiore (ovest) con una portata infiltrata stimata in 70-90 l/s/ha; questa diversa capacità è da imputare alla presenza di orizzonti a bassa permeabilità limosi-sabbiosi individuati dalla stratigrafia del piezometro P1;
- la portata infiltrata aumenta sensibilmente al crescere del livello nella vasca di infiltrazione;
- l'innalzamento massimo della falda sottostante è stato misurato pari a 12 cm nel piezometro centrale della vasca est nel corso delle prove in vasca piccola;
- la prova ha interessato l'acquifero sottostante per un raggio di circa 300 m a partire dal centro della vasca.

Alla luce dei risultati sopra esposti e tenendo conto che:

- é necessario infiltrare almeno 1 m^3/s , corrispondente alla portata con cui si intende alimentare, con nuovi prelievi, le nuove adduttrici,
- come verificato nella conduzione delle prove nell'impianto pilota, la portata di infiltrazione può variare sensibilmente anche a distanza di qualche decina di metri;
- nelle condizioni più sfavorevoli di portata di infiltrazione (70-90 l/s/ha), sono necessari almeno 13 ha per infiltrare la portata sopra indicata;

- i siti già oggi esistenti da utilizzare per gli impianti su grande scala hanno mediamente superfici pari a circa 10 ha;
- per conseguire un equilibrato beneficio per la falda dell'Alto Vicentino, è necessario allestire almeno un paio di siti posizionati uno sulla conoide Leogra-Timonchio e l'altro sulla conoide dell'Astico;

dovranno essere individuati almeno 2 siti con le caratteristiche sopra indicate, sui quali condurre adeguate indagini geognostiche a grande profondità che permettano di ricostruire le successioni stratigrafiche al fine di determinare l'effettiva capacità di infiltrazione del sito. Per ridurre i costi di realizzazione e qualora l'impianto dovesse assolvere la funzione di laminazione delle piene, tali siti dovranno essere preferibilmente ubicati in prossimità dei principali corsi d'acqua. Il bacino di infiltrazione dovrà essere organizzato in due o più settori sul fondo dei quali posizionare adeguato materiale filtrante che dovrà essere periodicamente rimaneggiato per recuperarne la massima capacità disperdente. Sarà inoltre indispensabile, come verificato durante la conduzione delle prove, prevedere un sistema di grigliatura automatica dell'acqua immessa per evitare il trasporto sul fondo cava di materiali solidi grossolani di sgradevole impatto visivo ed anche di difficile rimozione.

2.5.3 Disponibilità dei volumi derivabili dai corsi d'acqua

Come precedentemente esposto, per ricaricare in modo equilibrato gli acquiferi alimentati dai diversi sistemi idrografici dell'Alto Vicentino (sistema Leogra-Timonchio, sistema Astico nel tratto Piovene-Caltrano, sistema Astico nel tratto Sarcedo-Montecchio Precalcino) si ritiene necessario individuare almeno un sito per ognuno dei tre sistemi indicati. Il passo successivo all'individuazione dei siti idonei alla ricarica, è quello di considerare i dati di portata dei principali corsi d'acqua che caratterizzano i tre sistemi (i torrenti Astico e Leogra - Timonchio), ai fini di stimare la portata effettivamente derivabile e quindi disponibile alla ricarica della falda utilizzando i suddetti siti.



Figura 2.41: Prova in vasca piccola.

In particolare, considerando l'obiettivo di ricaricare la falda con una portata media di $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ (38 milioni di m^3/anno), per compensare i nuovi prelievi previsti dal Piano d'Ambito dell'A.A.T.O. Bacchiglione, sarebbe necessario disporre di almeno $10,23 \text{ ha}$ di superficie disperdente (utilizzando la capacità disperdente media di $150 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ ricavata sperimentalmente dalle prove effettuate nella Ex-Cava Ferraro nell'aprile 2006). I 4 siti più importanti individuati hanno una superficie media di circa 13 ha l'uno ed un volume medio di circa 3 milioni di m^3 cadauno. Le superfici per disperdere $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ sono quindi disponibili. Il volume da infiltrare annualmente può essere disperso con più cicli di riempimento delle cave.

Il Sistema Astico

Per il calcolo delle portate dell'Astico allo sbocco in pianura sono stati utilizzati i dati idrometrici delle stazioni ARPAV del torrente Astico a Pedescala e del torrente Posina a Stancari (dati orari del periodo 1986 - 2004). Relativamente all'anno 2004, sono state correlate le portate orarie dell'Astico a valle della restituzione della Centrale idroelettrica di Bessè, ottenute come somma delle portate transitate a valle dello sbarramento di Meda (Stazione di ponte Pilo) e di quelle turbinate dalla Centrale di Bessè (dati forniti da EUSEBIO Energia S.p.a.), con le portate ottenute dalla somma di quelle misurate dalle due stazioni ARPAV (figure 2.42 e 2.43).

Utilizzando la curva di correlazione, è stato possibile stimare le portate orarie dell'Astico allo sbocco in pianura (all'incirca alla restituzione della Centrale di Bessè) nel periodo 1986 - 2004. Le portate effettivamente disponibili ed utilizzabili per la ricarica della falde sono state ottenute sottraendo due frazioni costanti:

- la portata massima derivata dal Canal Mordini per scopi irrigui ($4 \text{ m}^3/\text{s}$);
- la portata massima dispersa dall'Astico (stimata a $10 \text{ m}^3/\text{s}$).

Si è così stimato che il volume annuo d'acqua che si sarebbe potuto derivare

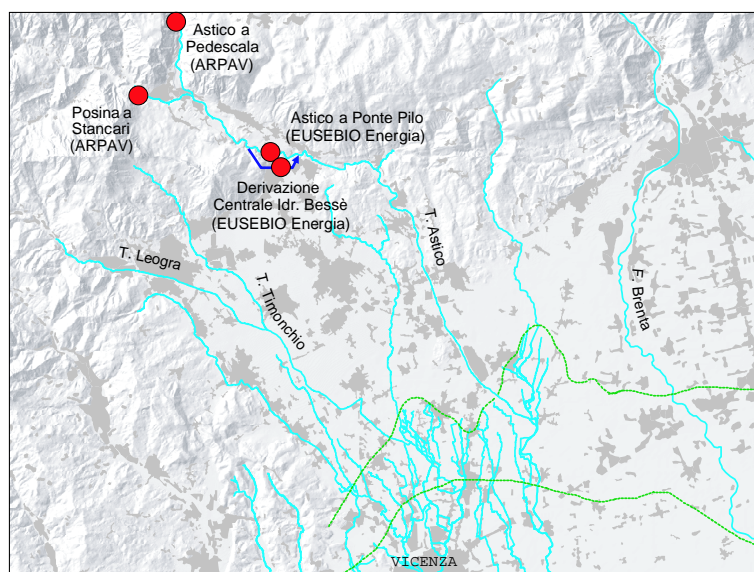


Figura 2.42: Stazioni idrometriche utilizzate nel calcolo delle portate dell'Astico disponibili per la ricarica artificiale delle falde.

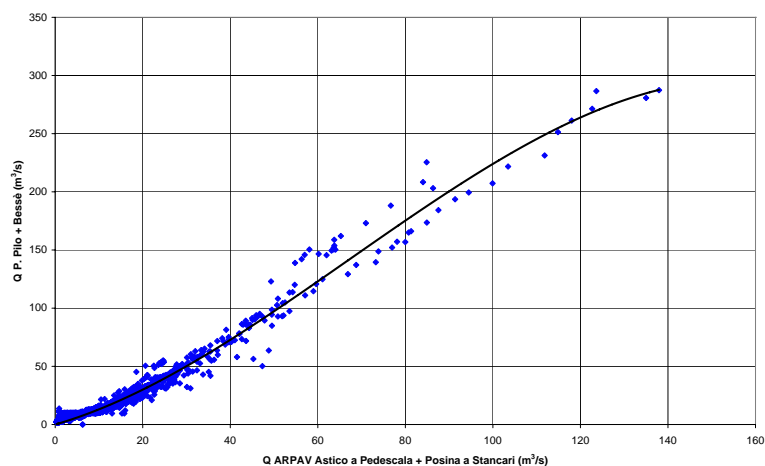


Figura 2.43: Correlazione tra le portate orarie dell'Astico a valle della restituzione della Centrale idroelettrica di Bessè e la somma delle portate misurate nelle due stazioni dell'ARPAV: t.Astico a Pedescala e t.Posina a Stancari (dati 2004).

dall'Astico ha raggiunto il massimo di 270 milioni di m^3 nel 1992 e il valore minimo di 36 milioni di m^3 nel 2003. Mediamente, nel periodo 1987 – 2004, si sono persi circa 100 milioni di m^3 , corrispondenti a $3,17 m^3/s$.

In seguito, per stimare la portata media oraria infiltrata nell'ipotetico bacino di dispersione, si sono realizzati alcuni scenari di ricarica imponendo (figura 2.44):

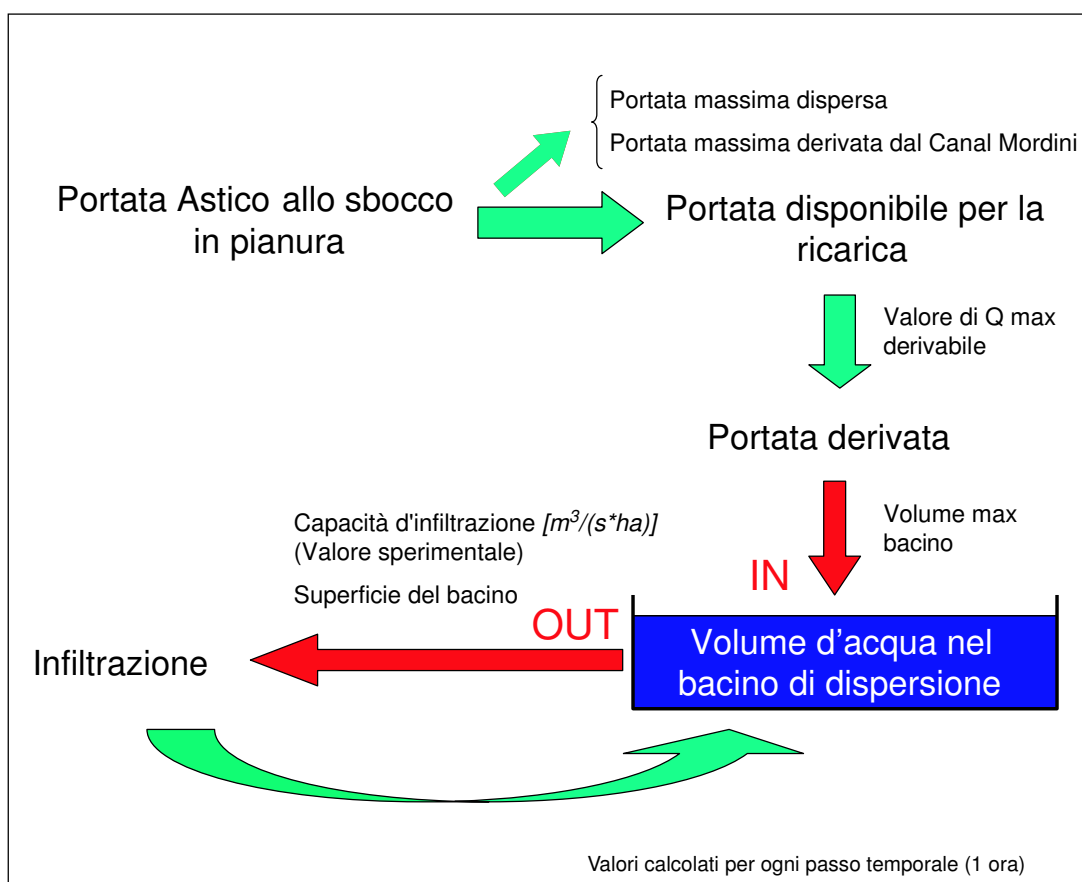


Figura 2.44: *Calcolo delle portate infiltrate nei bacini di dispersione.*

- la portata massima derivabile (dipendente dalle dimensioni del canale di derivazione e dalle caratteristiche dell'opera adduttrice);
- il numero, la superficie disperdente e il volume dei bacini;

- la capacità di infiltrazione ⁴.

I risultati sono riassunti in tabella 2.8. Gli scenari dal 7 al 12 differiscono dagli scenari 1 – 6 solamente dal valore di capacità d'infiltrazione che passa da $80 \text{ l}/(s \cdot ha)$ a $200 \text{ l}/(s \cdot ha)$). Supponendo

1. di utilizzare 2 bacini di infiltrazione, ognuno con superficie disperdente di 10 ha e volume 2 milioni di m^3 ,
2. che i canali di adduzione derivino al massimo $10 \text{ m}^3/s$ ognuno dal t. Astico,
3. che la capacità di infiltrazione dei 2 bacini sia $200 \text{ m}^3/(s \cdot ha)$,

si ottiene, a partire dai valori reali della portata oraria dell'Astico allo sbocco in pianura nel periodo 1987 – 2004, una portata infiltrata di $0,84 \text{ m}^3/s$.

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6
N°bacini di ricarica	1	2	2	2	1	3
Superficie (ha)	10	20	20	20	10	30
Volume bacino (milioni m^3)	2	4	4	4	2	6
Portata max canale derivazione (m^3/s)	10	10	20	5	5	30
Capacità d'infiltrazione sper. ($l/(s \cdot ha)$)	80	80	80	80	80	80
Portata media infiltrata (m^3/s)	0,31	0,54	0,58	0,44	0,29	0,82
N°giorni/anno con presenza di acqua nel bacino	154	136	145	109	145	138

	Scenario 7	Scenario 8	Scenario 9	Scenario 10	Scenario 11	Scenario 12
N°bacini di ricarica	1	2	2	2	1	3
Superficie (ha)	10	20	20	20	10	30
Volume bacino (milioni m^3)	2	4	4	4	2	6
Portata max canale derivazione (m^3/s)	10	10	20	5	5	30
Capacità d'infiltrazione sper. ($l/(s \cdot ha)$)	200	200	200	200	200	200
Portata media infiltrata (m^3/s)	0,47	0,73	0,84	0,48	0,41	1,13
N°giorni/anno con presenza di acqua nel bacino	94	71	82	46	82	73

Tabella 2.8: *Scenari di derivazione dal torrente Astico.*

⁴Si è utilizzato il valore sperimentale massimo ($200 \text{ l}/(s \cdot ha)$) e minimo ($80 \text{ l}/(s \cdot ha)$) ottenuto dalle prove condotte presso l'impianto pilota della Ex-Cava Ferraro

Il Sistema Leogra - Timonchio

Per il Sistema Leogra - Timonchio è stato adottato un procedimento analogo a quello utilizzato per il torrente Astico. In questo caso i dati di portata disponibili sono stati quelli relativi al t. Leogra nella stazione di Torrebelvicino (forniti dal Centro Idrico di Novoledo) relativi agli anni 2000 - 2005. Sono state quindi stimate le portate totali del sistema Leogra - Timonchio allo sbocco in pianura tramite la relazione che le lega alle portate registrate dalla stazione di Torrebelvicino (figura 2.45).

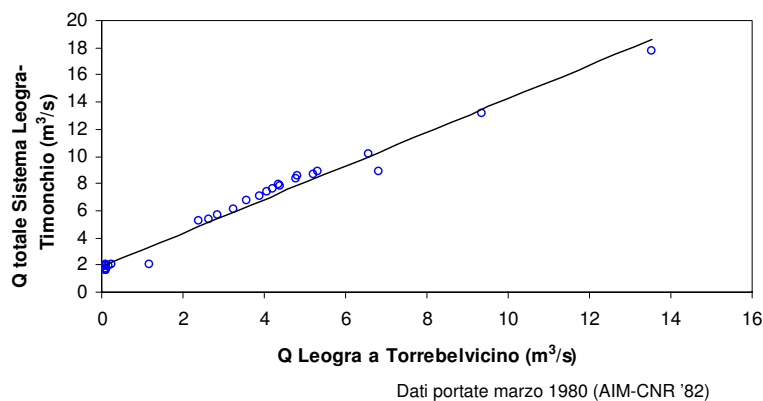


Figura 2.45: *Correlazione tra le portate del Leogra a Torrebelvicino e le portate dell'intero Sistema Leogra - Timonchio allo sbocco in pianura.*

Anche in questo caso le portate effettivamente disponibili da poter derivare e far confluire in bacini di dispersione, sono state ottenute sottraendo due frazioni costanti (figura 2.46):

- la portata massima derivata dalla Roggia Schio-Marano per scopi irrigui ($2 \text{ m}^3/\text{s}$);
- la portata massima dispersa dall'intero Sistema Leogra - Timonchio (stimata in $8.5 \text{ m}^3/\text{s}$).

In questo caso, sono stati ipotizzati 4 scenari di ricarica, variando solamente la portata massima derivabile e la capacità d'infiltrazione e considerando un solo

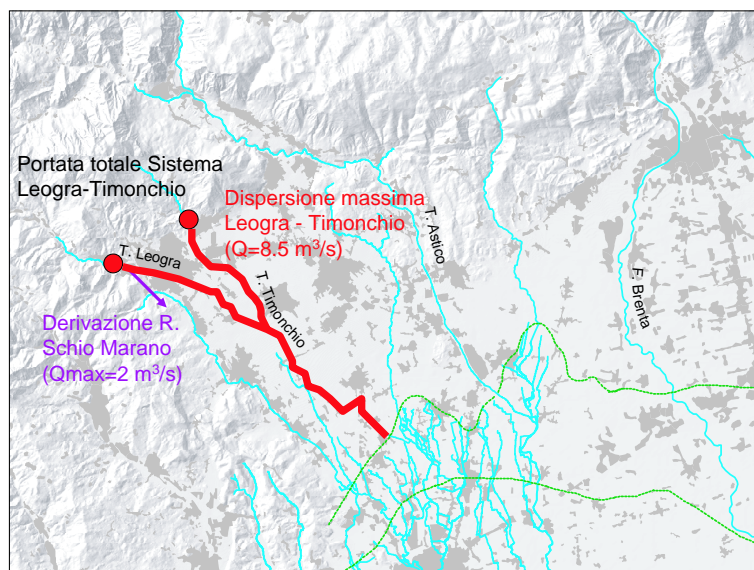


Figura 2.46: *Schema idrografico del Sistema Leogra - Timonchio con evidenziati i contributi sottratti dalla portata affluente per ottenere quella disponibile da derivare per alimentare l'ipotetico bacino di dispersione.*

bacino avente una superficie di 10 ha e un volume utilizzabile di 2 milioni di m^3 (tabella 2.9). E' evidente come il contributo alla ricarica della falda da parte del sistema Leogra-Timonchio sia trascurabile rispetto a quello del torrente Astico.

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
N° bacini di ricarica	1	1	1	1
Superficie (ha)	10	10	10	10
Volume bacino (milioni m^3)	2	2	2	2
Portata max canale derivazione (m^3/s)	10	5	10	5
Capacità d'infiltrazione sper. ($l/(s \cdot ha)$)	80	80	200	200
Portata media infiltrata (m^3/s)	0,12	0,09	0,14	0,11
N° giorni/anno con presenza di acqua nel bacino	49	40	24	19

Tabella 2.9: *Scenari di derivazione dal Sistema Leogra - Timonchio.*

Capitolo 3

Il modello geostrutturale

La ricostruzione del modello geologico strutturale è un'attività di importanza fondamentale in quanto necessaria al successivo sviluppo del modello matematico di flusso. Un'accurata ricostruzione della struttura del sottosuolo e delle caratteristiche idrogeologiche dei terreni sono infatti requisiti fondamentali per una corretta modellizzazione del flusso idrico sotterraneo.

3.1 Creazione del modello strutturale

L'individuazione dei livelli acquiferi rappresenta un tema particolarmente sentito dai gestori del servizio idrico integrato che hanno la necessità di garantire l'approvvigionamento idrico.

Da molteplici studi ed analisi del territorio vicentino [1] è da tempo nota la conformazione degli acquiferi. Come esposto in precedenza, l'area oggetto dello studio si può suddividere in tre fasce: una completamente indifferenziata, una di transizione ed una terza caratterizzata dal sistema multifalde. La prima si può considerare delimitata superiormente dalla piano campagna ed inferiormente dal substrato impermeabile. Nella fascia di transizione, invece, le conoidi alluvionali di matrice ghiaiosa si separano lasciando spazio a livelli di materiali più fini. Nella terza fascia queste formazioni poco permeabili si sviluppano e separano in modo netto almeno 6 livelli acquiferi.

3.1.1 Individuazione degli acquiferi confinati

Nella ricostruzione geologica si è posta particolare attenzione alla zona di interesse, con l'intento di descrivere al meglio la fascia di transizione tra i due differenti sistemi acquiferi (indifferenziato e differenziato) e, quindi, l'insorgere nel sottosuolo delle prime formazioni argillose.

Pur potendo disporre di una notevole banca dati di informazioni stratigrafiche puntuali, distribuite omogeneamente sull'intera area delimitata dal dominio prescelto, per lo studio del modello strutturale si è convenuto di considerare in primo luogo profili stratigrafici già interpretati in studi ed analisi precedenti. Infatti, vista l'estensione dell'area allo studio, e considerata la complessità e l'eterogeneità delle formazioni che occupano il sottosuolo in esame, si è ritenuto opportuno prescindere dal dato di tipo puntuale e procedere ad una schematizzazione della geometria sotterranea, mantenendo un grado di dettaglio tale da non pregiudicare i risultati attesi con la simulazione del campo di moto.

I profili stratigrafici adottati derivano, in particolare, dallo studio sugli acquiferi di Vicenza realizzato da AIM-CNR [1], dalla Carta delle Acque Sotterranee della Regione Veneto e da alcuni elaborati dell'IRSA (Istituto di Ricerca sulle Acque). In figura 3.1 si possono vedere le tracce di tali profili, all'interno del dominio. Appare evidente come il numero e lo posizione delle sezioni copra bene l'intera area considerata e soddisfi l'esigenza di aumentare il dettaglio nell'area di interesse del presente studio, ossia nella zona di pianura alluvionale che si estende a nord-ovest di Padova.

In una prima fase, si è rivolta l'attenzione ad un sottoinsieme dei profili stratigrafici disponibili (figura 3.2). Questi profili stratigrafici sono stati utilizzati per la creazione del modello strutturale e sono stati validati mediante opportuni confronti con le stratigrafie puntuali disponibili. Inoltre, sono state scelte le sezioni che fornivano informazioni litologiche in accordo tra loro e che consentivano di poter individuare i medesimi livelli produttivi anche in sezioni differenti, manifestando analogie nelle profondità dei livelli acquiferi rispetto al piano campagna.

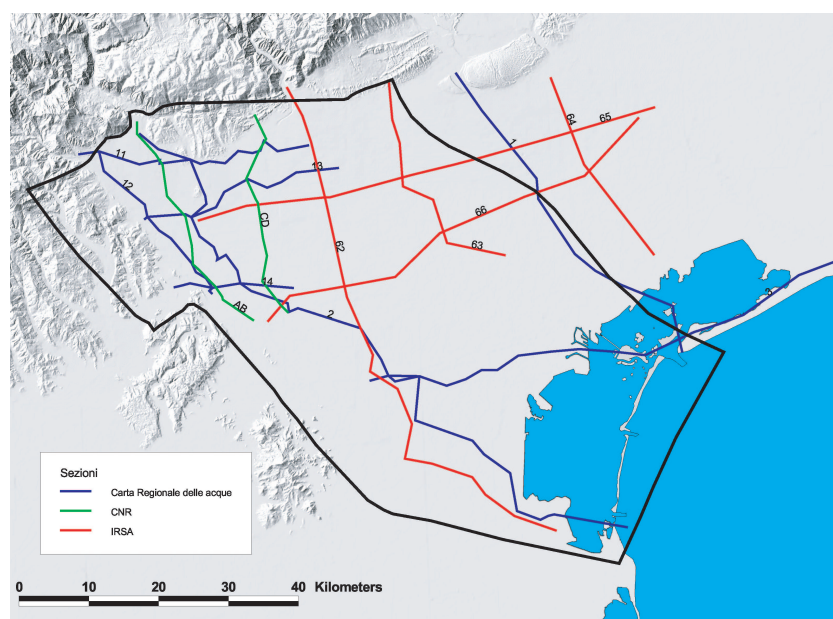


Figura 3.1: *Tracce delle sezioni a disposizione.*

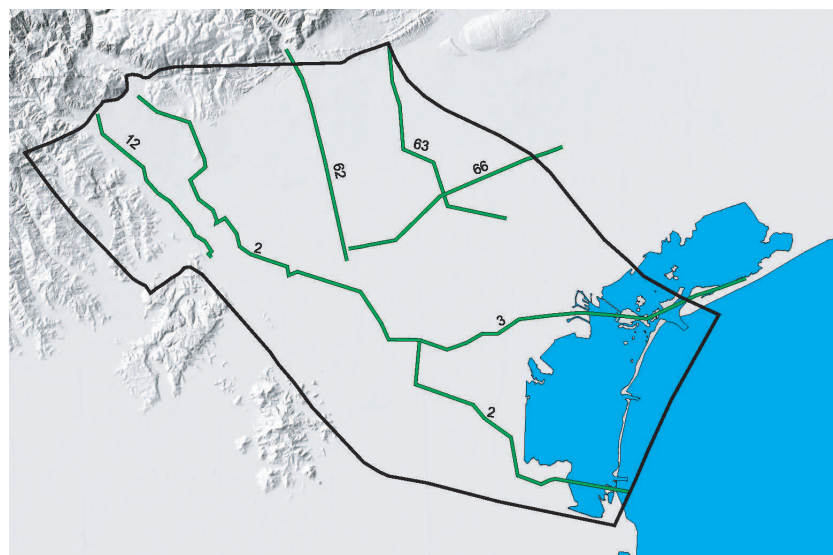


Figura 3.2: *Tracce delle sezioni utilizzate nella fase di costruzione del modello geo-strutturale.*

Come evidenziato in figura 3.2, le 6 sezioni stratigrafiche utilizzate nella prima fase di ricostruzione del modello geostrutturale sono:

- sezioni 2, 3 e 12 dalla Carta delle Acque Sotterranee della Regione Veneto (figure 3.4, 3.8, 3.3);
- sezioni 62, 63 e 66, elaborate dall'IRSA, Istituto di Ricerca sulle Acque (figure 3.5, 3.6, 3.7).

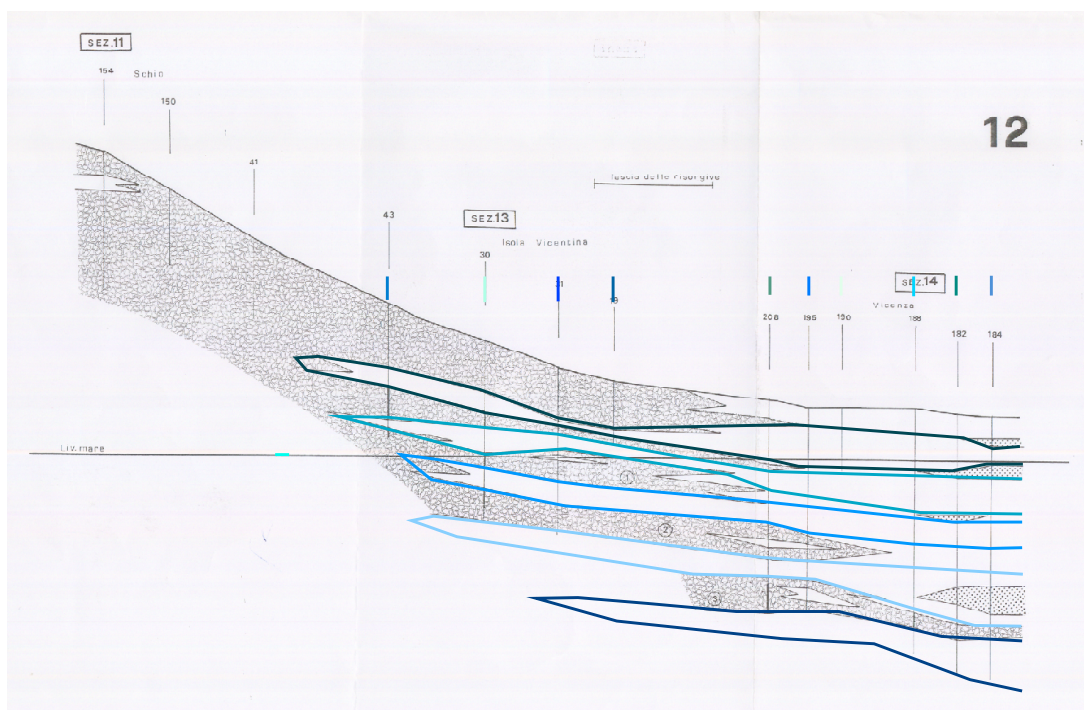


Figura 3.3: Interpretazione della sezione 12 della Carta delle Acque della Regione Veneto.

Per la ricostruzione del modello geostrutturale, i profili stratigrafici sono stati interpretati e semplificati, al fine di rappresentare i livelli produttivi e gli spessori a bassa permeabilità come formazioni continue ed estese, trascurando inevitabilmente la presenza di litologie che interessassero spessori esigui e che non fossero distinguibili nella totalità delle sezioni considerate. Sono state così determinati i

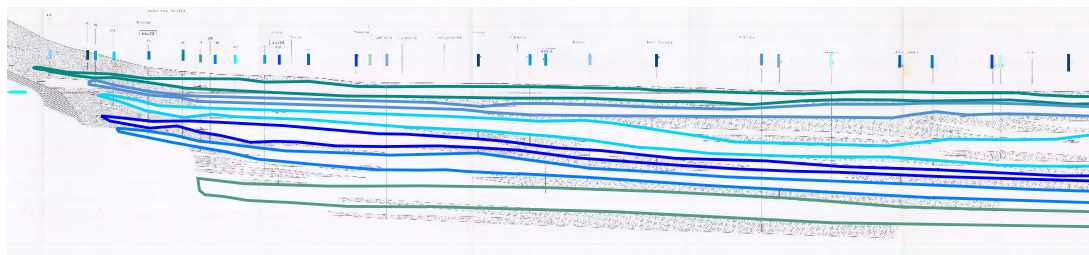


Figura 3.4: Interpretazione della sezione 2 della Carta delle Acque della Regione Veneto.

confini superiore ed inferiore di ogni acquifero e di ogni acquitardo (formazione satura e poco permeabile, costituita in prevalenza da argilla, che costituisce l'elemento di separazione tra acquiferi). La necessità di semplificare la geometria del sottosuolo ha portato a distinguere, nella zona caratterizzata dalla differenziazione dell'acquifero in falde sovrapposte, sei lenti di argilla, che confinano e danno origine ad altrettanti acquiferi in pressione.

Nelle figure 3.5 e 3.6, si distinguono i limiti delle 6 lenti di individuate; esse, caratterizzate prevalentemente da argilla, possono presentare al loro interno piccoli strati di materiale più permeabile (acquiferi minori). Di questo si terrà conto nella fase di assegnazione dei parametri idrogeologici (ad esempio la conducibilità idraulica).

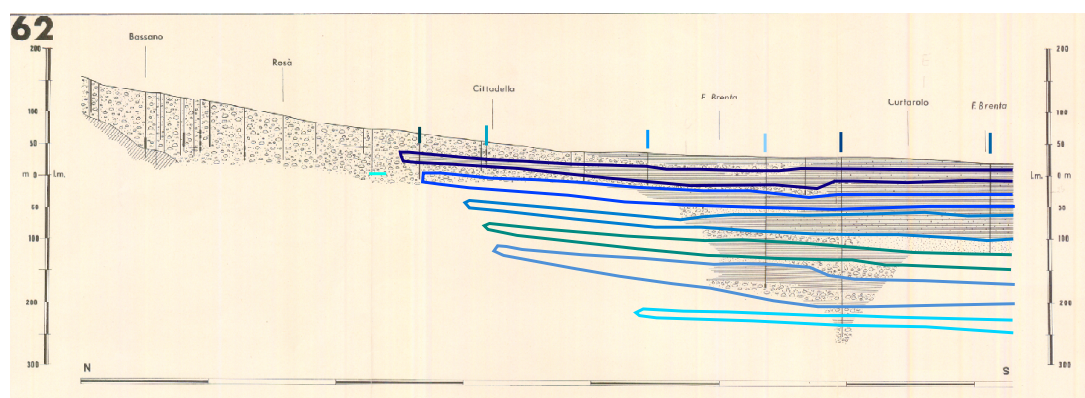


Figura 3.5: Interpretazione della sezione 62 dell'IRSA.

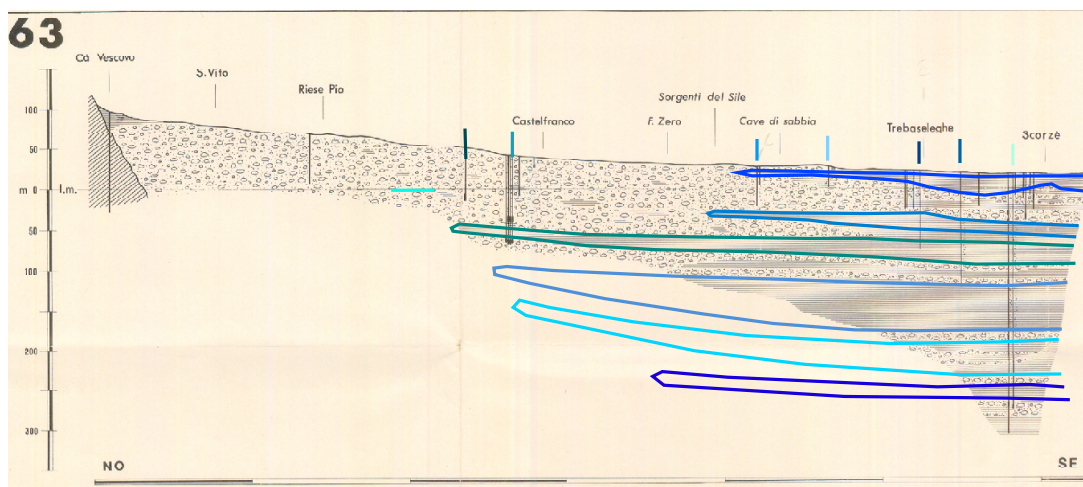


Figura 3.6: Interpretazione della sezione 63 dell'IRSA.

Sono state scelte per lo più sezioni ad andamento longitudinale (NO-SE) in modo tale da determinare con sufficiente precisione sia la posizione di comparsa delle lenti argillose, sia l'andamento degli spessori di acquitardi e acquiferi, dalla loro comparsa nell'Alta Pianura fino al raggiungimento della zona di Bassa Pianura. La sezione 66 (figura 3.7) e la sezione 3 (figura 3.8) sono invece sezioni a direzione trasversale, che non aggiungono informazioni circa la zona di comparsa delle lenti, ma costituiscono un valido aiuto nell'interpretazione delle sezioni longitudinali, fungendo loro da collegamento.

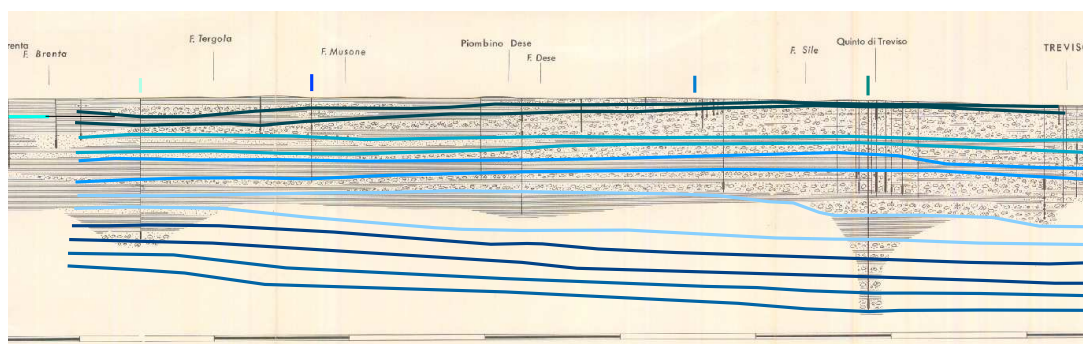


Figura 3.7: Interpretazione della sezione 66 dell'IRSA.

Dopo questa fase di interpretazione-semplificazione dei profili stratigrafici, si

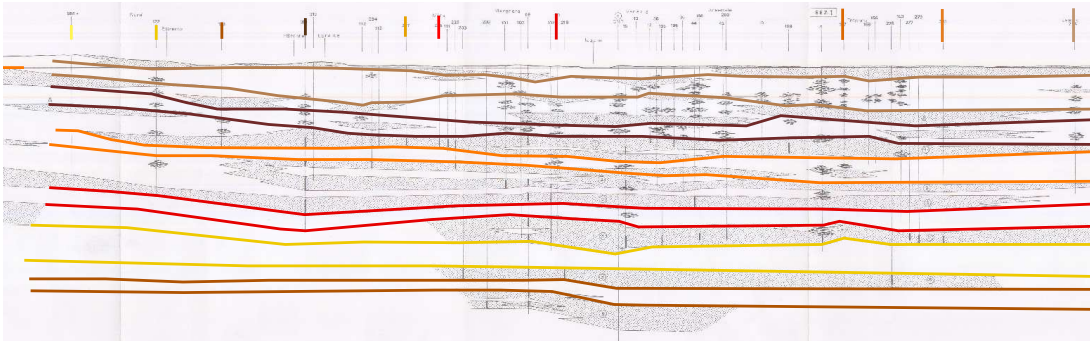


Figura 3.8: *Interpretazione della sezione 3 della Carta delle Acque della Regione Veneto.*

sono create le superfici di discontinuità tra gli acquiferi e le lenti di argilla che li delimitano.

A tal fine i profili stratigrafici sono stati discretizzati ognuno come una serie di colonne stratigrafiche, nella maggioranza dei casi poste in corrispondenza delle reali stratigrafie da cui è stata tratta l'interpretazione dei profili stessi. Lungo tali colonne stratigrafiche vengono considerate, come uniche informazioni, le quote assolute di top (livello superiore) e bottom (livello inferiore) delle lenti di argilla, così come determinate nella fase di interpretazione-semplificazione dei profili stratigrafici.

Le superfici che definiscono e delimitano le differenti formazioni sono state quindi ottenute tramite interpolazioni spaziali geostatistiche (kriging) di dati puntuali di quote assolute derivanti dalle informazioni delle singole colonne stratigrafie. Si sono così generate superfici continue aventi estensione pari a quella dell'intero dominio; tale caratteristica, come vedremo in seguito, è di fondamentale importanza per la creazione della griglia di calcolo tridimensionale. A causa di tale necessità, lì dove le lenti di argilla si esauriscono lasciando spazio all'acquifero indifferenziato (cioè nella parte più settentrionale del modello), si è imposto che le superfici di top e di bottom della lente vengano a coincidere, generando uno strato a spessore nullo.

In aggiunta alle 6 sezioni stratigrafiche, sono state considerati, nella genera-

zione del modello strutturale, anche 10 stratigrafie di pozzi d'acquedotto (figura 3.9).

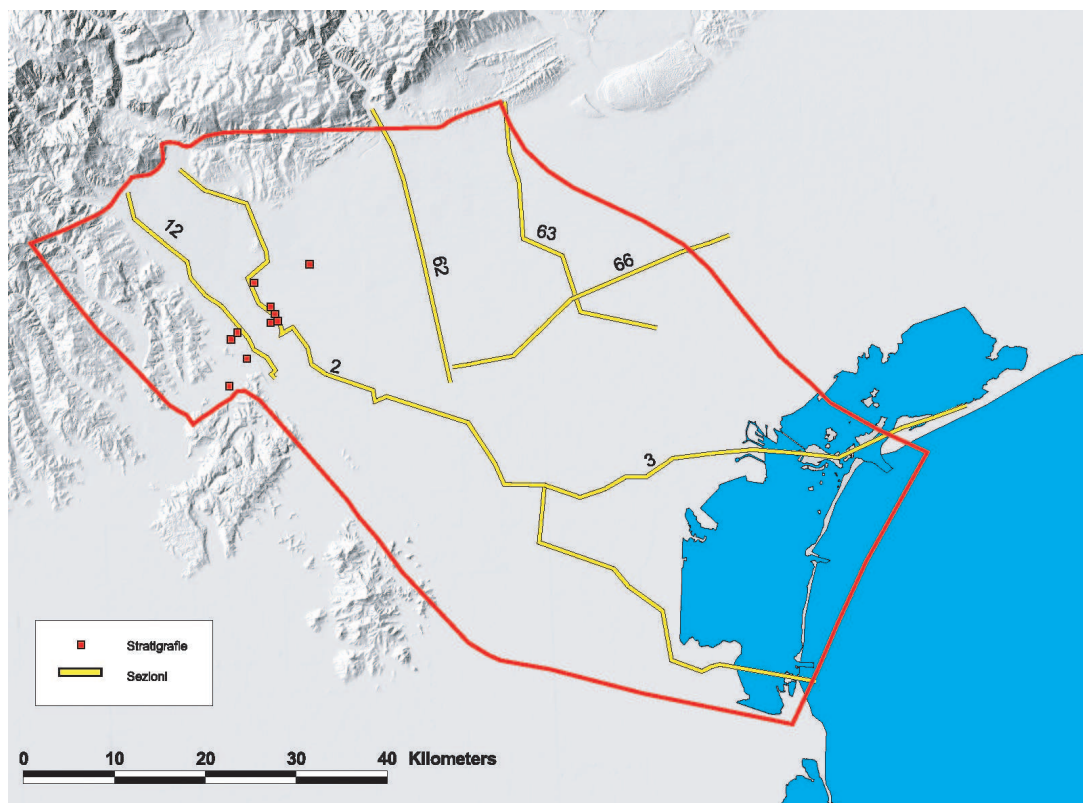


Figura 3.9: Localizzazione delle stratigrafie considerate nella costruzione del modello geo-strutturale.

Tali stratigrafie sono state opportunamente interpretate e scelte in base alla loro importanza: esse infatti aumentano l'accuratezza del modello strutturale nell'area di maggior interesse, dove sono concentrati i maggiori attingimenti a scopo pubblico-acquedottistico effettuati dalle aziende acquedottistiche A.I.M. di Vicenza ed A.P.S. di Padova. Tali aziende emungono dal sistema multifalde e interessano prevalentemente i territori dei comuni di Dueville, Caldogno, Monticello Conte Otto e Vicenza.

Dalle colonne stratigrafiche relative ai pozzi di acquedotto è possibile conoscere anche la profondità dei filtri di adduzione, che indicano la presenza certa di un

livello produttivo e forniscono quindi un'utile informazione per la ricostruzione del modello geo-strutturale. Inoltre, dal momento che in seguito, nell'applicazione del modello di flusso, saranno forniti in input le portate prelevate a scopo acquedottistico, tale procedura consente di aumentare il grado di precisione nell'attribuzione di tali prelievi al reale livello produttivo in cui avviene l'emungimento.

La distribuzione delle sezioni considerate è stata scelta in base alla necessità di avere un'adeguata ricostruzione stratigrafica del sottosuolo nella zona della provincia di Vicenza, soprattutto quella a nord della città (area nella quale le simulazioni generate con il modello matematico di flusso dovranno dare i migliori risultati nella fase di taratura). Si è cercato quindi di inserire il maggior numero di informazioni nella suddetta area, mentre si è ritenuto sufficiente diminuire il grado di dettaglio all'aumentare della distanza da essa, operando una ricostruzione di massima nelle aree del dominio più marginali (Province di Treviso e di Venezia). Ciò è evidente se si osserva l'accuratezza delle interpretazioni dei profili stratigrafici ricadenti nell'area di interesse (figure 3.3 e 3.4) a confronto con quella di una sezione che si colloca all'estremo confine orientale nel dominio considerato (figura 3.6), in cui si può notare una ricostruzione più sommaria dovuta ad una minor conoscenza delle caratteristiche geo-litologiche del sottosuolo.

3.1.2 Individuazione della superficie di substrato impermeabile

Il primo passo nella determinazione della superficie del substrato roccioso, limite inferiore del materasso alluvionale, è stato fatto analizzando e i dati stratigrafici a disposizione. Si è consultato un database di dati stratigrafici (messi a disposizione dal Centro Idrico di Novoledo e dallo studio di geologia Sinergeo) relativi a punti interni al dominio allo studio (localizzati nei fogli IGM 103, 104, 105, 125, 126, 127, 147). Per tali stratigrafie si è individuata la profondità massima a cui si è spinto il sondaggio; inoltre l'insieme delle stratigrafie di pozzi che raggiungono la superficie rocciosa è stato considerato separatamente: questi dati,

infatti, costituiscono le uniche osservazioni dirette circa la reale posizione della superficie del substrato impermeabile.

Per passare dai dati puntuali alla distribuzione spaziale continua della profondità del substrato roccioso si è reso necessario l'utilizzo dell'interpolatore spaziale geostatistico del kriging. I punti utilizzati comprendono i punti in cui è nota la quota del substrato roccioso (relativi alle stratigrafie che si sono spinte fino al substrato roccioso), una serie di punti lungo il confine dei rilievi (a nord, nord-ovest del dominio) dove, in seguito a fenomeni tettonici, il substrato viene a giorno; i punti ricavati dalle sezioni visionate (Carta Regionale delle Acque e studio IRSA) in corrispondenza di stratigrafie intersecanti il substrato roccioso e i punti relativi a stratigrafie ricadenti nell'area della Valle dell'Agno-Guà.

Una prima superficie si è ottenuta dall'interpolazione delle sole stratigrafie penetranti il substrato roccioso. Questo risultato è stato poi modificato implementando nuovamente il kriging a partire da un set di valori aggiornato per correggere e migliorare la superficie calcolata. A questo primo insieme di punti si sono aggiunti infatti i punti lungo la linea di piede dei rilievi, in cui è stata assegnata al substrato una quota pari a -10 m rispetto al piano campagna. Si è poi proceduto alla verifica di questa seconda superficie mediante il confronto con le stratigrafie caratterizzate da una quota del fondo inferiore (in termini assoluti) a quella del substrato interpolato. Dopo aver valutato se l'informazione relativa alla quota di fine stratigrafia potesse aggiungere precisione nella ricostruzione della superficie del substrato, si sono aggiunti questi nuovi punti al set di valori in input alla nuova interpolazione.

Si è proceduto infine al confronto della superficie del substrato con quella freatica. La superficie freatica è stata ricostruita, come anticipato nel capitolo 2, interpolando:

- a nord della fascia delle risorgive, i dati freatimetrici della campagna di monitoraggio condotta nel marzo del 2004;
- a sud della fascia delle risorgive, i dati freatimetrici ricavati dalla campagna

di misura regionale di maggio 2003 riportata nel Piano di Tutela delle Acque della Regione Veneto [30];

- in sinistra Brenta, i dati freaticometrici ricavati dalla campagna di misura di novembre 1975 riportata nella Carta Idrogeologica dell'Alta Pianura Veneta di Dal Prà [7];
- nella zona confinante con il bacino dell'Agno Guà, i dati freaticometrici ricavati dalla campagna di misura di febbraio 1978 riportata nella Carta Piezometrica I.R.S.E.V. [31].

La superficie così ottenuta viene utilizzata per delimitare superiormente il sistema acquifero schematizzato, assumendo che essa rappresenti la situazione media, relativa all'anno 2004, dei livelli della falda freatica.

Individuata la superficie freatica di riferimento, la superficie del substrato è stata ulteriormente corretta imponendo che questa si trovasse ad almeno 10 metri dalla superficie freatica. Questa correzione è stata introdotta per fare in modo che il substrato non intersechi la superficie freatica, ossia la superficie superiore del modello geo-strutturale, ma si mantenga sempre al di sotto di essa. Ciò è necessario al fine di non ridurre l'estensione del dominio scelto. In tal modo nel modello vengono comprese zone montuose e litologie di tipo roccioso, roccioso-fessurato, di cui si terrà conto con l'attribuzione ad esse di opportuni parametri idrogeologici.

La superficie del substrato roccioso così ottenuta è rappresentata in figura 3.10.

3.2 Validazione del modello strutturale

Il modello geo-strutturale creato attraverso la procedura descritta in 3.1, comprende un unico acquifero nella zona di Alta Pianura e si differenzia, scendendo verso sud, in un acquifero freatico e 6 acquiferi confinati. Sono state individuate quindi 12 superfici di discontinuità (6 superiori e 6 inferiori) che delimitano

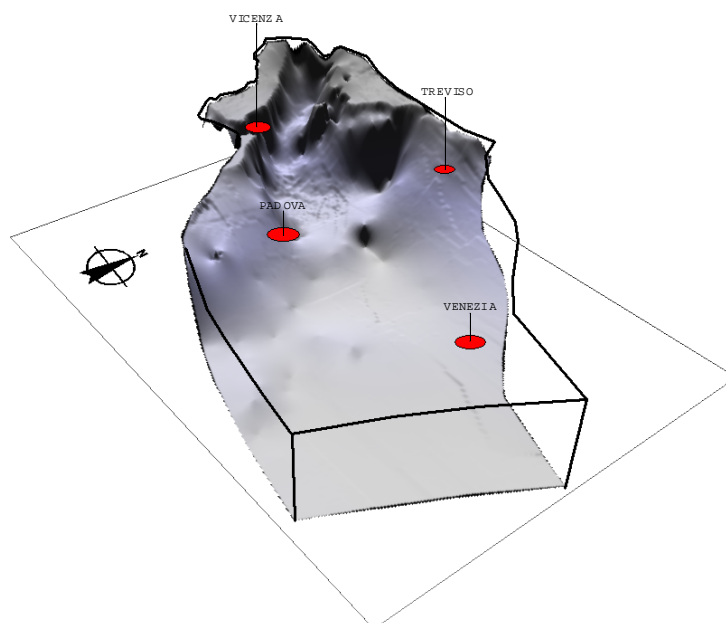


Figura 3.10: *Rappresentazione 3-D della superficie di substrato impermeabile.*

6 livelli poco permeabili (acquitardi) che separano le formazioni geologiche con permeabilità tale da permettere la circolazione di portate significative d'acqua (acquiferi). Le velocità dei flussi idrici all'interno degli acquitardi sono molto ridotte rispetto a quelle negli acquiferi.

Per conferire attendibilità al modello così generato, si è voluto procedere alla validazione della ricostruzione geologica ottenuta in prima analisi, attraverso l'utilizzo di informazioni stratigrafiche (sezioni e stratigrafie) non considerate nella prima fase, al fine di confermare o correggere il modello geostrutturale.

Il lavoro è stato svolto in collaborazione con lo studio di geologia Sinergeo, che ha condiviso competenza e conoscenza del territorio (mettendo a disposizione una corposa banca dati stratigrafici).

Le tracce dei nuovi profili stratigrafici presi in esame, rappresentate in figura 3.11, sono:

- sezione AB derivante dallo studio sugli acquiferi di Vicenza svolto da AIM-CNR [1];

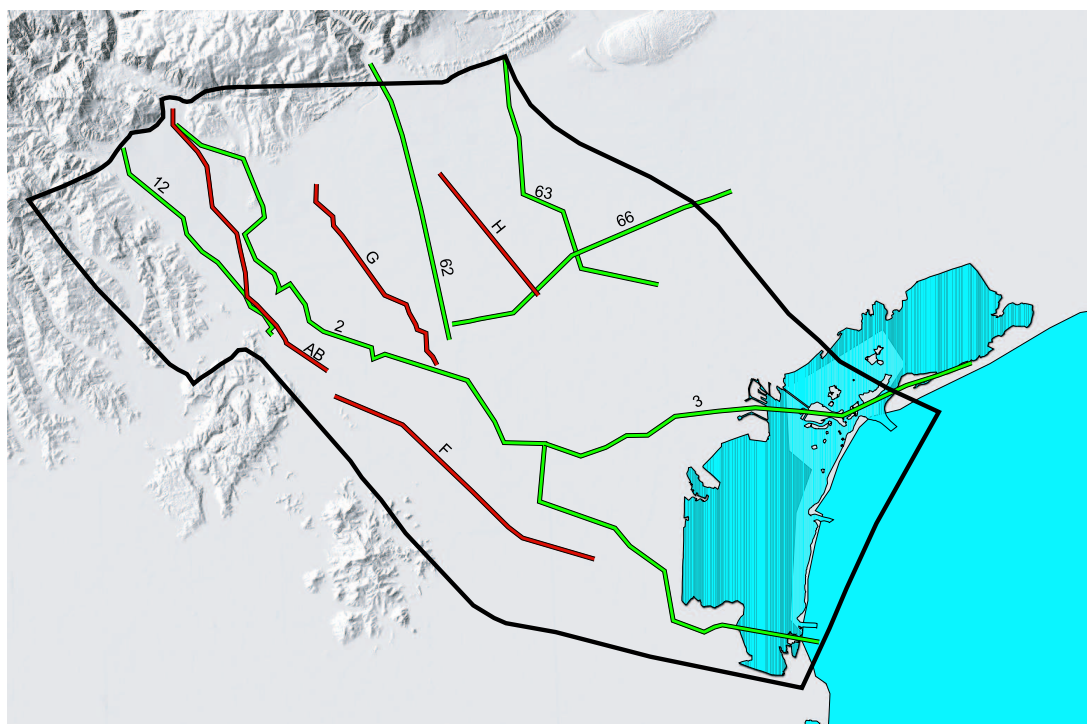


Figura 3.11: *Traccia delle 4 sezioni considerate nella fase di validazione del modello geostrutturale.*

- sezione F, G e H prodotte dallo studio di geologia Sinergeo.

Il profilo stratigrafico AB (figura 3.12), grazie alla sua posizione nel territorio, ha permesso di approfondire la conoscenza della conformazione lito-geologica del sottosuolo nell'area di maggior interesse ai fini dello studio. In tale area, come più volte ribadito, è essenziale avere a disposizione un'accurata ricostruzione della conformazione geologica dei terreni e, in particolare, della linea di imbocco degli acquiferi in pressione.

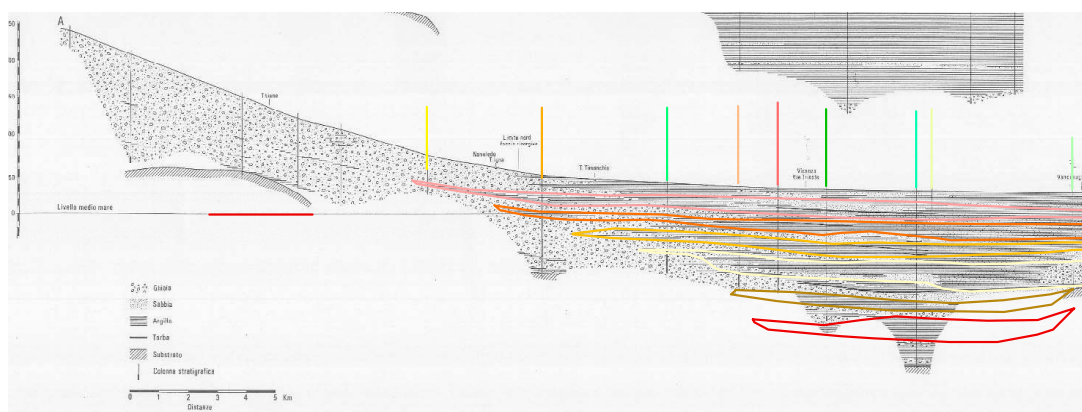


Figura 3.12: Interpretazione della sezione AB dello studio sugli acquiferi di Vicenza [1].

In un secondo momento si sono utilizzate le sezioni elaborate dallo studio Sinergeo, ottenute dall'interpretazione di un adeguato numero di stratigrafie. Le tracce dei profili stratigrafici, noti come F, G ed H, sono visibili in figura 3.11. L'andamento longitudinale (NO-SE) di queste sezioni ha permesso di correggere la posizione della linea comparsa delle formazioni argillose anche al di fuori dell'area di interesse.

Si è proceduto quindi ad una seconda interpolazione che tenesse conto dell'inserimento delle nuove informazioni ricavate dalle nuove sezioni e sono state ottenute 12 nuove superfici di discontinuità tra gli acquiferi e le lenti di argilla. Al termine della fase di validazione, gli effetti indotti sul modello strutturale si sono avuti principalmente in relazione alla comparsa delle lenti a bassa permeabilità, che risulta slittata verso sud rispetto alla posizione precedente. In figura

3.16 si può notare la comparsa della prima e della seconda lente di argilla prima e dopo la validazione del modello. La posizione e le profondità dei diversi livelli, acquiferi e acquitardi, è stata, invece, sostanzialmente confermata dalla verifica condotta. Nelle figure 3.13, 3.14 ed 3.15 sono rappresentati i profili stratigrafici F,G ed H ai quali sono stati sovrapposti i contorni (linee continue di diverso colore) delle lenti di argilla relative al modello geo-strutturale ottenuto nella prima fase.

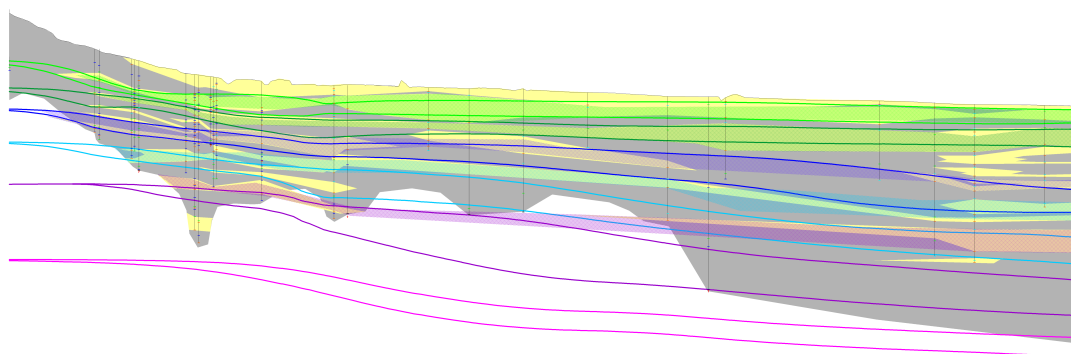
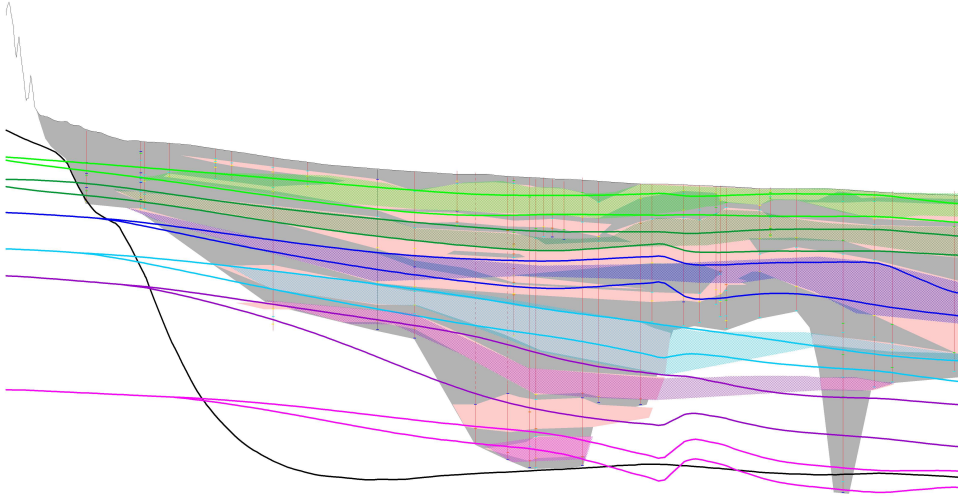
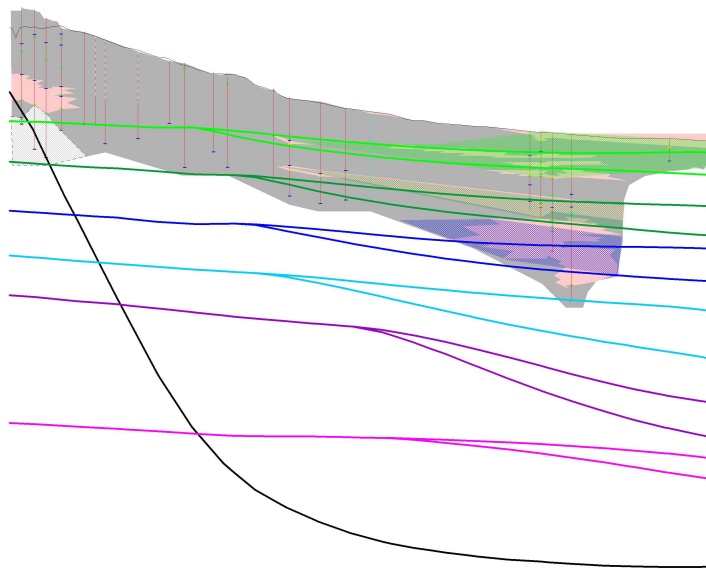


Figura 3.13: *Sezione F.*

Nella versione definitiva del modello geo-strutturale è ancora presente la suddivisione in 13 livelli: 7 livelli produttivi separati tra loro da 6 lenti di argilla o comunque da materiale poco permeabile. Nelle figure 3.17 e 3.18 sono riportati due profili stratigrafici ottenuti dal modello tridimensionale; esso è delimitato superiormente ed inferiormente rispettivamente dalla superficie freatica e dal substrato roccioso impermeabile, ottenute tramite interpolazione come descritto nei paragrafi precedenti. Come si può vedere, nella sezione AA (figura 3.17), all'altezza di Abano, la superficie di substrato roccioso risale per la presenza dei Colli Euganei ed il numero di lenti d'argilla e quindi di livelli produttivi si riduce; nella sezione BB (figura 3.18), più ad ovest, non interessata dalla presenza di conformazioni collinari-rocciose, si possono apprezzare i 7 distinti acquiferi (1 freatico e 6 acquiferi confinati).

Nelle figure 3.19 e 3.20 sono riportate le viste tridimensionali del modello geo-

Figura 3.14: *Sezione G.*Figura 3.15: *Sezione H.*

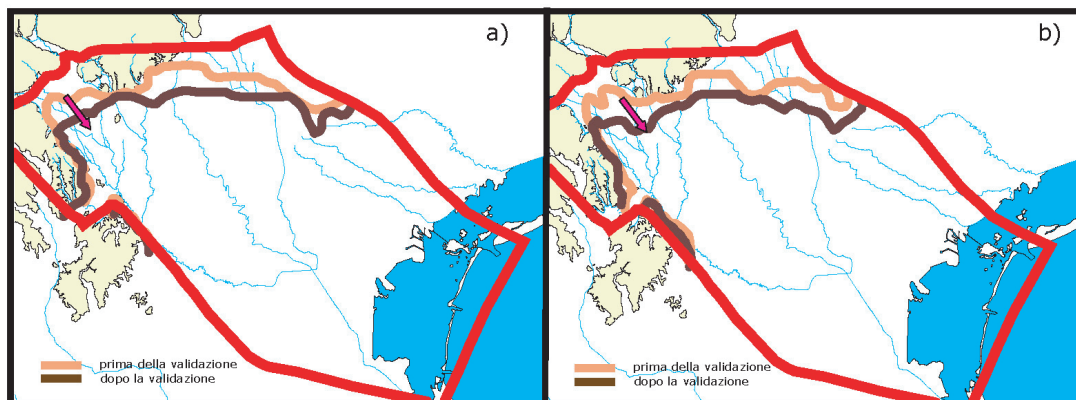


Figura 3.16: *Comparsa delle lenti di argilla prima e dopo la validazione: a) prima lente di argilla; b) seconda lente di argilla.*

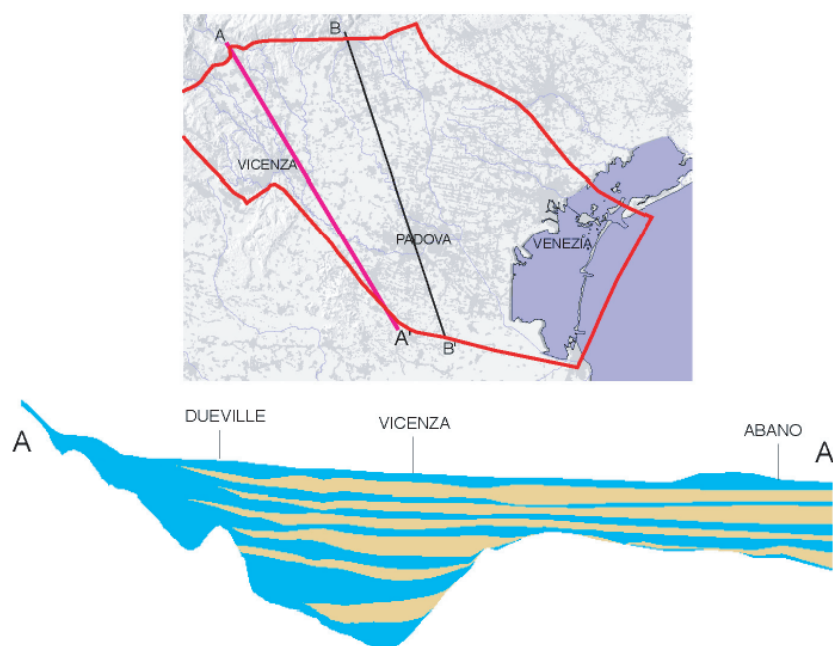


Figura 3.17: *Sezione AA, ottenuta dal modello geo-strutturale validato.*

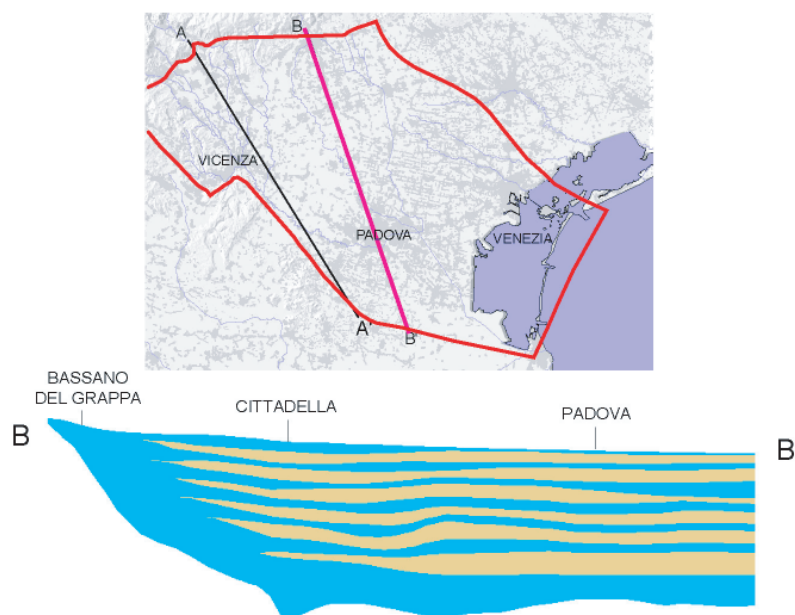


Figura 3.18: Sezione *BB*, ottenuta dal modello geo-strutturale validato.

strutturale. L'esaurimento delle lenti (effetto di *pinch out* ossia di chiusura delle lenti), salendo verso nord, è ben riprodotto nel modello geostrutturale finale. Si può quindi concludere che la transizione tra acquifero indifferenziato e sistema multifalde è ben rappresentata.

In figura 3.21 sono riportate le tracce della comparsa della prima e della seconda lente di argilla rispetto alla posizione delle risorgive e dei siti di cava, per i quali si può ipotizzare una riconversione ad impianti di ricarica della falda. Come esposto in precedenza, la ricarica artificiale concorre alla ricarica degli acquiferi confinati solo se realizzata a monte dell'imbocco degli acquiferi in pressione stessi. Dalla figura 3.21, si nota che, mentre alcuni siti si collocano nella zona dell'acquifero indifferenziato, altri si trovano nella zona dove è già presente la prima lente di argilla. Si sottolinea che le tracce derivano dal modello strutturale ricostruito nel corso del presente studio, che è chiaramente una semplificazione della situazione reale. Come anticipato, prima di realizzare l'impianto di ricarica, sarà necessario condurre adeguate indagini geognostiche a grande profondità che permettano di

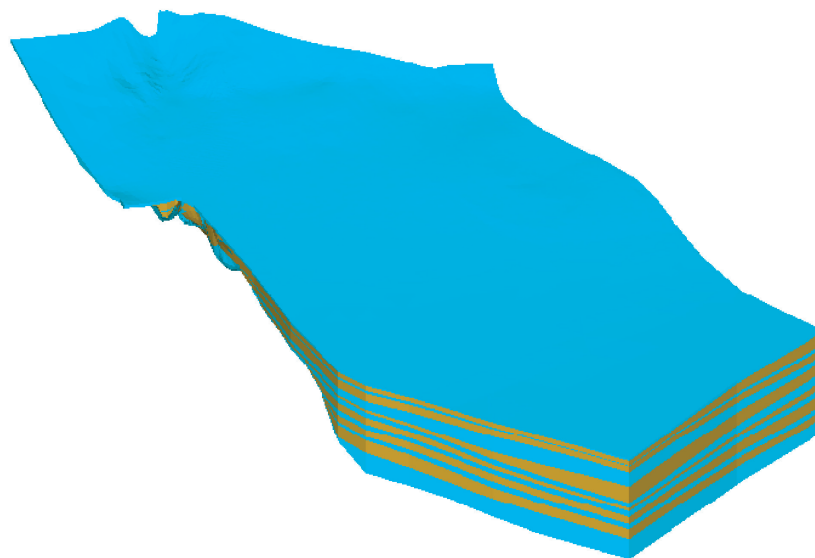


Figura 3.19: *Rappresentazione 3-D del modello geo-strutturale (vista da sud-ovest).*

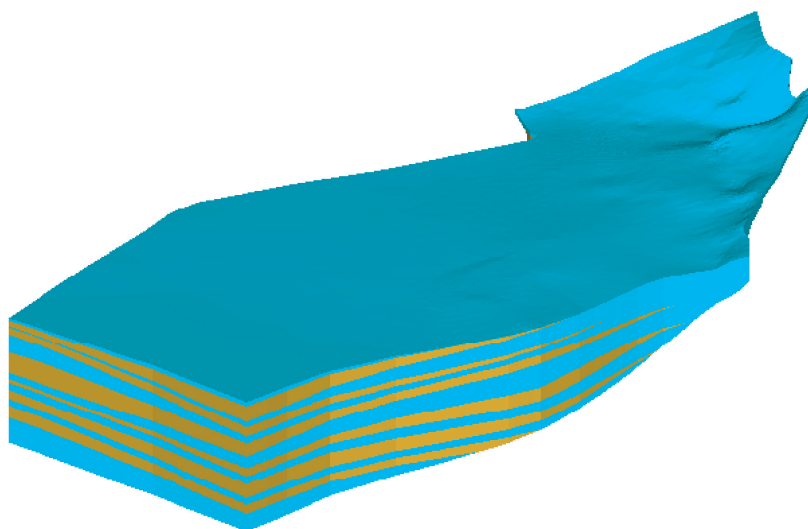


Figura 3.20: *Rappresentazione 3-D del modello geo-strutturale (vista da sud-est).*

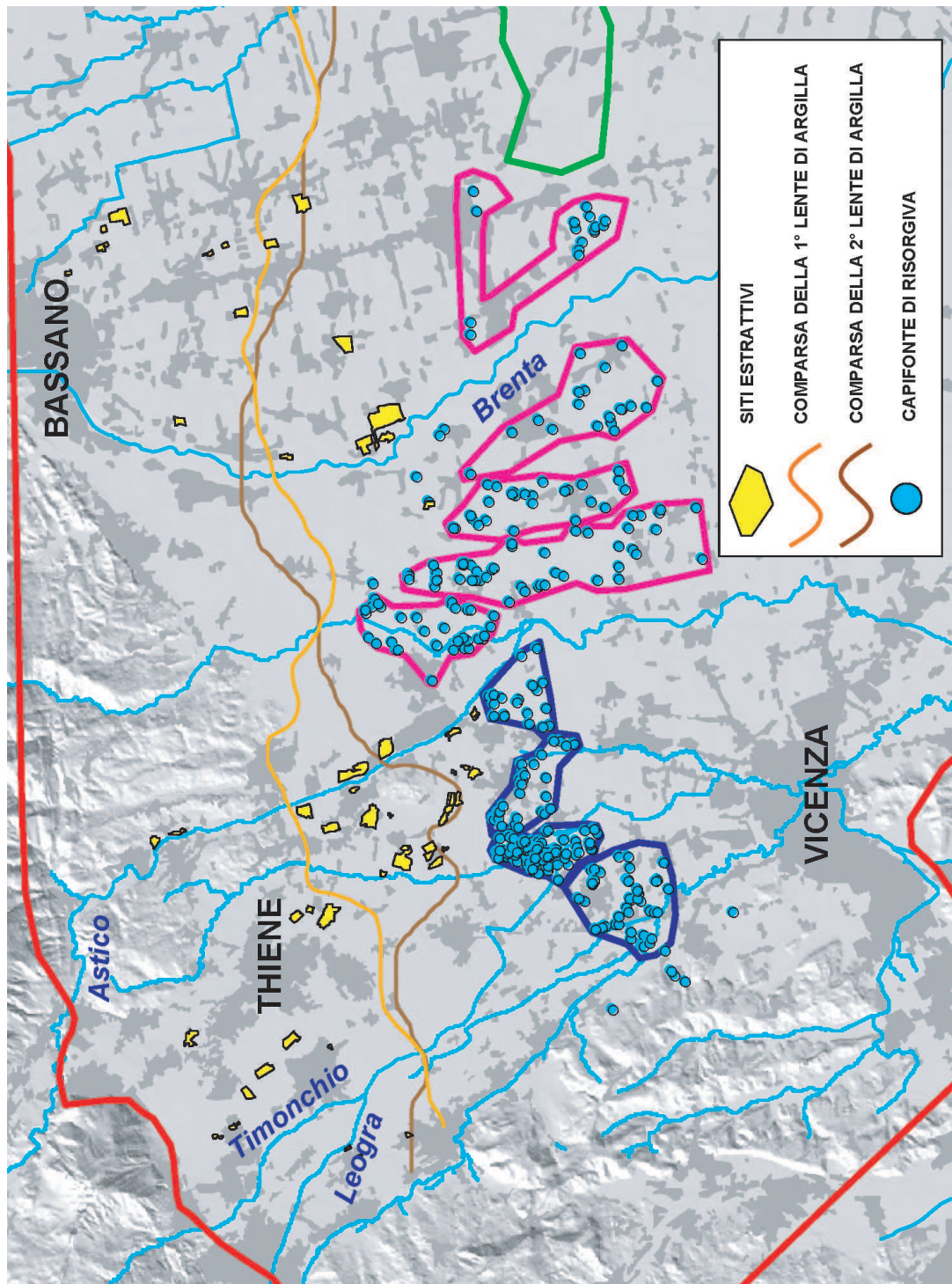


Figura 3.21: *Comparsa della prima e della seconda lente a bassa permeabilità.*

ricostruire le successioni stratigrafiche al fine di determinare l'effettiva capacità di infiltrazione del sito.

3.3 Caratterizzazione degli acquiferi

Dopo aver stimato le portate in ingresso ed in uscita dal dominio e aver ricostruito il modello strutturale, sono stati raccolti ed organizzati i valori dei parametri idrogeologici, in particolare del coefficiente di permeabilità [m/s], degli acquiferi oggetto del presente studio. I valori derivano dalle seguenti fonti:

- studio AIM-CNR del 1982 [1], che riporta 20 valori puntuali di permeabilità, ottenuti attraverso prove con tracciante;
- banca dati di APS, contenente 21 valori di permeabilità dedotti dalla curva caratteristica dei 21 pozzi di attingimento;
- banca dati dello studio Sinergeo, contenente circa 120 valori ricavati principalmente da prove di pompaggio di lunga durata;
- prove di pompaggio, da noi commissionate, eseguite da Sinergeo nei mesi di novembre-dicembre 2004 presso i campi di produzione di AIM di viale Cricoli e di zona Laghetto (Vicenza) [20].

I valori raccolti sono stati suddivisi in base all'acquifero di riferimento; inoltre la distribuzione spaziale, implementata attraverso l'interpolatore spaziale kriging, del logaritmo della permeabilità relativa all'acquifero freatico ha evidenziato che le zone più permeabili sono localizzate in corrispondenza della fascia delle risorgive, degli alvei disperdenti e dei paleoalvei dei torrenti.

Si sottolinea che, al fine dell'implementazione del modello di flusso, i valori puntuali di permeabilità raccolti vengono considerati valori indicativi di riferimento. I parametri idrogeologici vengono infatti assegnati a macro-zone (figura 3.24), e devono così essere valori medi rappresentativi della variabilità spaziale della permeabilità all'interno della macro-zona stessa.

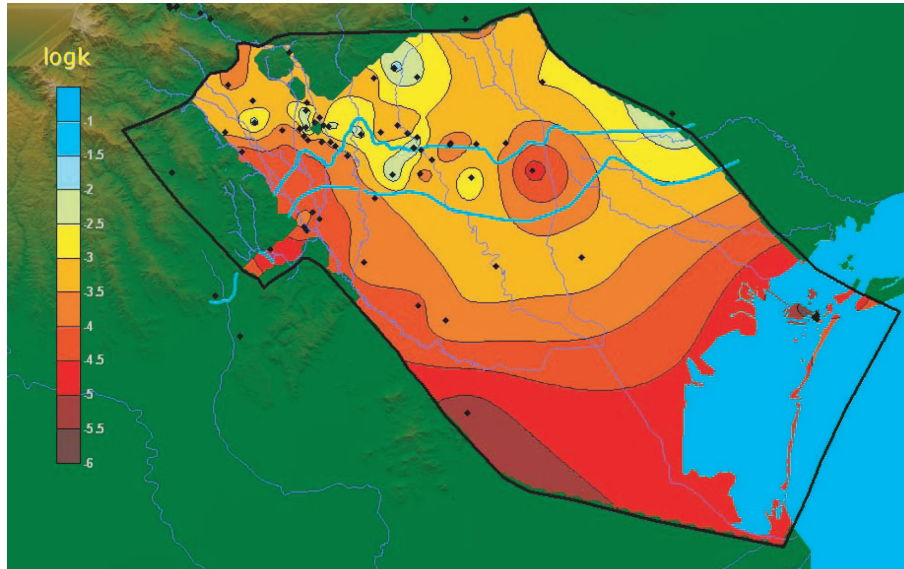


Figura 3.22: Distribuzione spaziale del logaritmo della permeabilità dell'acquifero freatico.

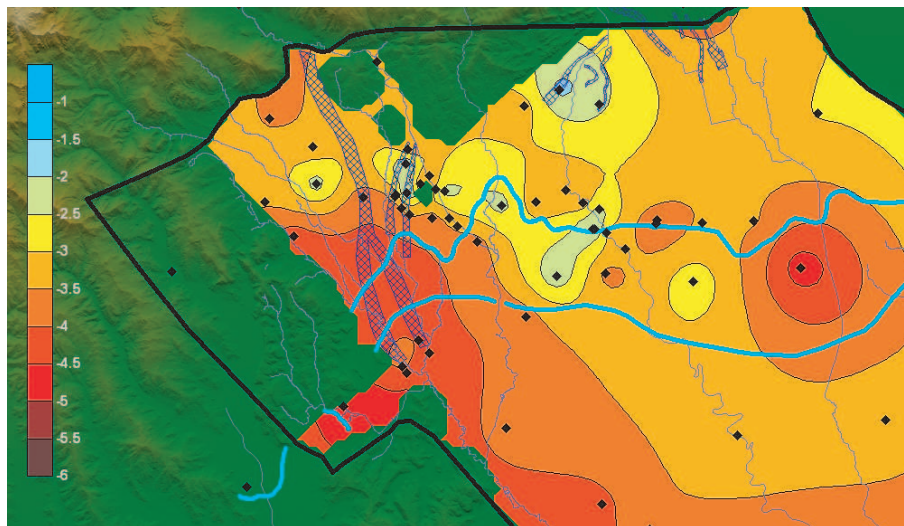


Figura 3.23: Distribuzione spaziale del logaritmo della permeabilità - zoom su area di interesse.

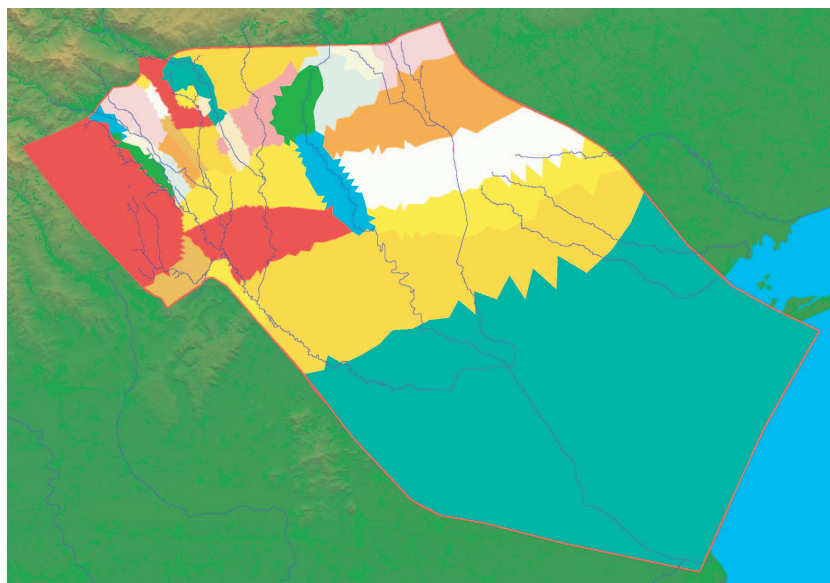


Figura 3.24: 34 zone per l'assegnazione dei parametri idrogeologici.

3.4 Vicende paleoidrografiche

Come precedentemente esposto, l'instabilità degli alvei dei corsi d'acqua nel corso del tempo è la causa della sovrapposizione e della compenetrazione delle conoidi alluvionali ghiaiose che costituiscono l'alta pianura.

Nella seconda metà dell'800 l'ing. Molon, sulla base di osservazioni di carattere morfologico e stratigrafico, dimostrò che il sottosuolo dell'alto vicentino si era formato in seguito alla compenetrazione delle conoide dell'Astico e del Brenta, e che a partire dal quaternario l'Alto Vicentino fosse caratterizzato da una rete idrografica estremamente diversa [32].

É ormai accertato che in passato l'Astico avesse il suo sbocco in pianura tra Caltrano e Piovene Rocchette, da cui iniziava la grande conoide alluvionale, che, passando per Vicenza, arrivava a lambire i Monti Berici (percorso A1, figura 3.25). Ad ovest della conoide (paleoalveo) A1 si trovano i resti di altre alluvioni, le quali, per la loro composizione mineralogica, sono risultate appartenere al sistema Leogra-Timonchio. Nel corso delle numerose e complesse divagazioni, l'Astico ha generato una vastissima conoide, sulla quale ha inciso il suo alveo

attuale. Il fenomeno dello shifting non ha interessato esclusivamente l'Astico, ma tutta la rete idrografica dell'epoca. Le conoidi più recenti dell'Astico (A4, A5, A6) coprono infatti antiche conoidi del Brenta che in passato lambiva Vicenza e proseguiva il suo corso dove attualmente scorre il fiume Bacchiglione.

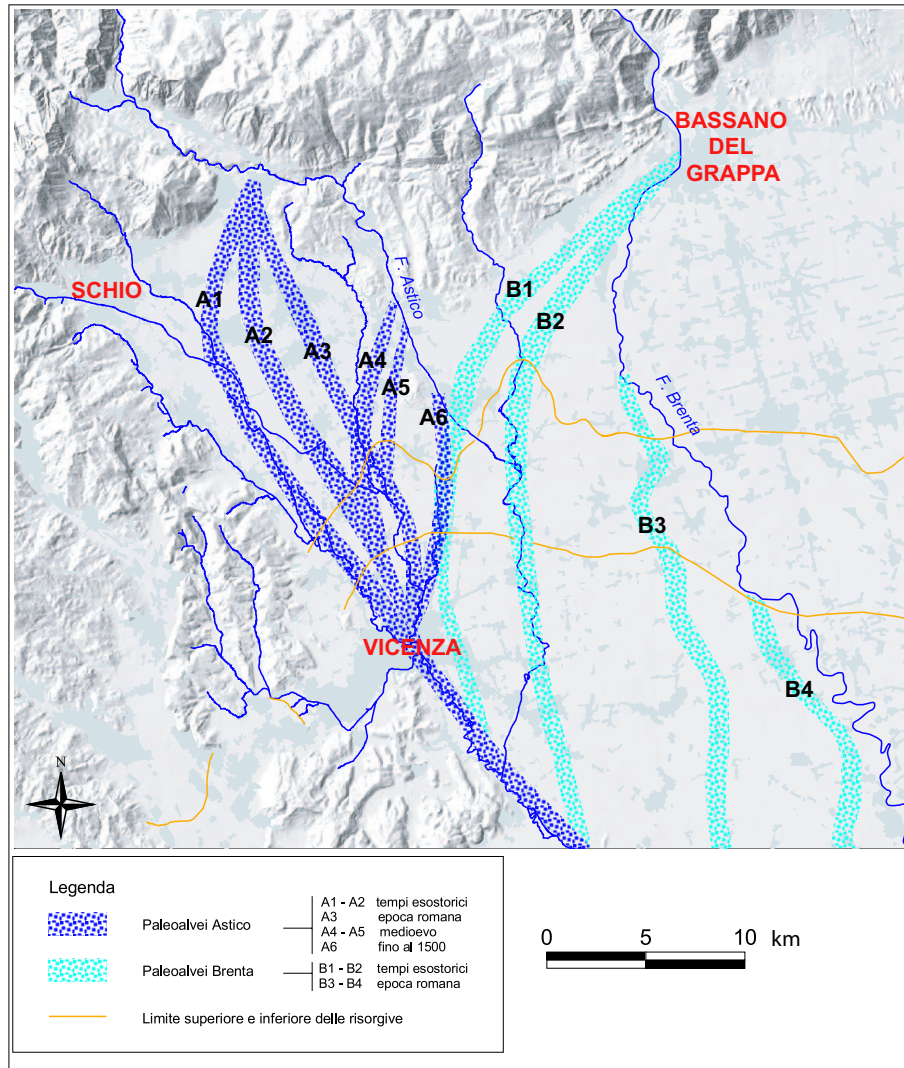


Figura 3.25: *Paleovalvei dell'Astico e del Brenta [33].*

Capitolo 4

Il modello di flusso

4.1 Risoluzione dell'equazione della filtrazione con il metodo degli elementi finiti

Si consideri l'equazione della filtrazione tridimensionale in un acquifero in pressione:

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) = f(x, y, z) + S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.1)$$

dove:

- K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} rappresentano la permeabilità idraulica (o conduttività) rispettivamente lungo le direzioni x , y , z [m/s];
- h rappresenta il potenziale idraulico o quota piezometrica [m];
- $f(x, y, z)$ si definisce termine sorgente o forzante;
- S_s è il coefficiente di immagazzinamento specifico [1/m].

Si definisce una soluzione approssimata \hat{h} nella forma:

$$h \approx \hat{h} = \sum_{i=1}^N h_i N_i(x, y, z) \quad (4.2)$$

dove $N_i(x, y, z)$ sono le funzioni base lineari che valgono 1 in i e 0 altrove, in modo che la soluzione approssimata soddisfi i valori noti h_i sugli N punti di appoggio, rappresentati dai nodi della mesh. Sostituendo la 4.2 nell'equazione del residuo

$$L(h) = \frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) - f(x, y, z) - S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

si ottiene

$$L(\hat{h}) = \frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial \hat{h}}{\partial z}) - f(x, y, z) - S_s \frac{\partial \hat{h}}{\partial t}$$

Utilizzando il metodo di Galerkin, si impone l'ortogonalità del residuo alle N funzioni base $N_i(x, y, z)$, ottenendo:

$$\int_R L(\hat{h}) N_i(x, y, z) dR = 0 \quad i = 1, \dots, N \quad (4.3)$$

cioè, tenendo conto anche del residuo generato dall'approssimazione del potenziale che soddisfa la condizioni di Neumann sul contorno Γ_2 :

$$\begin{aligned} \int_R \left[\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial \hat{h}}{\partial z}) \right] N_i(x, y, z) dR + \\ \int_R \left[-f(x, y, z) - S_s \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} \right] N_i(x, y, z) dR + \\ \int_{\Gamma_2} \left(q - K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} n_x - K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} n_y - K_{zz} \frac{\partial \hat{h}}{\partial z} n_z \right) N_i(x, y, z) d\Gamma = 0 \\ i = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (4.4)$$

Utilizzando il Lemma di Green, si trasferiscono le derivate alle funzioni base, cioè:

$$\begin{aligned} \int_R \frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x}) N_i(x, y, z) dR = \\ \int_R \frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} N_i(x, y, z) \right] dR - \int_R K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} dR = \\ \int_{\partial R} K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} N_i(x, y, z) n_x d\Gamma - \int_R K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} dR \end{aligned} \quad (4.5)$$

Considerando che le funzioni base $N_i(x, y, z)$ si annullano sul contorno di Dirichlet dove ho potenziale assegnato, nell'ipotesi di assi coordinati x, y, z paralleli alle direzioni principali di anisotropia, l'applicazione del Lemma di Green al primo termine a primo membro della 4.4 produce:

$$\begin{aligned} \int_R \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial \hat{h}}{\partial z} \right) \right] N_i(x, y, z) dR = \\ - \int_R \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} + K_{zz} \frac{\partial \hat{h}}{\partial z} \frac{\partial N_i}{\partial z} \right] dR + \\ \int_{\Gamma_2} \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} n_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} n_y + K_{zz} \frac{\partial \hat{h}}{\partial z} n_z \right] N_i(x, y, z) d\Gamma \end{aligned}$$

che, sostituita nella 4.4, produce le equazioni di Galerkin:

$$\begin{aligned} \int_R \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} + K_{zz} \frac{\partial \hat{h}}{\partial z} \frac{\partial N_i}{\partial z} \right] dR + \\ \int_R \left[f(x, y, z) + S_s \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} \right] N_i(x, y, z) dR - \int_{\Gamma_2} q N_i(x, y, z) d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Sostituendo nell'equazione precedente le seguenti espressioni:

$$\hat{h} = \sum_{i=1}^N h_i N_i(x, y, z)$$

$$\frac{\partial \hat{h}}{\partial x} = \sum_{i=1}^N h_i \frac{\partial N_i(x, y, z)}{\partial x}$$

$$\frac{\partial \hat{h}}{\partial t} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial h_i}{\partial t} N_i(x, y, z)$$

si ottiene:

$$\begin{aligned} \int_R \left\{ K_{xx} \left[\sum_{i=1}^N h_i \frac{\partial N_i}{\partial x} \right] \frac{\partial N_i}{\partial x} + K_{yy} \left[\sum_{i=1}^N h_i \frac{\partial N_i}{\partial y} \right] \frac{\partial N_i}{\partial y} + K_{zz} \left[\sum_{i=1}^N h_i \frac{\partial N_i}{\partial z} \right] \frac{\partial N_i}{\partial z} \right\} dR + \\ \int_R [f(x, y, z) N_i] dR + \int_R \left[S_s N_i \sum_{i=1}^N \frac{\partial h_i}{\partial t} N_i \right] \\ - \int_{\Gamma_2} q N_i(x, y, z) d\Gamma = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N h_i \left[\sum_e \int_{\Delta^e} \left(K_{xx}^e \frac{\partial N_i^e}{\partial x} \frac{\partial N_j^e}{\partial x} + K_{yy}^e \frac{\partial N_i^e}{\partial y} \frac{\partial N_j^e}{\partial y} + K_{zz}^e \frac{\partial N_i^e}{\partial z} \frac{\partial N_j^e}{\partial z} \right) d\Delta^e \right] + \\ & \sum_e \int_{\Delta^e} f^e N_j^e d\Delta^e - \sum_e \int_{\Gamma_2^e} q_n^e N_j^e d\Gamma^e + \sum_{i=1}^N \frac{\partial h_i}{\partial t} \left[\sum_e \int_{\Delta^e} S_s N_i^e N_j^e d\Delta^e \right] = 0 \\ & j = 1, \dots, N \quad (4.7) \end{aligned}$$

essendo Δ^e l'area del generico elemento tetraedrico e e Γ_2 il contorno del dominio dove si impongono le condizioni di Neumann.

La 4.7 scritta in forma matriciale diventa:

$$\mathbf{P} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} + \mathbf{H} \mathbf{h} + \mathbf{q}^* = 0 \quad (4.8)$$

Siamo quindi in presenza di un sistema lineare nell'incognita \mathbf{h} , dove $\mathbf{h} = (h_1, h_2, \dots, h_N)^T$, e gli elementi della matrice \mathbf{H} (matrice di rigidità), della matrice \mathbf{P} (matrice di capacità o delle masse) e del vettore dei termini noti \mathbf{q}^* sono:

$$\begin{aligned} H_{ij} &= \sum_e \int_{\Delta^e} \left(K_{xx}^e \frac{\partial N_i^e}{\partial x} \frac{\partial N_j^e}{\partial x} + K_{yy}^e \frac{\partial N_i^e}{\partial y} \frac{\partial N_j^e}{\partial y} + K_{zz}^e \frac{\partial N_i^e}{\partial z} \frac{\partial N_j^e}{\partial z} \right) d\Delta^e \\ P_{ij} &= \sum_e \int_{\Delta^e} S_s N_i^e N_j^e d\Delta^e \\ q_i^* &= \sum_e \int_{\Delta^e} f^e N_i^e d\Delta^e - \int_{\Gamma_2^e} q_n^e N_i^e d\Gamma^e. \end{aligned} \quad (4.9)$$

L'equazione 4.8 è un sistema di equazioni differenziali del primo ordine e può essere integrata nel tempo con uno schema alle differenze finite, pesato con parametro θ . Detti h^{k+1} e h^k i vettori dei potenziali nodali rispettivamente al tempo $(k+1)\Delta t$ e $k\Delta t$, dove Δt è il passo temporale, si può definire il vettore dei potenziali al tempo $(k+\theta)\Delta t$, essendo θ compreso tra 0 e 1:

$$h^{k+\theta} = \theta h^{k+1} + (1-\theta) h^k. \quad (4.10)$$

Discretizzando l'equazione (4.8) al tempo $k+\theta$ si può scrivere:

$$\mathbf{P} \frac{h^{k+1} - h^k}{\Delta t} + \mathbf{H} h^{k+\theta} = \mathbf{q}^*.$$

Sostituendo $h^{k+\theta}$ dato dalla (4.10), questa equazione si riduce al sistema algebrico lineare:

$$\left[\frac{1}{\Delta t} \mathbf{P} + \theta \mathbf{H} \right] h^{k+1} = \left[\frac{1}{\Delta t} \mathbf{P} - (1 - \theta) \mathbf{H} \right] h^k + \mathbf{q}^* \quad (4.11)$$

e può essere anch'esso risolto con il metodo dei gradienti coniugati preconditionati.

Il sistema si risolve con lo schema di Eulero in avanti per $\theta = 0$, con quello di Eulero all'indietro per $\theta = 1$ ed infine con quello di Crank Nicolson per $\theta = 0,5$. Per avere stabilità numerica senza imporre restrizioni al passo temporale Δt , il parametro θ deve scegliersi nell'intervallo

$$\frac{1}{2} \leq \theta \leq 1$$

La soluzione dell'equazione 4.11 richiede ovviamente l'imposizione delle condizioni iniziali e di quelle al contorno. Note tali condizioni è necessario risolvere il sistema lineare ad ogni passo temporale.

Poichè sia \mathbf{P} che \mathbf{H} non dipendono dal tempo, i loro assemblaggi vengono effettuati simultaneamente prima di incominciare il ciclo temporale.

La matrice del sistema

$$\left[\frac{1}{\Delta t} \mathbf{P} + \theta \mathbf{H} \right]$$

e la prima parte del termine noto

$$\left[\frac{1}{\Delta t} \mathbf{P} - (1 - \theta) \mathbf{H} \right] h^k + \mathbf{q}^*$$

si possono ottenere ad ogni istante temporale a partire dalle matrici \mathbf{P} e \mathbf{H} .

L'imposizione delle condizioni di Dirichlet (potenziale assegnato) avviene pre-assegnando il valore del potenziale lì dove esso è noto. Per far ciò sarebbe necessario imporre un valore unitario al termine diagonale corrispondente al nodo di Dirichlet, e azzerare tutti gli elementi extradiagonali della riga e della colonna corrispondenti, imponendo il valore della condizione di Dirichlet nell'elemento del termine noto corrispondente al nodo. Il codice però procede sostituendo l'elemento diagonale della matrice del sistema con un valore molto grande RMAX,

e imponendo il valore del termine noto corrispondente uguale al valore di Dirichlet moltiplicato per RMAX. In questo modo la condizione al contorno sarebbe esattamente soddisfatta se RMAX = ∞ ; essendo esso un numero molto grande si ritiene soddisfatta.

L'equazione viene utilizzata anche nel caso di acquiferi a superficie libera (freatica) imponendo sui nodi della superficie stessa la condizione gravity drainage:

$$K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} = -S_y \frac{\partial h}{\partial t} + I$$

dove S_y è lo specific yield dell'acquifero (porosità di drenaggio o dei vuoti interconnessi, adimensionale) e I è la ricarica netta della falda per unità di area orizzontale [m/s]. L'imposizione di questa ulteriore condizione comporta la comparsa di un nuovo termine nell'equazione 4.7:

$$\begin{aligned} & \int_R \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} + K_{zz} \frac{\partial \hat{h}}{\partial z} \frac{\partial N_i}{\partial z} \right] dR + \\ & \int_R \left[f(x, y, z) + S_s \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} \right] N_i(x, y, z) dR - \int_{\Gamma_2} q N_i(x, y, z) d\Gamma + \\ & - \int_{\Gamma_3} \left[K_{zz} \frac{\partial \hat{h}}{\partial z} N_i(x, y, z) \right] d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} & \int_R \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} + K_{zz} \frac{\partial \hat{h}}{\partial z} \frac{\partial N_i}{\partial z} \right] dR + \\ & \int_R \left[f(x, y, z) + S_s \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} \right] N_i(x, y, z) dR - \int_{\Gamma_2} q N_i(x, y, z) d\Gamma + \\ & + \int_{\Gamma_3} \left[S_y \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} - I \right] N_i(x, y, z) d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N h_i \left[\sum_e \int_{\Delta^e} \left(K_{xx}^e \frac{\partial N_i^e}{\partial x} \frac{\partial N_j^e}{\partial x} + K_{yy}^e \frac{\partial N_i^e}{\partial y} \frac{\partial N_j^e}{\partial y} + K_{zz}^e \frac{\partial N_i^e}{\partial z} \frac{\partial N_j^e}{\partial z} \right) d\Delta^e \right] + \\ & \sum_e \int_{\Delta^e} f^e N_j^e d\Delta^e - \sum_e \int_{\Gamma_2^e} q_n^e N_j^e d\Gamma_2^e - \sum_e \int_{\Gamma_3^e} I N_j^e d\Gamma_3^e + \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{\partial h_i}{\partial t} \left[\sum_e \int_{\Delta^e} S_s N_i^e N_j^e d\Delta^e + \sum_e \int_{\Gamma_3^e} S_y N_i^e N_j^e d\Gamma_3^e \right] = 0$$

$$j = 1, \dots, N \quad (4.14)$$

che scritta in forma matriciale diventa:

$$\mathbf{P}' \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} + \mathbf{H} \mathbf{h} + \mathbf{q}^* + \mathbf{I} = 0 \quad (4.15)$$

dove P' si compone di 2 parti, 1 contenente il volume del tetraedro e e 1 contenente l'area afferente al nodo.

Le condizioni al contorno di Neumann (flusso assegnato) vengono imposte sommando al termine noto la nuova portata \mathbf{q}^* :

$$\left[\frac{1}{\Delta t} \mathbf{P} + \theta \mathbf{H} \right] h^{k+1} = \left[\frac{1}{\Delta t} \mathbf{P} - (1 - \theta) \mathbf{H} \right] h^k + \mathbf{q}^* \quad (4.16)$$

La differenza sostanziale tra un modello quasi-3D e il modello 3D si riscontra nella schematizzazione del modello geologico strutturale e nelle componenti spaziali dei flussi idrici. Infatti, un modello quasi-3D simula un flusso orizzontale negli acquiferi e verticale negli acquitard (lenti a bassa permeabilità) e non permette quindi di simulare adeguatamente il passaggio dal sistema indifferenziato al sistema multifalde. Il modello 3D implementato, invece, permette di utilizzare il modello geo-strutturale tridimensionale ottenuto dall'elaborazione di sezioni geologiche e di stratigrafie, in cui le lenti impermeabili si esauriscono gradatamente. Inoltre il flusso dell'acqua è tridimensionale sia negli acquiferi che nelle lenti a bassa permeabilità (figura 4.1).

4.2 Area di interesse e dominio del modello

Obiettivo del presente studio è l'implementazione di un modello matematico tridimensionale del flusso idrico sotterraneo relativo ai territori dell'alta pianura del Veneto. Come anticipato nel secondo capitolo, una volta evidenziata l'area di interesse e tracciate le linee isofreatiche in un'area molto ampia e comprendente

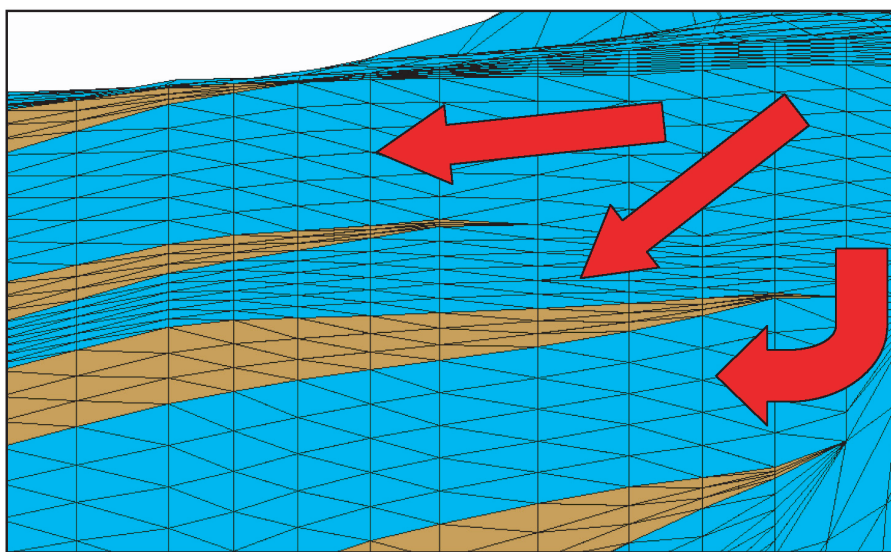


Figura 4.1: *Modello strutturale e flussi idrici tridimensionali.*

l'area di interesse (relative alla situazione media annua del 2004), il dominio del modello di flusso (figura 4.2) è stato scelto a partire da 2 necessità:

- allontanare i confini del modello dall'area di interesse, per minimizzare l'influenza delle condizioni che verranno imposte al contorno sul campo di moto calcolato dal modello;
- individuare dei confini per i quali sia possibile definire le condizioni di moto (potenziale e/o flusso assegnato).

Le informazioni necessarie all'implementazione del modello (portate in ingresso ed in uscita, modello strutturale, parametri idrogeologici e piezometrie) sono state raccolte ed elaborate solo all'interno del dominio, con particolare cura e dettaglio all'interno dell'area di interesse. Qualora i dati in input al modello avessero una componente temporale (portate in ingresso ed in uscita e piezometrie), si è fatto riferimento ai valori medi annui relativi all'anno 2004.

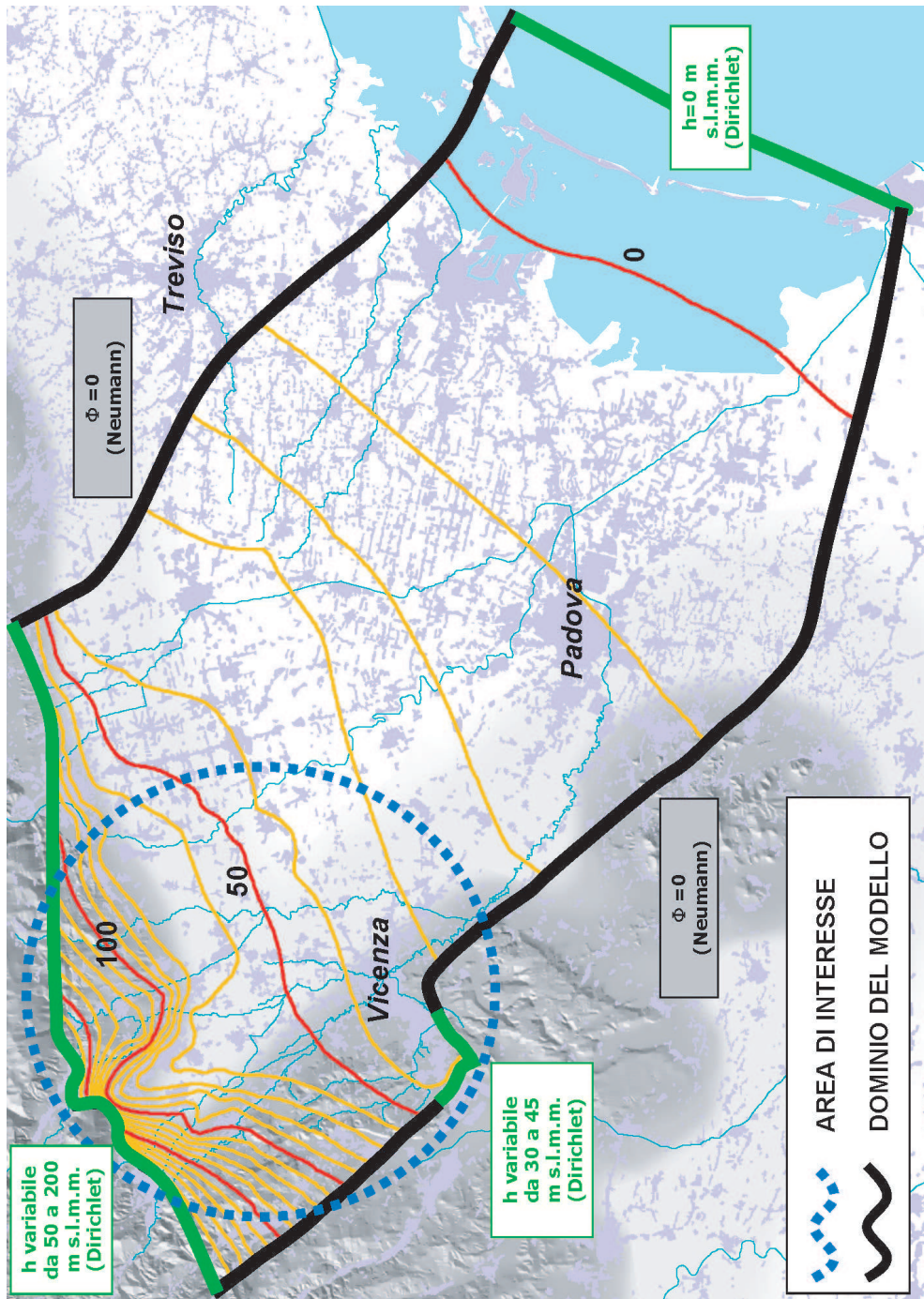


Figura 4.2: Area di interesse, isofreatiche medie anno 2004 (quote espresse in m s.l.m.m.), dominio del modello.

4.3 Zone geologiche e griglia computazionale di calcolo

All'interno dell'area del dominio, sono state individuate 34 zone per l'assegnazione dei parametri geologici (coefficiente di permeabilità, porosità e coefficiente di immagazzinamento specifico). Le zone geologiche corrispondono a particolari situazioni geologiche, quali:

- il paleoalveo dell'Astico;
- il tratto disperdente e il tratto drenante dell'alveo del Brenta;
- il sistema delle risorgive;
- l'alveo del Timonchio;
- le zone montuose (Altopiano di Asiago, Monti Lessini, Monti Berici).

La suddivisione in 34 zone è presente in tutti i livelli acquiferi, in modo da poter caratterizzare le diverse zone dei diversi acquiferi in modo indipendente. All'interno dei 6 livelli a bassa permeabilità, nonostante sia presente la suddivisione in 34 zone, è stato assegnato un unico valore (tipico dei terreni sabbiosi-argillosi) a tutti i parametri di tutte le zone.

E' evidente che la suddivisione finale in 34 zone è il risultato di un compromesso tra un'eccessiva zonizzazione, tesa a rappresentare ogni singola conformazione geologica, e una ridotta zonizzazione, finalizzata a minimizzare il numero di parametri geologici da assegnare, anche alla luce dei pochi dati di campo disponibili.

La discretizzazione dell'area del dominio in elementi finiti triangolari è stata eseguita con il programma Argus-One [34], che ha permesso di addensare i nodi della griglia bidimensionale (mesh) in corrispondenza dell'area di interesse, dove si desidera aumentare il dettaglio della distribuzione spaziale dei dati di ingresso e dei risultati. Inoltre, la mesh bidimensionale è stata vincolata a creare un nodo

sia in corrispondenza dei più importanti pozzi di attingimento, sia lungo l'alveo schematizzato dei principali corsi d'acqua.

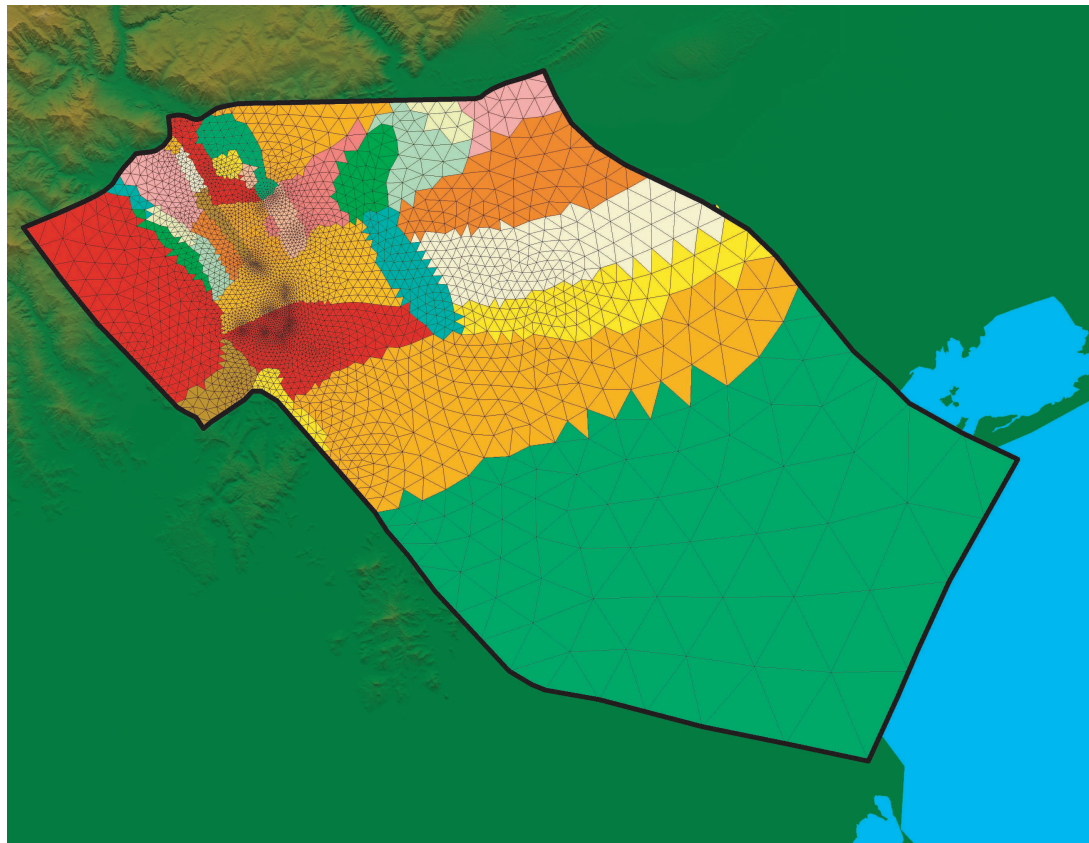


Figura 4.3: *Griglia di calcolo bidimensionale.*

A partire dalla griglia bidimensionale e dal modello geostrutturale ricostruito attraverso la procedura esposta nel capitolo 3, si è generata la griglia di calcolo tridimensionale utilizzando il software Lagrit [35]. Tale codice richiede in input l'inserimento di tutte le superfici della struttura geologica che si vuole discretizzare in elementi tridimensionali (nel nostro caso tetraedrici). Le superfici devono essere caratterizzate dalla stessa triangolatura.

Per questo motivo, le superfici:

- superiore ed inferiore delle 6 lenti di argilla,

- del substrato roccioso,
- freatica (presa come limite superiore del modello strutturale),

hanno tutte estensione pari a quella dell'intero dominio e uguale griglia bidimensionale. In particolare, le superfici di top e di bottom della lente a bassa permeabilità coincidono, generando uno strato a spessore nullo, quando l'acquifero si esaurisce.

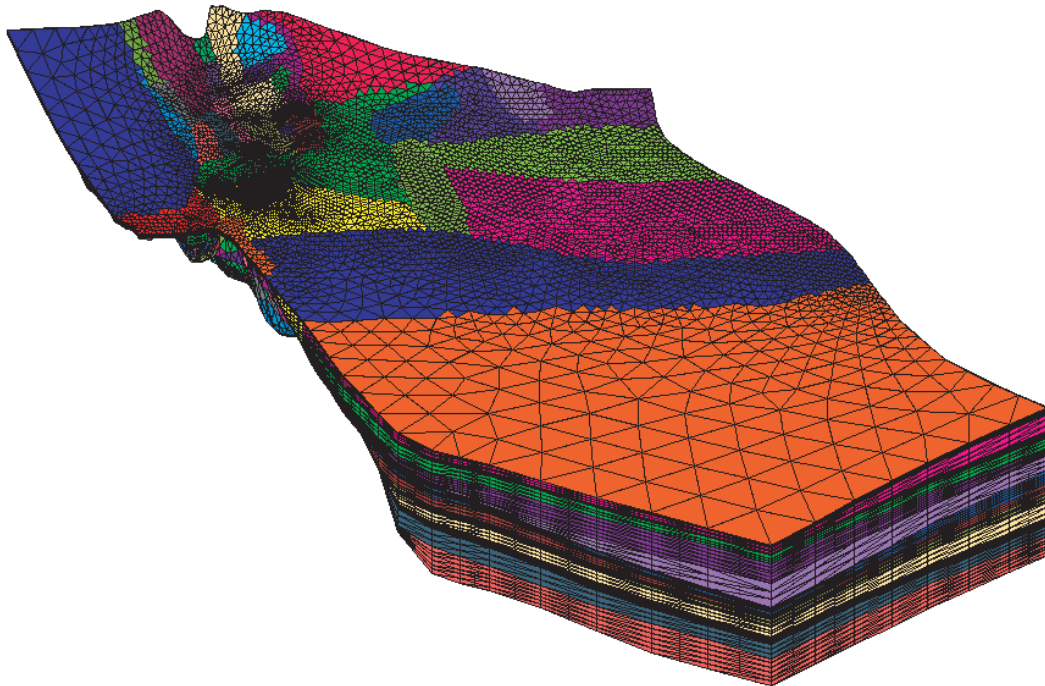


Figura 4.4: *Griglia di calcolo tridimensionale.*

Tra le 14 superfici di input sono stati aggiunti dei livelli di raffinamento (4 o 5 all'interno di ogni acquifero, 2 all'interno di ogni acquitardo). Individuati i 60 livelli, lo spazio tra 2 livelli è stato discretizzato in elementi prismatici, poi convertiti in elementi tetraedici. La griglia tridimensionale finale riproduce fedelmente il modello strutturale ricreato, in particolare l'esaurimento delle lenti argillose (chiamato fenomeno del pinch out).

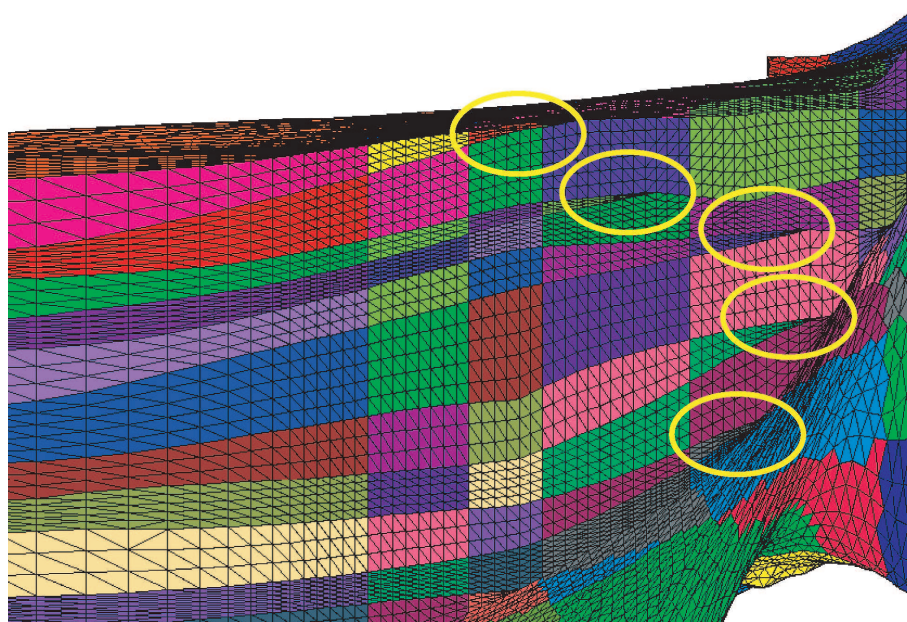


Figura 4.5: *Griglia di calcolo tridimensionale - fenomeno del pinch out.*

Griglia (mesh)	Nodi	Elementi	Materiali
2D	5.282	10.353	34
3D	143.496	831.790	455

Tabella 4.1: *Caratteristiche della griglia bidimensionale e della griglia tridimensionale.*

4.4 Il codice di calcolo

Il modello matematico di flusso implementato SAT3D, sviluppato in collaborazione con il Dipartimento di Metodi e Modelli Matematici per le Scienze applicate dell'Università di Padova, calcola il potenziale idraulico (o livello piezometrico) in tutti i nodi della griglia di calcolo, una volta assegnati i seguenti dati in ingresso:

- la griglia tridimensionale di calcolo (file *grid3d.sat3d*) ;
- le condizioni iniziali, ossia il potenziale idraulico al tempo zero (file *ic.sat3d*);
- le condizioni al contorno, cioè i valori di potenziale o di flusso assegnati ai confini del dominio (file *bc.sat3d*);
- le caratteristiche idrogeologiche dei terreni: permeabilità, porosità e coefficiente di immagazzinamento specifico (file *material.sat3d*);
- le portate del bilancio idrologico in ingresso ed in uscita dal dominio di calcolo, ossia le condizioni di Neumann (file *neu.sat3d*).

Il modello è stato implementato in condizioni stazionarie e con riferimento alla situazione media annua del 2004. La taratura del modello avviene ricercando il set di parametri idrogeologici delle 455 zone che fornisce una piezometria simulata, in particolare quella relativa all'acquifero freatico, quanto più prossima alla piezometria reale di riferimento (freatimetria media annua del 2004). I parametri che caratterizzano i terreni (in particolare, il coefficiente di permeabilità) vengono fatti variare all'interno di un intervallo di valori consentiti, raccolti nella fase di acquisizione dati.

Il modello fornisce in output il valore di potenziale in tutti i nodi della mesh. Tuttavia, al fine di visualizzare facilmente i risultati, all'interno di ogni acquifero, è stato calcolato il valore medio del potenziale lungo la verticale.

Le condizioni al contorno assegnate possono essere suddivise in 10 zone, chiamate confini di Dirichlet (figura 4.6):

- zona laguna, potenziale assegnato sull'intera parete verticale pari a 0 m s.l.m.m.;
- zona Agno Guà, potenziale assegnato sull'intera parete verticale pari a 45 m s.l.m.m. ;
- zona Bassano, potenziale assegnato sull'intera parete verticale pari a 70 m s.l.m.m.;
- zona Astico, potenziale assegnato sull'intera parete verticale pari a 174 m s.l.m.m.;
- zona Lessini, potenziale assegnato sull'intera parete verticale pari a 200 m s.l.m.m.;
- zona Novegno, potenziale assegnato sull'intera parete verticale variabile tra 128 e 200 m s.l.m.m.;
- zona Altopiano di Asiago, potenziale assegnato sull'intera parete verticale variabile tra 73 e 172 m s.l.m.m.;
- zona Agno Guà 2, potenziale assegnato sull'intera parete verticale variabile tra 32 e 43 m s.l.m.m.;
- zona Consorzi di Bonifica 1, potenziale assegnato **solo sui nodi superficiali** variabile tra 5,1 e 0,1 m s.l.m.m.;
- zona Consorzi di Bonifica 2, potenziale assegnato **solo sui nodi superficiali** pari a 0 m s.l.m.m..

I valori del potenziale sono stati ricavati dalla piezometria media annua 2004 di riferimento, utilizzata anche nella fase di taratura del modello. Sui nodi appartenenti al bordo del dominio tridimensionale sui quali non viene assegnato un valore di potenziale, il codice numerico assegna automaticamente la condizione di flusso nullo (condizione di Neumann nulla). La condizione di flusso nullo viene in seguito modificata nei nodi superficiali in cui si assegna una portata entrante

(precipitazione efficace alla ricarica) o uscente (portata sfiorante dalle risorgive), ossia una condizione di Neumann non nulla.

Il potenziale assegnato in input sui confini di Dirichlet, vincolando il valore di potenziale in output sui confini stessi, azzerava l'errore in corrispondenza di queste 10 zone. Tuttavia, il codice calcola le portate entranti o uscenti che attraversano questi confini, elencati nel file di input *bidir.sat3d*, per fare in modo che il potenziale assuma il valore assegnato. Durante la fase di taratura, è stata prestata attenzione anche ai valori di questi flussi idrici sotterranei.

Il modello di flusso è stato implementato in 2 modalità:

- imponendo la portata uscente dal sistema delle risorgive, stimata come illustrato nel capitolo 2 (condizione di Neumann sui nodi di risorgiva);
- imponendo la quota di sfioro delle risorgive, stimata 2 metri inferiore alla quota del piano campagna ricavata dal D.E.M. (condizione di Dirichlet sui nodi di risorgiva).

Nel secondo caso, avendo imposto ai fontanili una condizione di Dirichlet (potenziale assegnato), il modello fornisce in output la portata sfiorante dalle risorgive (suddivise in 10 aree). In questo modo è possibile confrontare la portata media annua 2004 in uscita dai 3 sub bacini (Astico, destra Brenta, sinistra Brenta) calcolata dal modello con quella stimata.

In figura 4.6 si vedono i 10 confini di Dirichlet e le 10 aree e i 3 sub bacini in cui sono state raggruppate le risorgive.

4.5 Taratura del modello

Vengono di seguito riportati i parametri geologici assegnati in input ed i risultati della taratura. Si ricorda nuovamente che le portate assegnate in ingresso (precipitazioni, dispersioni dei corsi d'acqua, dispersioni delle canalette irrigue, portate sfioranti dalle risorgive e prelievi pubblici e privati) sono le portate medie annue 2004, così come la piezometria di riferimento è quella media dell'anno 2004.

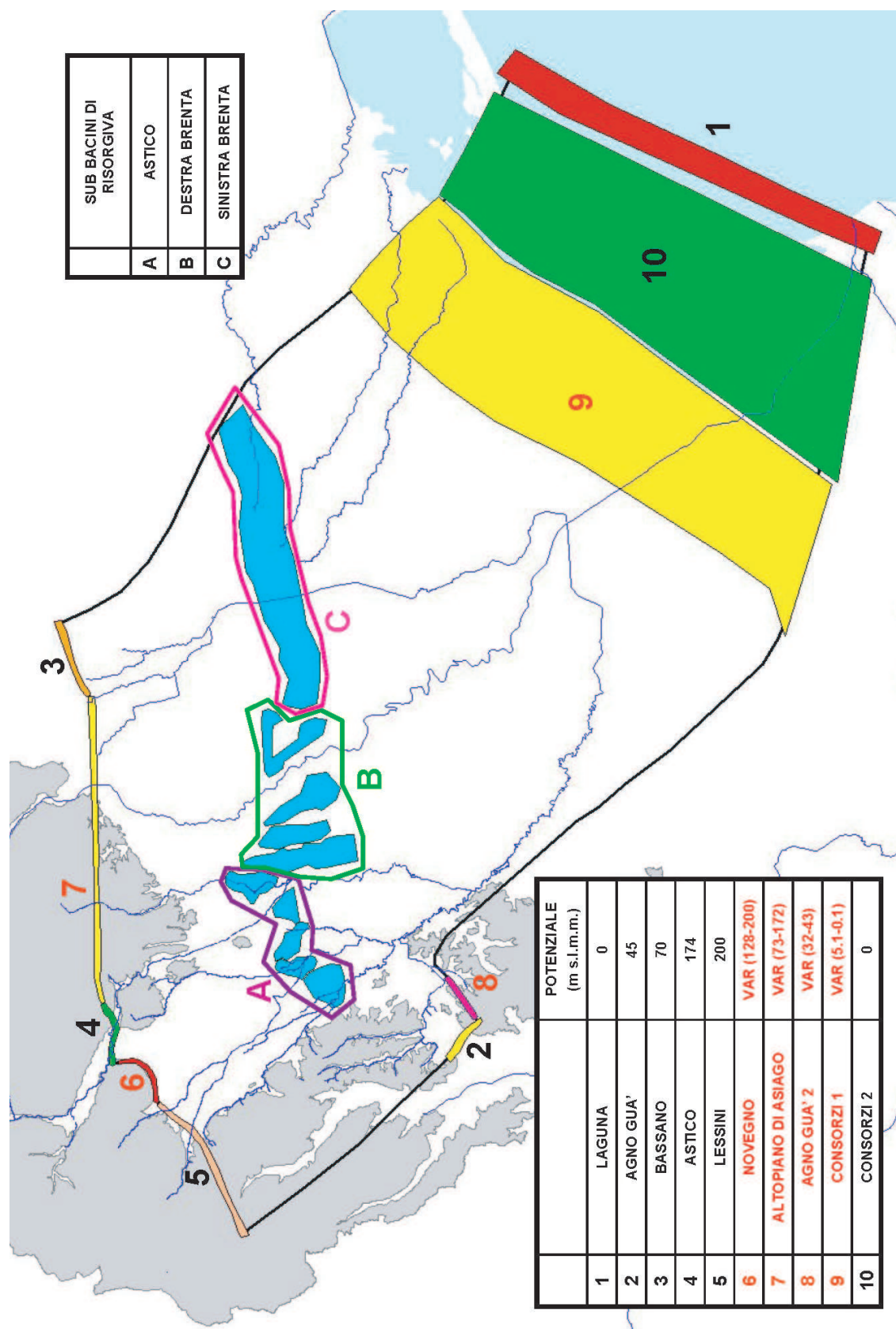


Figura 4.6: Confini di Dirichlet e sub bacini di risorgiva.

Nella tabella 4.2 si riportano i coefficienti di permeabilità assegnate alle 34 zone geologiche dell'acquifero freatico e della 1° lente a bassa permeabilità. Come anticipato, mentre i valori relativi all'acquifero variano da zona in zona, nel caso della lente la permeabilità è costante e pari a $10^{-8} m/s$ (valore tipico delle argille). Si noti che, al fine di simulare la maggior resistenza che incontra il flusso idrico nella direzione verticale rispetto a quella orizzontale, i coefficienti di permeabilità verticale sono stati assunti 1 ordine di grandezza inferiori rispetto a quelli orizzontali. Il coefficiente di immagazzinamento specifico e la porosità sono costanti all'interno di ogni acquifero (porosità $n = 0,2$; coefficiente di immagazzinamento specifico $S_S = 3 \cdot 10^{-6} 1/m$) e all'interno di ogni acquitardo (porosità $n = 0,45$; coefficiente di immagazzinamento specifico $S_S = 3 \cdot 10^{-5} 1/m$). Si sottolinea che quando si parla di 1° lente ci si riferisce alla 1° lente che si incontra muovendosi a partire dal piano campagna verso il substrato roccioso, cioè la lente che separa l'acquifero freatico dal 1° acquifero confinato.

La taratura ottenuta può considerarsi soddisfacente: gli scostamenti tra la superficie piezometrica reale e simulata sono molto contenuti nell'area di interesse ($0 \div 5$ m) e in alcune zone limitate superano i 5 metri ($5 \div 10$ m). Le quote assolute sono espresse in m s.l.m.m. (figure 4.7, 4.8 e 4.9)

Fissato il set dei parametri idrogeologici, per validare ulteriormente la taratura del modello, è stata condotta una simulazione imponendo, al posto della portata uscente dalle risorgive, la quota di sfioro delle stesse. La superficie piezometrica simulata con questa nuova condizione non si discosta molto da quella ottenuta imponendo la portata uscente dalle risorgive. Inoltre, le portate in uscita dalle risorgive calcolate dal modello sono del tutto confrontabili con quelle reali. Gli andamenti piezometrici simulati dal modello negli acquiferi in pressione sono confrontabili con i livelli freatici e in accordo con i pochi dati a disposizione di livelli statici in pozzi di acquedotto che intercettano gli acquiferi confinati.

Si riporta, infine, la tabella relativa alle portate calcolate dal codice SAT3D, attraverso le 10 frontiere di Dirichlet: particolarmente significativi risultano l'apporto sotterraneo dall'Altopiano di Asiago ($25,58 m^3/s$) e i deflussi attraverso la frontiera meridionale della laguna ($-8 m^3/s$). Si può notare che le portate

Kx	Ky	Kz	Ss	n	zona	formazione
8.51E-04	8.51E-04	8.51E-05	3.00E-06	0.2	1	acquifero freatico
1.12E-03	1.12E-03	1.12E-04	3.00E-06	0.2	2	acquifero freatico
1.60E-02	1.60E-02	1.60E-03	3.00E-06	0.2	3	acquifero freatico
1.05E-04	1.05E-04	1.05E-05	3.00E-06	0.2	4	acquifero freatico
2.00E-02	2.00E-02	2.00E-03	3.00E-06	0.2	5	acquifero freatico
4.95E-03	4.95E-03	4.95E-04	3.00E-06	0.2	6	acquifero freatico
5.28E-04	5.28E-04	5.28E-05	3.00E-06	0.2	7	acquifero freatico
1.55E-04	1.55E-04	1.55E-05	3.00E-06	0.2	8	acquifero freatico
3.20E-03	3.20E-03	3.20E-04	3.00E-06	0.2	9	acquifero freatico
2.41E-02	2.41E-02	2.41E-03	3.00E-06	0.2	10	acquifero freatico
4.28E-04	4.28E-04	4.28E-05	3.00E-06	0.2	11	acquifero freatico
8.92E-02	8.92E-02	8.92E-03	3.00E-06	0.2	12	acquifero freatico
9.45E-04	9.45E-04	9.45E-05	3.00E-06	0.2	13	acquifero freatico
1.09E-02	1.09E-02	1.09E-03	3.00E-06	0.2	14	acquifero freatico
1.73E-01	1.73E-01	1.73E-02	3.00E-06	0.2	15	acquifero freatico
1.05E-04	1.05E-04	1.05E-05	3.00E-06	0.2	16	acquifero freatico
4.05E-04	4.05E-04	4.05E-05	3.00E-06	0.2	17	acquifero freatico
9.14E-03	9.14E-03	9.14E-04	3.00E-06	0.2	18	acquifero freatico
2.00E-02	2.00E-02	2.00E-03	3.00E-06	0.2	19	acquifero freatico
1.89E-02	1.89E-02	1.89E-03	3.00E-06	0.2	20	acquifero freatico
2.50E-02	2.50E-02	2.50E-03	3.00E-06	0.2	21	acquifero freatico
5.68E-02	5.68E-02	5.68E-03	3.00E-06	0.2	22	acquifero freatico
5.66E-02	5.66E-02	5.66E-03	3.00E-06	0.2	23	acquifero freatico
3.78E-04	3.78E-04	3.78E-05	3.00E-06	0.2	24	acquifero freatico
2.60E-03	2.60E-03	2.60E-04	3.00E-06	0.2	25	acquifero freatico
1.14E-04	1.14E-04	1.14E-05	3.00E-06	0.2	26	acquifero freatico
1.14E-02	1.14E-02	1.14E-03	3.00E-06	0.2	27	acquifero freatico
5.54E-03	5.54E-03	5.54E-04	3.00E-06	0.2	28	acquifero freatico
4.51E-02	4.51E-02	4.51E-03	3.00E-06	0.2	29	acquifero freatico
4.00E-03	4.00E-03	4.00E-04	3.00E-06	0.2	30	acquifero freatico
8.32E-04	8.32E-04	8.32E-05	3.00E-06	0.2	31	acquifero freatico
2.31E-02	2.31E-02	2.31E-03	3.00E-06	0.2	32	acquifero freatico
6.00E-03	6.00E-03	6.00E-04	3.00E-06	0.2	33	acquifero freatico
2.50E-02	2.50E-02	2.50E-03	3.00E-06	0.2	34	acquifero freatico

Kx	Ky	Kz	Ss	n	zona	formazione
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	1	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	2	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	3	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	4	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	5	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	6	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	7	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	8	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	9	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	10	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	11	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	12	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	13	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	14	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	15	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	16	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	17	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	18	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	19	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	20	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	21	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	22	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	23	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	24	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	25	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	26	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	27	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	28	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	29	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	30	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	31	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	32	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	33	1° lente
1.00E-08	1.00E-08	1.00E-09	3.00E-05	0.45	34	1° lente

Tabella 4.2: Coefficiente di permeabilità [m/s] delle 34 zone geologiche dell'acquifero freatico e della 1° lente a bassa permeabilità.

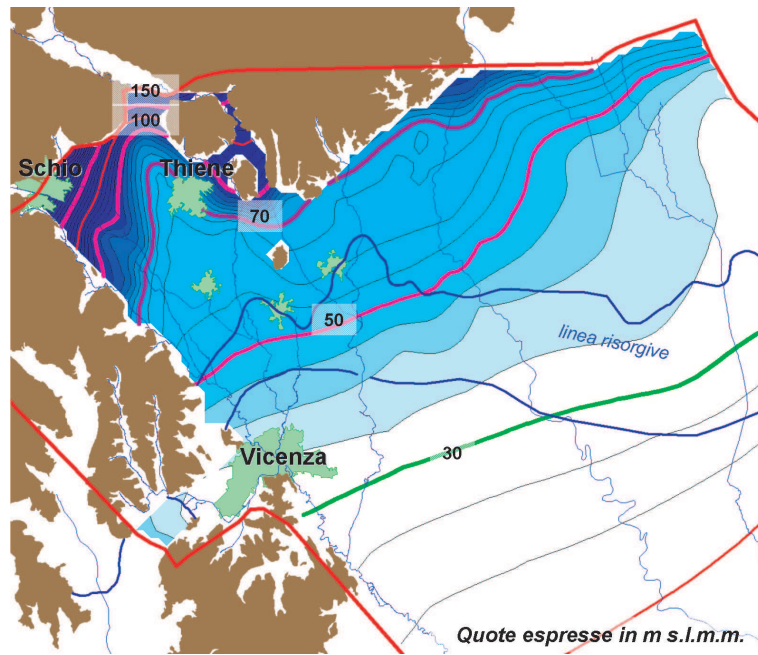


Figura 4.7: *Superficie freatica reale (media annua 2004).*

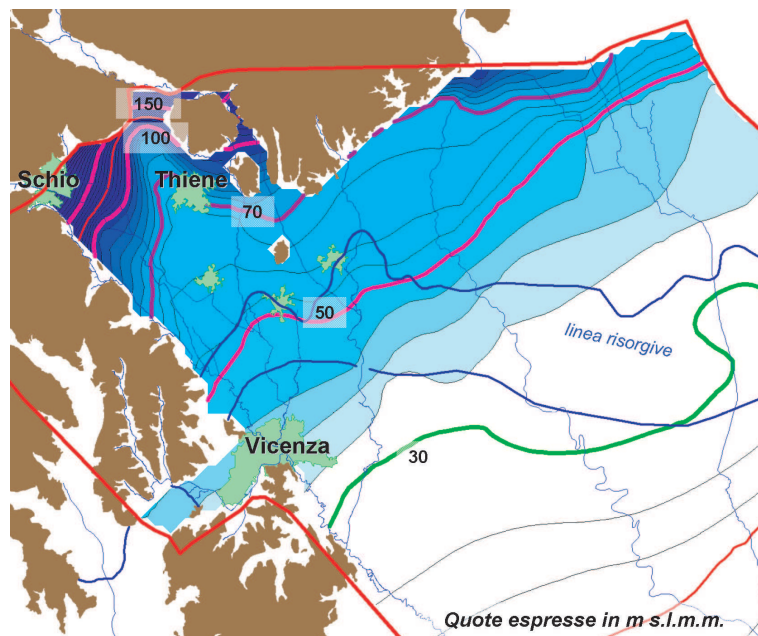


Figura 4.8: *Superficie freatica simulata (media annua 2004).*

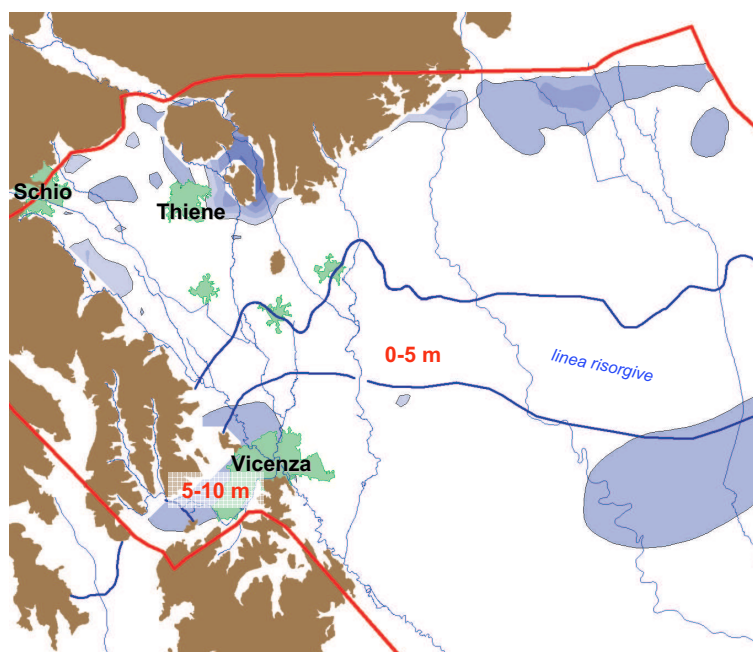


Figura 4.9: *Differenza tra superficie freatica reale e simulata (errori).*

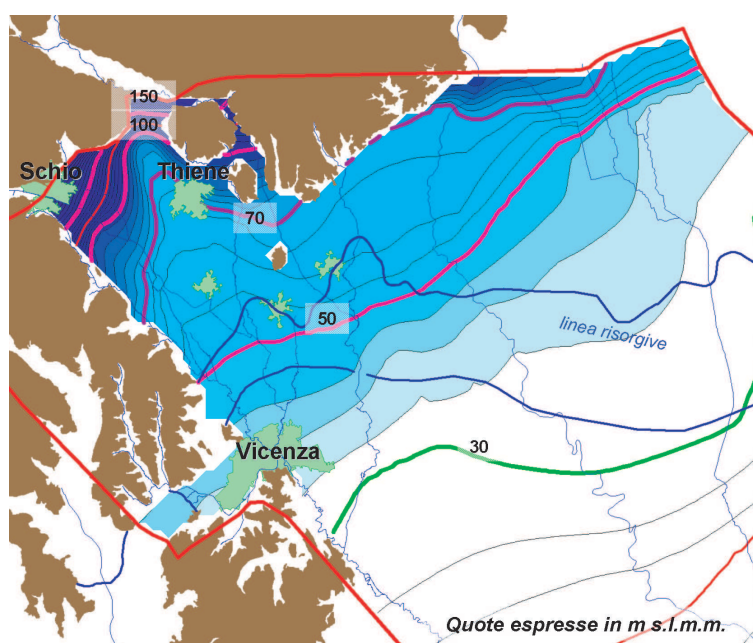


Figura 4.10: *Superficie freatica simulata ottenuta imponendo la quota di sfioro delle risorgive.*

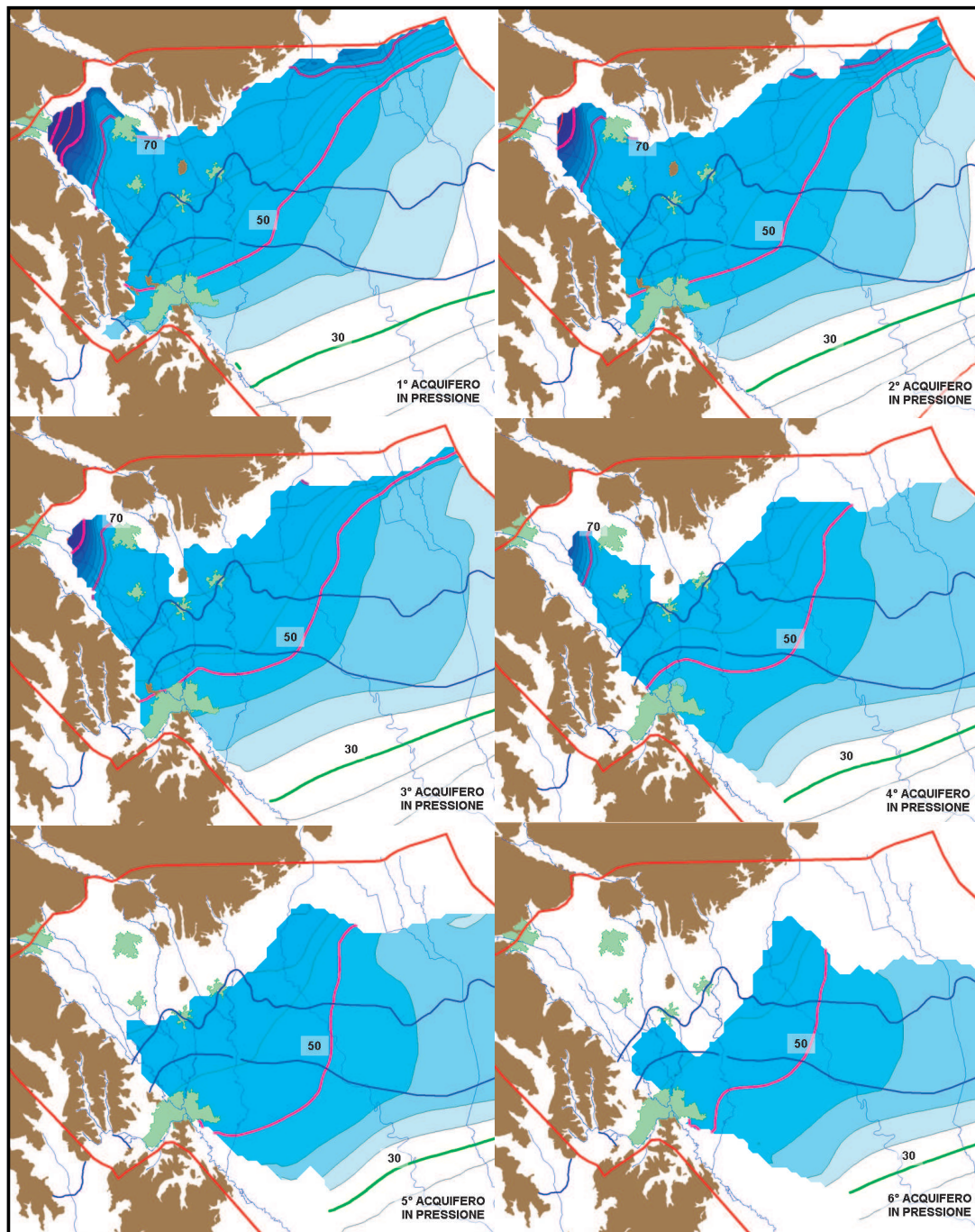


Figura 4.11: *Superfici piezometriche simulate del 1°, 2°, 3°, 4°, 5° e 6° acquifero confinato.*

ottenute dando in input al modello la portata uscente dal sistema delle risorgive (caso A) non subiscono variazioni significative qualora si assegna in input al modello la quota di sfioro delle risorgive (caso B). In quest'ultimo caso le portate sfioranti dai 3 sub bacini in cui sono stati raggruppati i fontanili vengono calcolate dal codice e risultano simili ai valori stimati.

		CASO A	CASO B
CONFINE DI DIRICHLET		PORTATA (m ³ /s)	PORTATA (m ³ /s)
1	LAGUNA	-8.82	-8.12
2	AGNO GUA'	0.27	0.28
3	BASSANO	0.08	0.09
4	ASTICO	1.56	1.57
5	LESSINI	2.47	2.53
6	NOVEGNO	1.02	1.07
7	ALTOPIANO	25.58	25.58
8	AGNO GUA' 2	-0.90	-0.85
9	CONSORZI 1	-2.27	-2.24
10	CONSORZI 2	-0.76	-0.74

SUB BACINO DI RISORGIVA		PORTATA (m ³ /s)	PORTATA (m ³ /s)
1	ASTICO	-12.53	-10.65
2	DESTRA BRENTA	-2.80	-8.71
3	SINISTRA BRENTA	-18.31	-16.19
TOTALE		-33.64	-35.55

Tabella 4.3: *Portate attraverso i confini di Dirichlet: caso A (assegnata la portata sfiorante dalle risorgive) e caso B (assegnata quota di sfioro delle risorgive).*



Figura 4.12: *Piezometria simulata (media annua 2004)*

4.6 Scenari di ricarica e utilizzazione

Una volta conclusa la fase di taratura del modello, si sono simulati i seguenti scenari di ricarica e utilizzazione:

1. scenario 1 - diminuzione del 20% delle precipitazioni efficaci ($-2,7 m^3/s$): l'abbassamento medio nell'acquifero freatico è di 3 metri nella porzione orientale dell'area di studio e raggiunge i 3,5 – 4 metri nella porzione più occidentale a ridosso delle propaggini dei Monti Lessini; si registrano abbassamenti anche negli acquiferi in pressione. Lo scenario è stato simulato al fine di stimare i livelli piezometrici registrati nel 2003, nel corso del quale si è registrata una diminuzione dell'apporto meteorico efficace alla ricarica del 20% rispetto all'apporto registrato nel 2004 (implementato nella fase di taratura). Dall'analisi del grafico relativo all'andamento del pozzo 27 di Caldogno si nota che la differenza tra i livelli freatici del 2004 e quelli del 2003 è di circa 3,5 m, come correttamente simulato dal modello matematico.
2. scenario 2 - chiusura dei pozzi privati (per una portata di $0,5 m^3/s$): l'innalzamento stimato è compreso tra 0,8 e 1 metri nell'acquifero freatico, raggiunge i 1,2 – 1,6 metri rispettivamente nel 1° e nel 3° acquifero confinato. La chiusura dei pozzi privati è stata ottenuta diminuendo in ugual misura la portata estratta da tutti i pozzi privati considerati per un totale di $0,5 m^3/s$ prelevati in meno rispetto al prelievo implementato in fase di taratura. E' evidente che gli innalzamenti maggiori si registrano dove è maggiore la concentrazione dei pozzi privati.
3. scenario 3 - realizzazione di interventi di ricarica in 4 siti di cava esistenti nell'alto Vicentino (cava Bai - Zanè, cava Vianelle - Thiene, cava Casoni - Sarcedo, cava Quartieri - Sarcedo) per una portata media annua di 1,2; m^3/s : gli innalzamenti nell'acquifero freatico sono di 2 – 3 metri, con punte di 4 metri in corrispondenza dei punti di immissione. Analoghi innalzamenti si registrano negli acquiferi in pressione sottostanti.

4. scenario 4 - realizzazione di interventi di ricarica attraverso l'utilizzo di acque spagliate in aree boscate (A.F.I., Aree Forestali di Infiltrazione) per una portata media annua di $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$: si ottengono innalzamenti di $0,6 - 0,8$ metri su tutto l'acquifero freatico, con valori più elevati in corrispondenza dei punti di immissione. Si registrano analoghi innalzamenti anche negli acquiferi in pressione.
5. scenario 5 - realizzazione di nuovi prelievi, quantificati complessivamente in 1200 l/s (portata media annua), previsti in parte dalla falda di sub alveo dell'Astico in località Breganze - Fara Vicentino (350 l/s), in parte dalla falda in sinistra Astico in località Montecchio Precalcino - Passo di Riva (450 l/s) e in parte dalla falda freatica del Brenta in località Ancignano - Schiavon (400 l/s), come indicato nel Piano d'Ambito dell'A.A.T.O. Bacchiglione. Al fine di simulare i nuovi attingimenti, si sono ipotizzate le seguenti caratteristiche costruttive:
 - (a) prelievi dalla falda di sub alveo dell'Astico in località Breganze - Fara Vicentino (350 l/s): 4 pozzi con profondità di attingimento a $45 - 50$ metri dal piano campagna (acquifero intercettato: acquifero freatico);
 - (b) prelievi dalla falda in sinistra Astico in località Montecchio Precalcino - Passo di Riva (450 l/s): 4 pozzi con profondità di attingimento a 100 metri dal piano campagna (acquifero intercettato: 3° acquifero confinato);
 - (c) prelievi dalla falda freatica del Brenta in località Ancignano - Schiavon (400 l/s): 3 pozzi con profondità di attingimento a $30 - 35$ metri dal piano campagna (acquifero intercettato: acquifero freatico)

Gli abbassamenti stimati, presenti in tutti gli acquiferi, sono di circa $1,5 - 2$ metri, con valori più elevati in corrispondenza delle aree di attingimento.

6. scenario 6 - diminuzione del 20% delle precipitazioni efficaci e realizzazione di nuovi prelievi, quantificati complessivamente in (portata media

annua) $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ (scenario 1 e scenario 5): gli abbassamenti evidenziati nello scenario 1 e nello scenario 5 si sommano. In queste condizioni, gli abbassamenti massimi sfiorano i 6 metri e interessano anche gli acquiferi in pressione (4,5 – 5 metri).

7. scenario 7 - realizzazione degli interventi di ricarica attraverso l'utilizzo simultaneo di siti estrattivi e di aree boscate, accompagnati dalla chiusura dei pozzi privati ($+2,3 \text{ m}^3/\text{s}$): gli innalzamenti nell'acquifero freatico sono di circa 3 – 4 metri, arrivano a 5 metri in corrispondenza delle ricariche puntuali (utilizzo di aree boscate e cave).
8. scenario 8 - compensazione dei nuovi prelievi ($-1,2 \text{ m}^3/\text{s}$) attraverso la realizzazione dei soli interventi di ricarica puntuali (utilizzo di siti estrattivi e di aree boscate, $+1,8 \text{ m}^3/\text{s}$): gli abbassamenti causati dai nuovi prelievi vengono più che compensati dagli interventi di ricarica puntuale; si registrano innalzamenti medi, rispetto alla media annua 2004, di 1 – 1,5 metri.
9. scenario 9 - compensazione dei nuovi prelievi ($-1,2 \text{ m}^3/\text{s}$) attraverso la realizzazione di tutti gli interventi di ricarica (utilizzo di siti estrattivi, di aree boscate e chiusura dei pozzi privati, $+2,3 \text{ m}^3/\text{s}$): l'intervento aggiuntivo di chiusura dei pozzi privati comporta ulteriori innalzamenti dei livelli freatici (2 – 2,5 metri) rispetto allo scenario precedente; i nuovi prelievi vengono così abbondantemente compensati anche nei livelli produttivi sottostanti.
10. scenario 10 - compensazione della diminuzione dell'apporto meteorico efficace ($-2,7 \text{ m}^3/\text{s}$) attraverso la realizzazione di tutti gli interventi di ricarica (utilizzo di siti estrattivi, di aree boscate e chiusura dei pozzi privati, $+2,3 \text{ m}^3/\text{s}$): il minor apporto meteorico viene solo in parte compensato dagli interventi di ricarica; nella maggior parte dell'area di interesse si registrano abbassamenti dell'ordine di 0,5 metri. In caso di minori precipitazioni, gli interventi di ricarica compenseranno, solo in parte, gli abbassamenti piezometrici. Si evidenzia, tuttavia, che l'abbassamento piezometrico negli

acquiferi confinati, dovuto alle minori precipitazioni, è minore nel caso si realizzi, in aggiunta agli interventi di ricarica puntuale, anche la chiusura dei pozzi privati. La chiusura dei pozzi privati avrebbe quindi effetti benefici sui livelli piezometrici degli acquiferi confinati, cioè sui livelli produttivi più sfruttati ad uso acquedottistico, garantendo minori costi di gestione degli impianti.

11. scenario 11 - compensazione della diminuzione dell'apporto meteorico efficace e dei nuovi prelievi ($-2,7 m^3/s + -1,2 m^3/s = -3,9 m^3/s$) attraverso la realizzazione di tutti gli interventi di ricarica (utilizzo di siti estrattivi, di aree boscate e chiusura dei pozzi privati, $+2,3 m^3/s$): gli interventi di ricarica, non riuscendo a riequilibrare gli abbassamenti causati dalla minore ricarica derivante dalle precipitazioni (scenario 10), sono insufficienti ad azzerare gli abbassamenti totali causati dalla presenza dei nuovi prelievi e dalle minori precipitazioni.

Dall'analisi dei risultati ottenuti con gli scenari 9, 10 e 11, emerge che gli interventi di ricarica, necessari per arrestare il trend negativo delle falde (l'abbassamento medio annuo registrato al pozzo 27 di Caldogno è di circa $3,8 cm/anno$, corrispondente a circa 2 milioni di $m^3/anno$, cioè a meno di $100l/s$), sono più che sufficienti per compensare gli abbassamenti causati dai soli nuovi prelievi. Tuttavia, in caso di un minor afflusso meteorico (diminuzione del 20% della precipitazione efficace), l'effetto positivo degli interventi di ricarica delle falde risulta non sufficiente a compensare gli abbassamenti complessivi (nuovi prelievi e minor precipitazione).

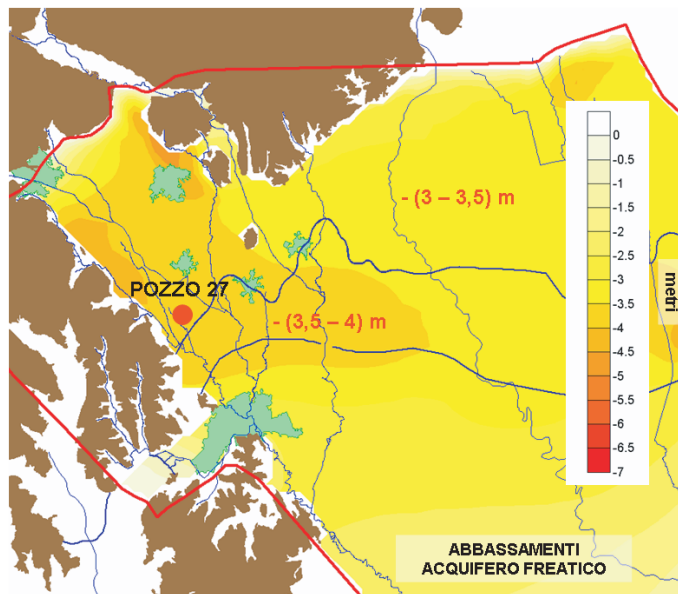


Figura 4.13: Scenario 1 - diminuzione del 20% della precipitazione efficace: abbassamenti reale e simulato al pozzo 27 di Caldagno.

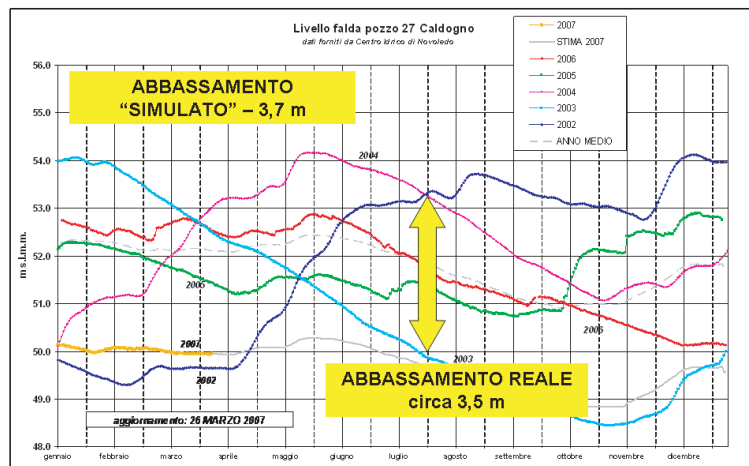


Figura 4.14: Scenario 1 - diminuzione del 20% della precipitazione efficace: abbassamento nell'acquifero freatico rispetto alle superfici medie del 2004 (miglior taratura).

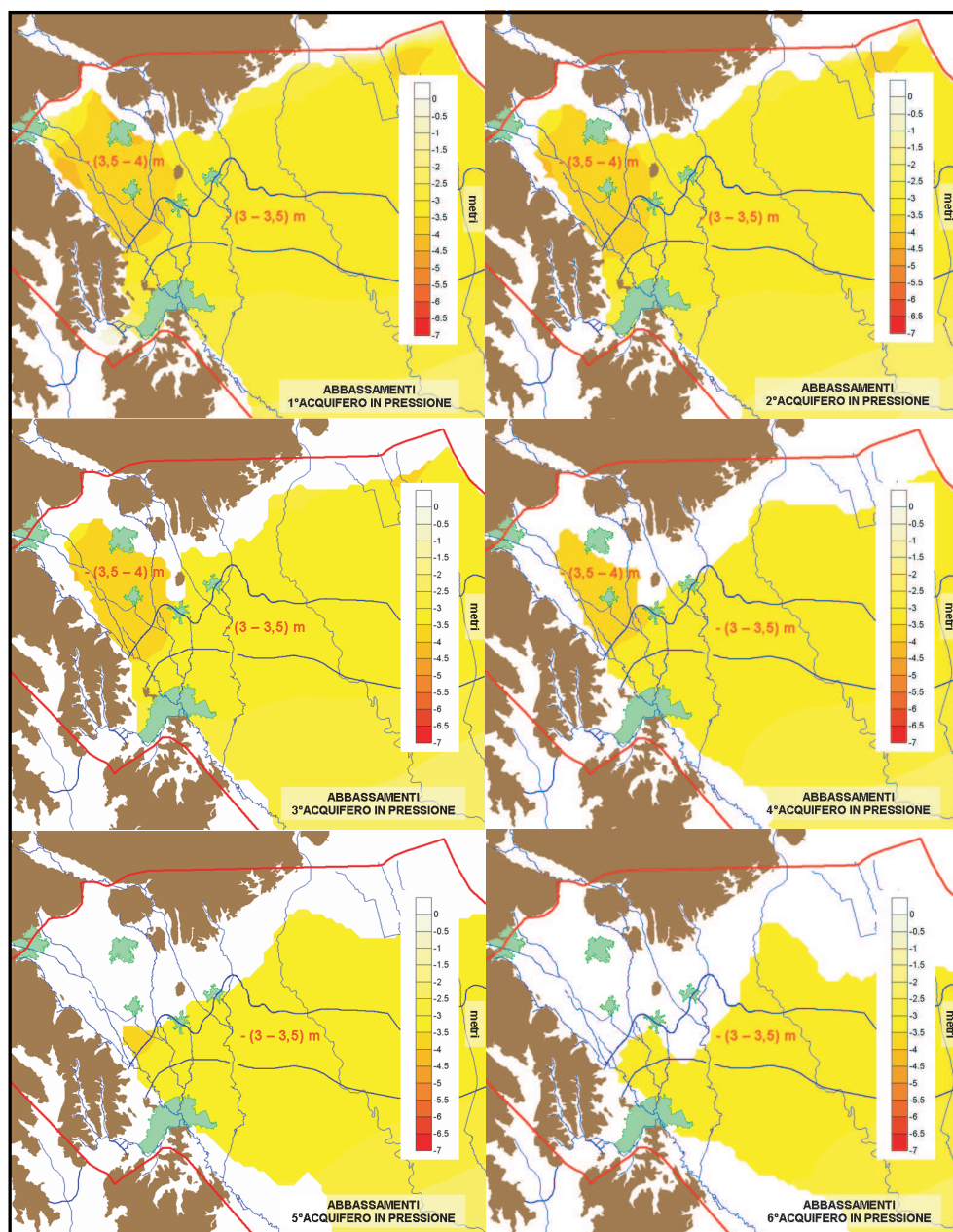


Figura 4.15: Scenario 1 - diminuzione del 20% della precipitazione efficace: abbassamenti negli acquiferi in pressione rispetto alle superfici medie del 2004 (miglior taratura).

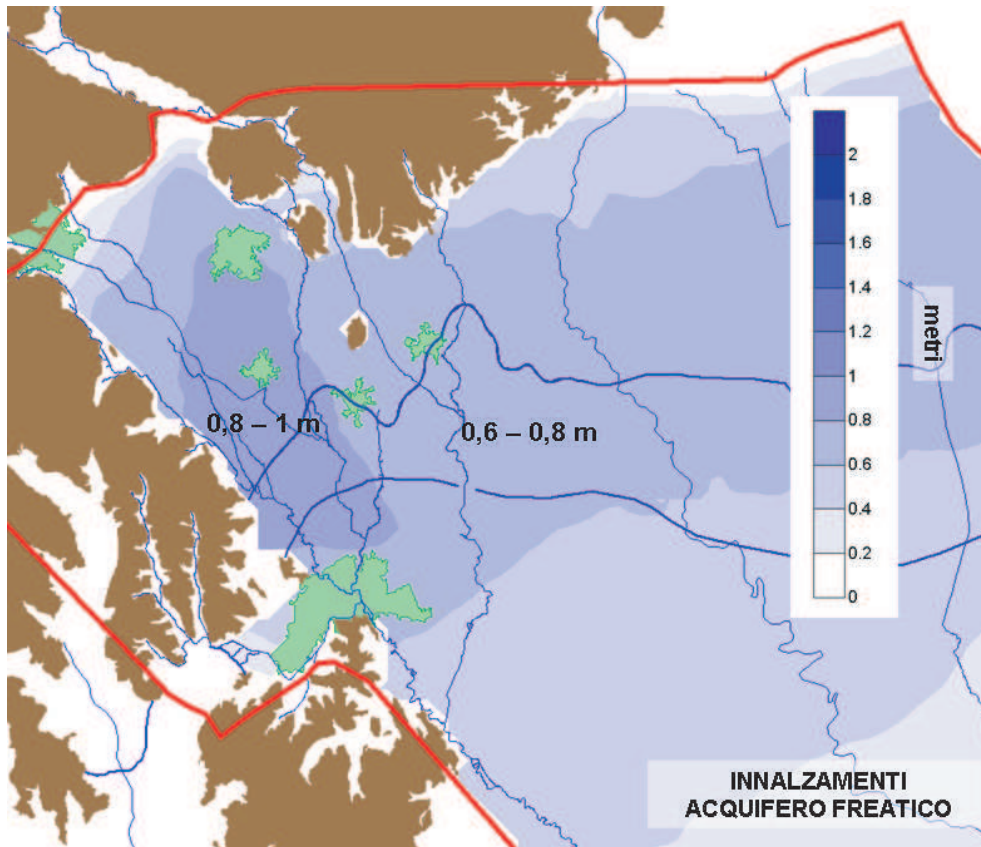


Figura 4.16: *Scenario 2 - chiusura dei pozzi privati (per una portata di $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$): innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) nell'acquifero freatico.*

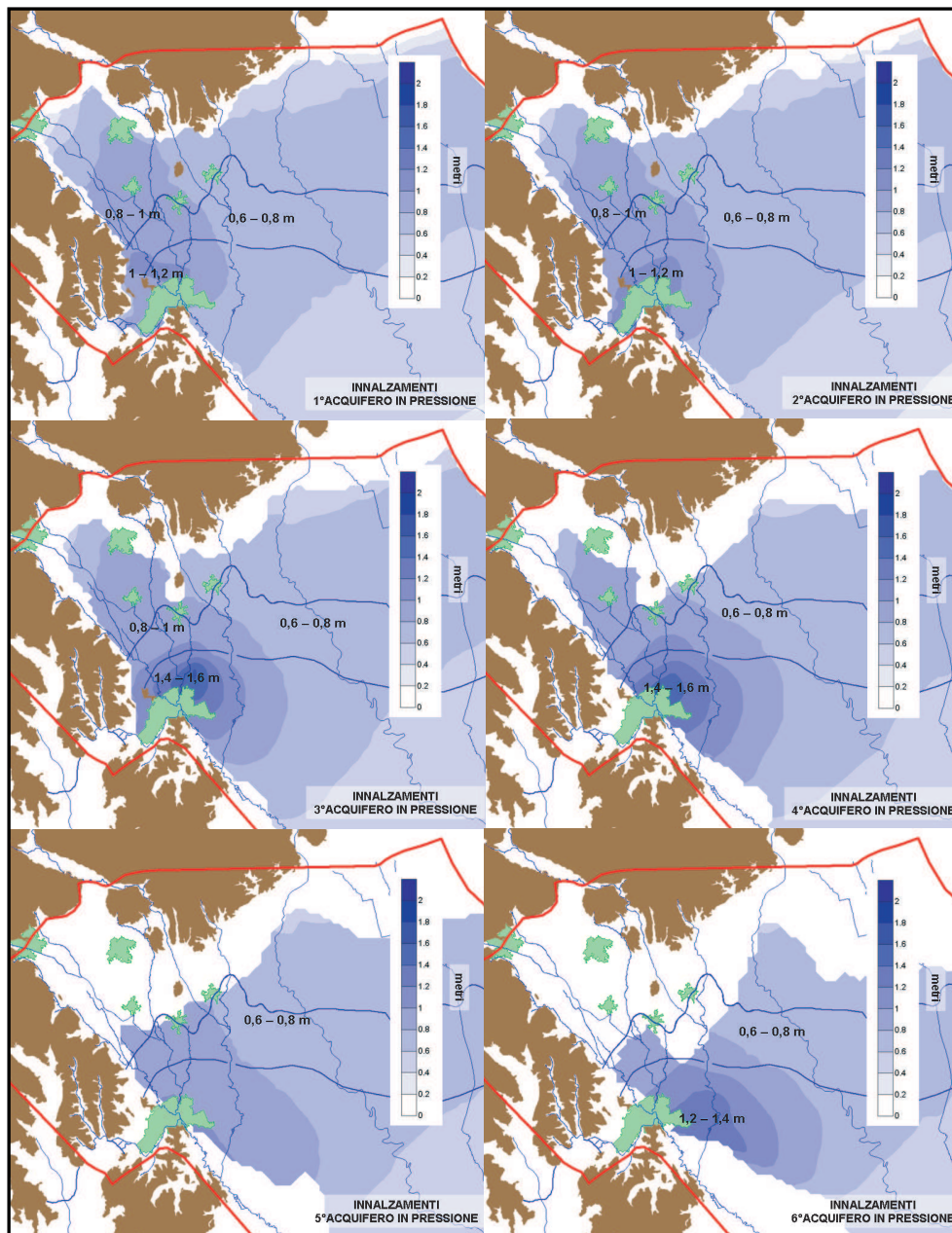


Figura 4.17: *Scenario 2 - chiusura dei pozzi privati (per una portata di $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$): innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) negli acquiferi in pressione.*

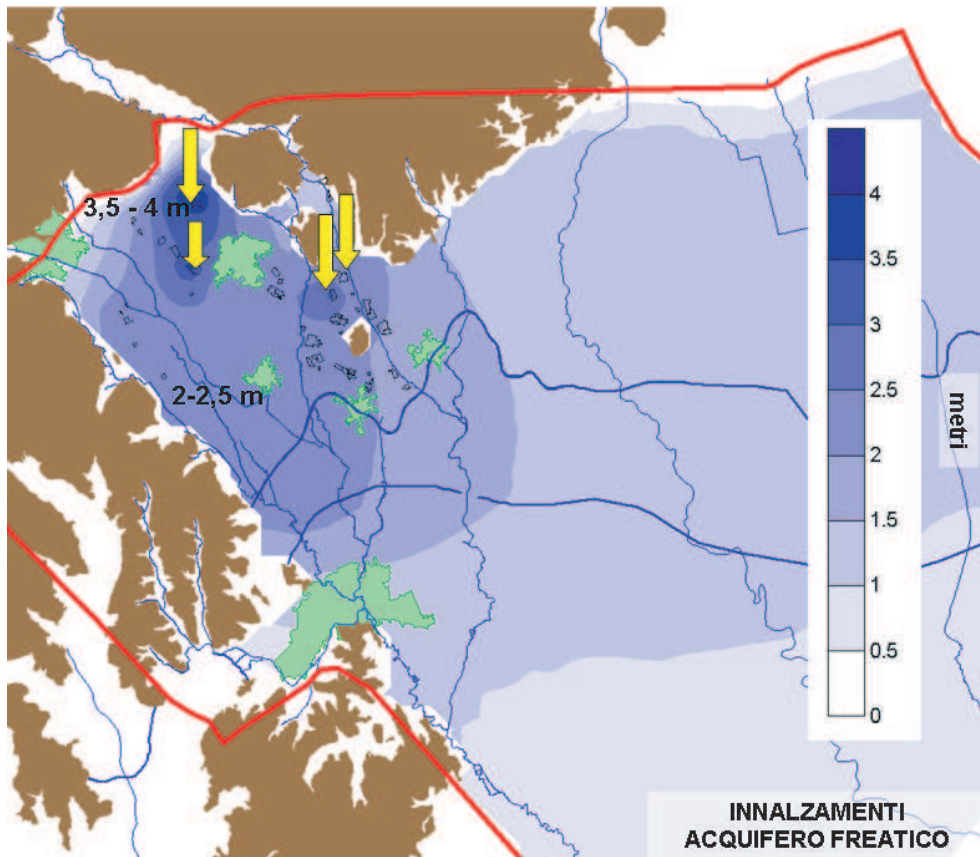


Figura 4.18: Scenario 3 - interventi di ricarica attraverso l'utilizzo di 4 siti di cava esistenti (per una portata complessiva di $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$): innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) nell'acquifero freatico.

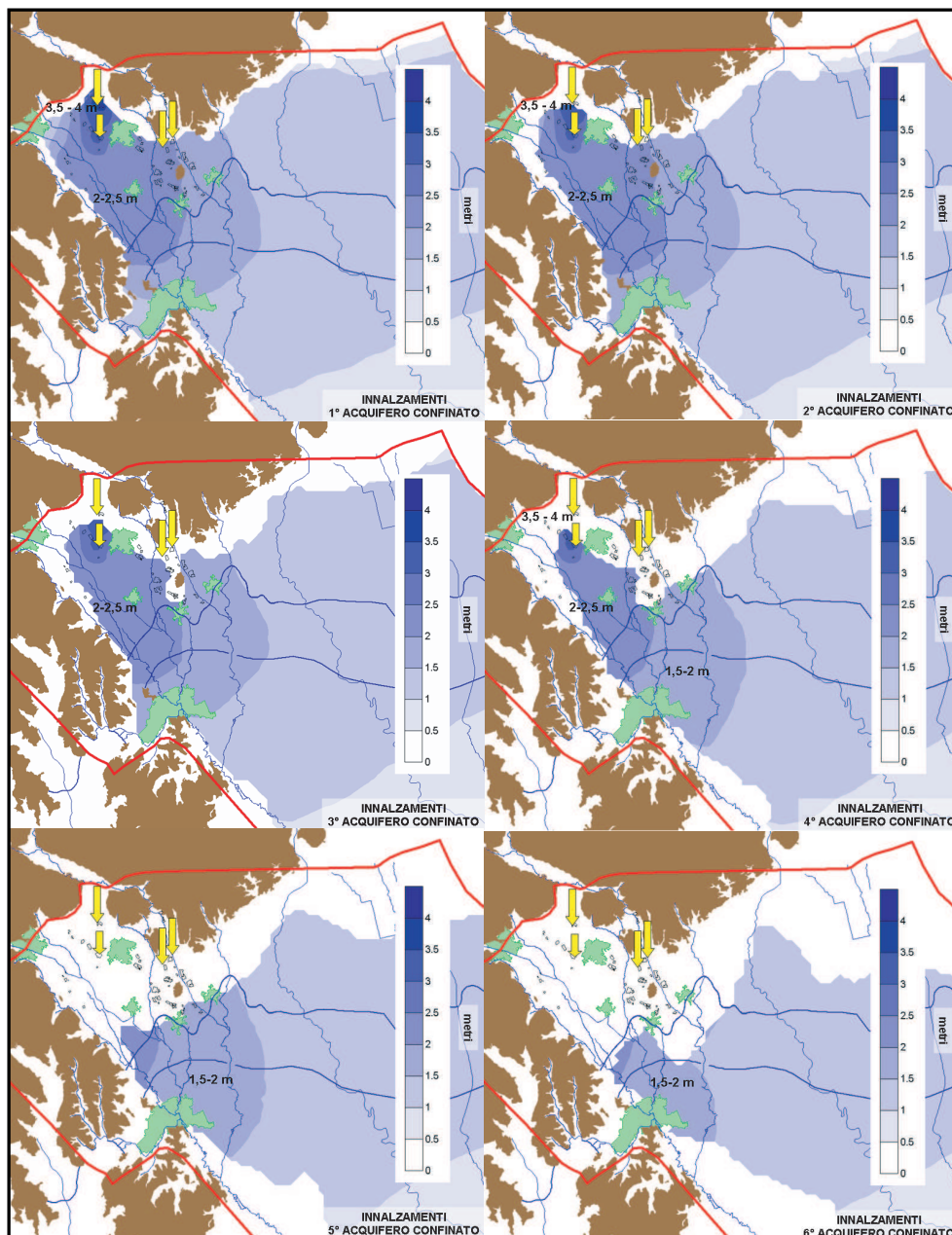


Figura 4.19: Scenario 3 - interventi di ricarica attraverso l'utilizzo di 4 siti di cava esistenti (per una portata complessiva di $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$): innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) negli acquiferi in pressione.

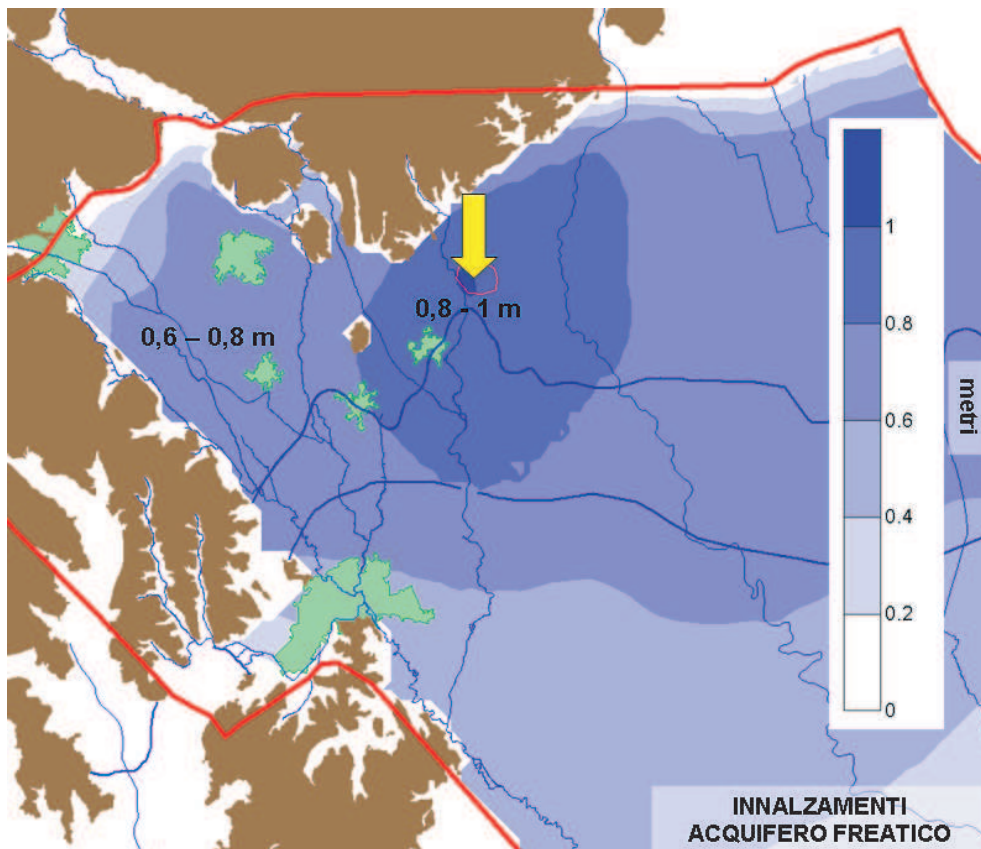


Figura 4.20: Scenario 4 - realizzazione di interventi di ricarica attraverso l'utilizzo di acque spagliate in aree boscate per una portata media annua di $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$: innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) nell'acquifero freatico.

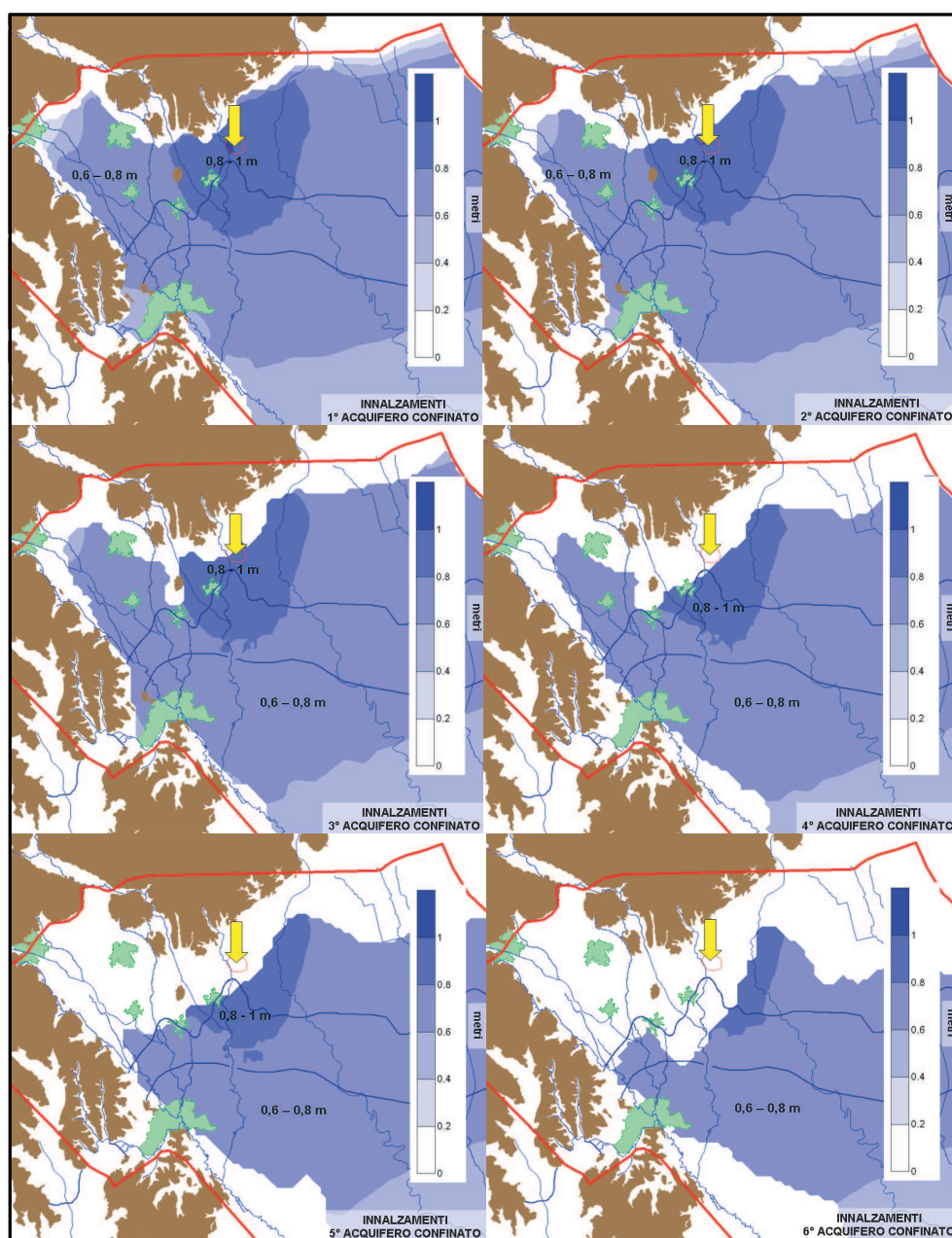


Figura 4.21: Scenario 4 - realizzazione di interventi di ricarica attraverso l'utilizzo di acque spagliate in aree boscate per una portata media annua di $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$: innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) negli acquiferi in pressione.

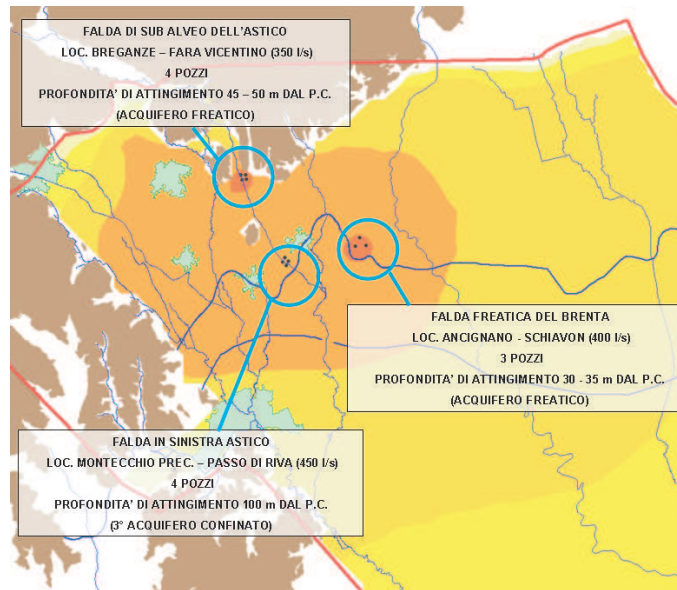


Figura 4.22: Scenario 5 - realizzazione di nuovi prelievi per una portata media annua di $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$: ubicazione dei pozzi di prelievo.

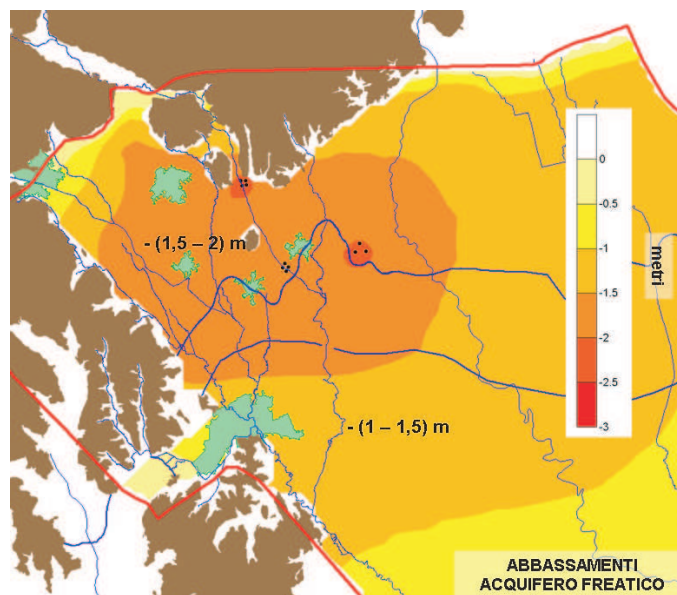


Figura 4.23: Scenario 5 - realizzazione di nuovi prelievi per una portata media annua di $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$: abbassamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) nell'acquifero freatico.

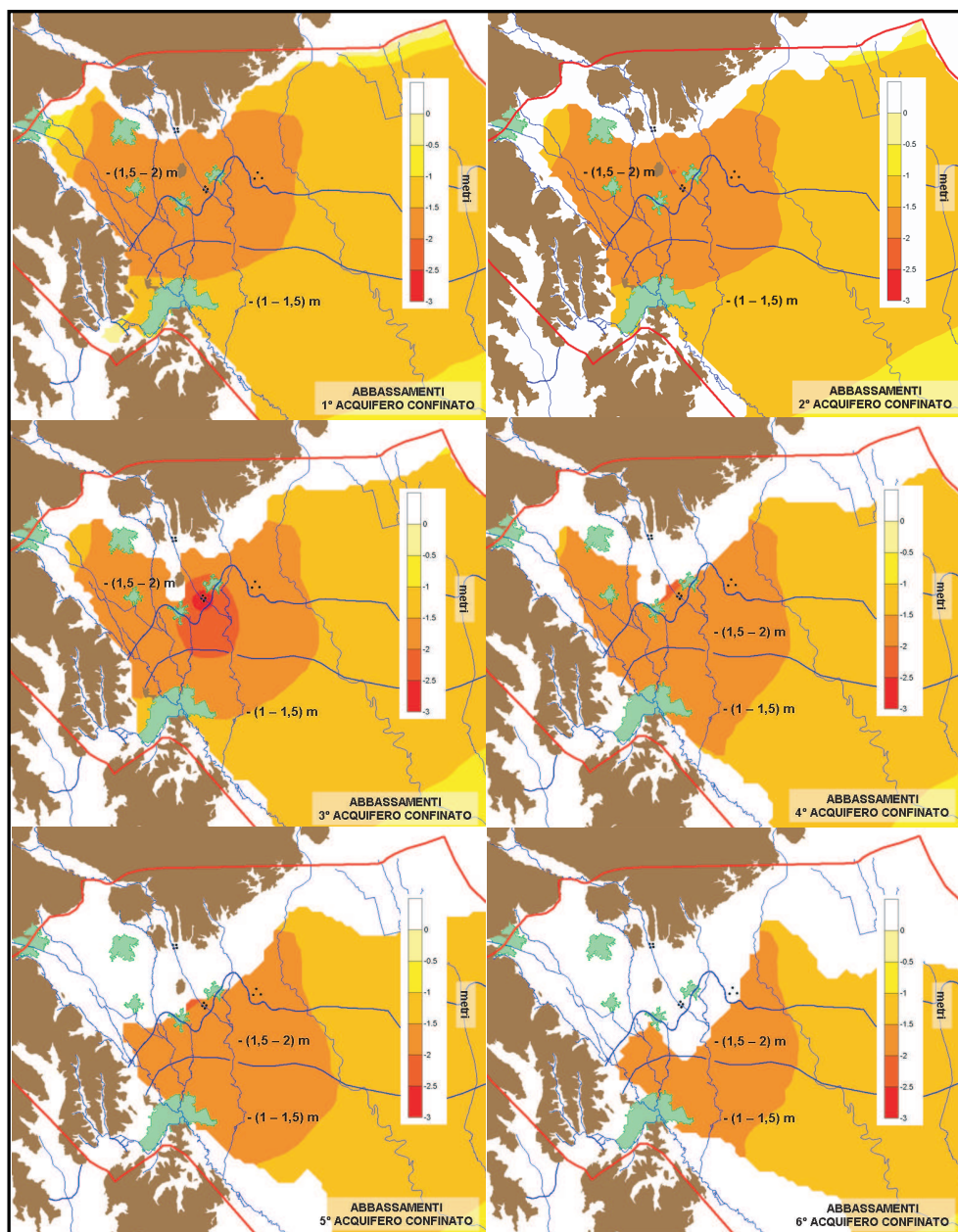


Figura 4.24: Scenario 5 - realizzazione di nuovi prelievi per una portata media annua di $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$: abbassamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) negli acquiferi in pressione.

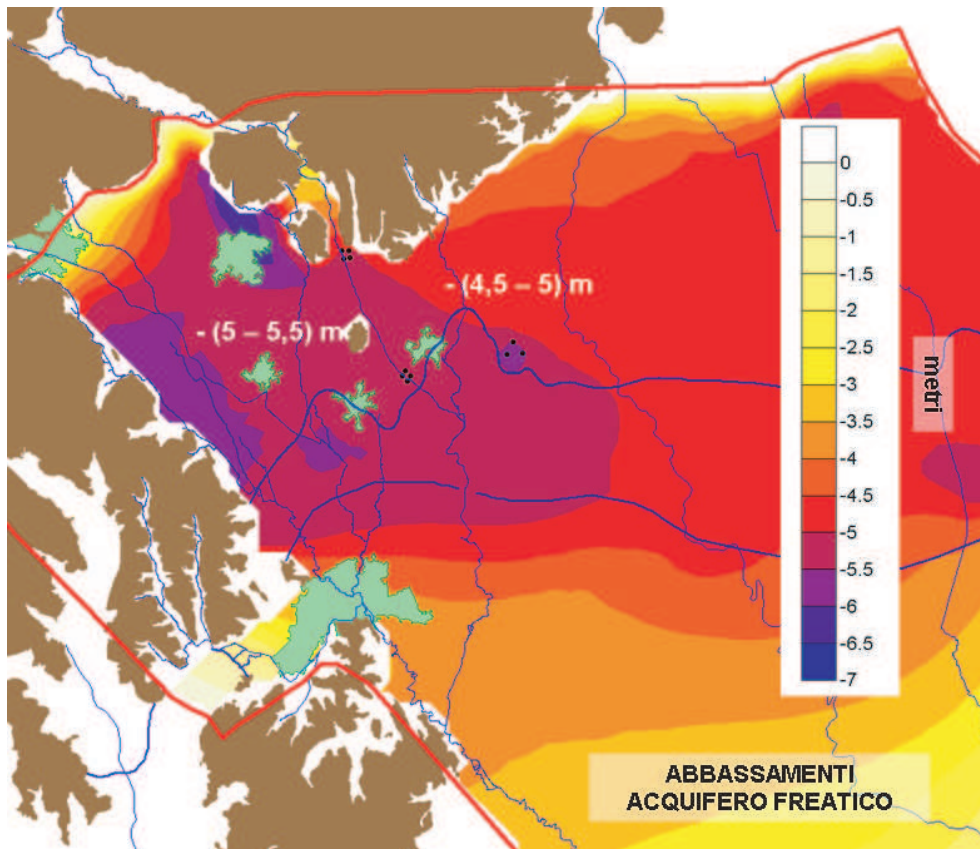


Figura 4.25: *Scenario 6 - realizzazione di nuovi prelievi per una portata media annua di $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ (scenario 5) e diminuzione del 20% delle precipitazioni efficaci (scenario 1): abbassamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) nell'acquifero freatico.*

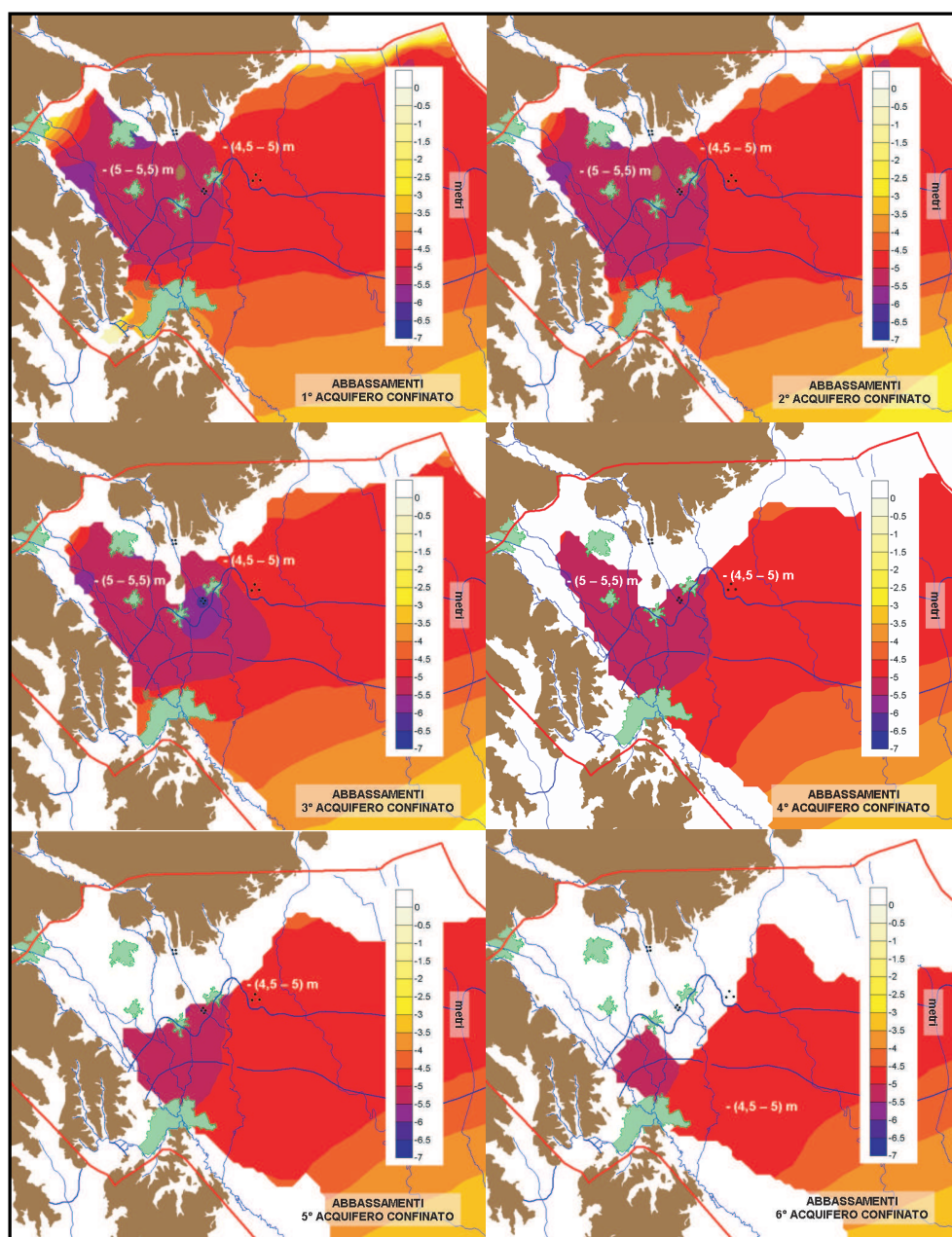


Figura 4.26: Scenario 6 - realizzazione di nuovi prelievi per una portata media annua di $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ (scenario 5) e diminuzione del 20% delle precipitazioni efficaci (scenario 1): abbassamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) negli acquiferi in pressione.

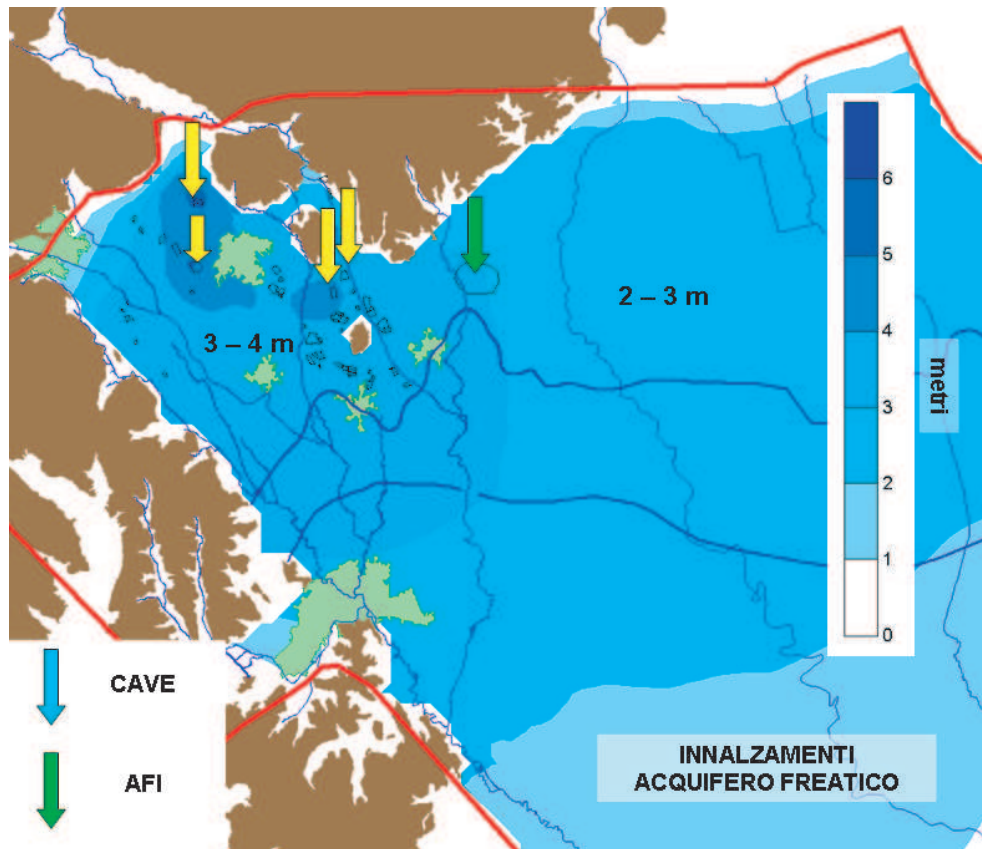


Figura 4.27: Scenario 7 - realizzazione degli interventi di ricarica attraverso l'utilizzo di siti estrattivi, di aree boscate e la chiusura dei pozzi privati ($+2,3 \text{ m}^3/\text{s}$): innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) nell'acquifero freatico.

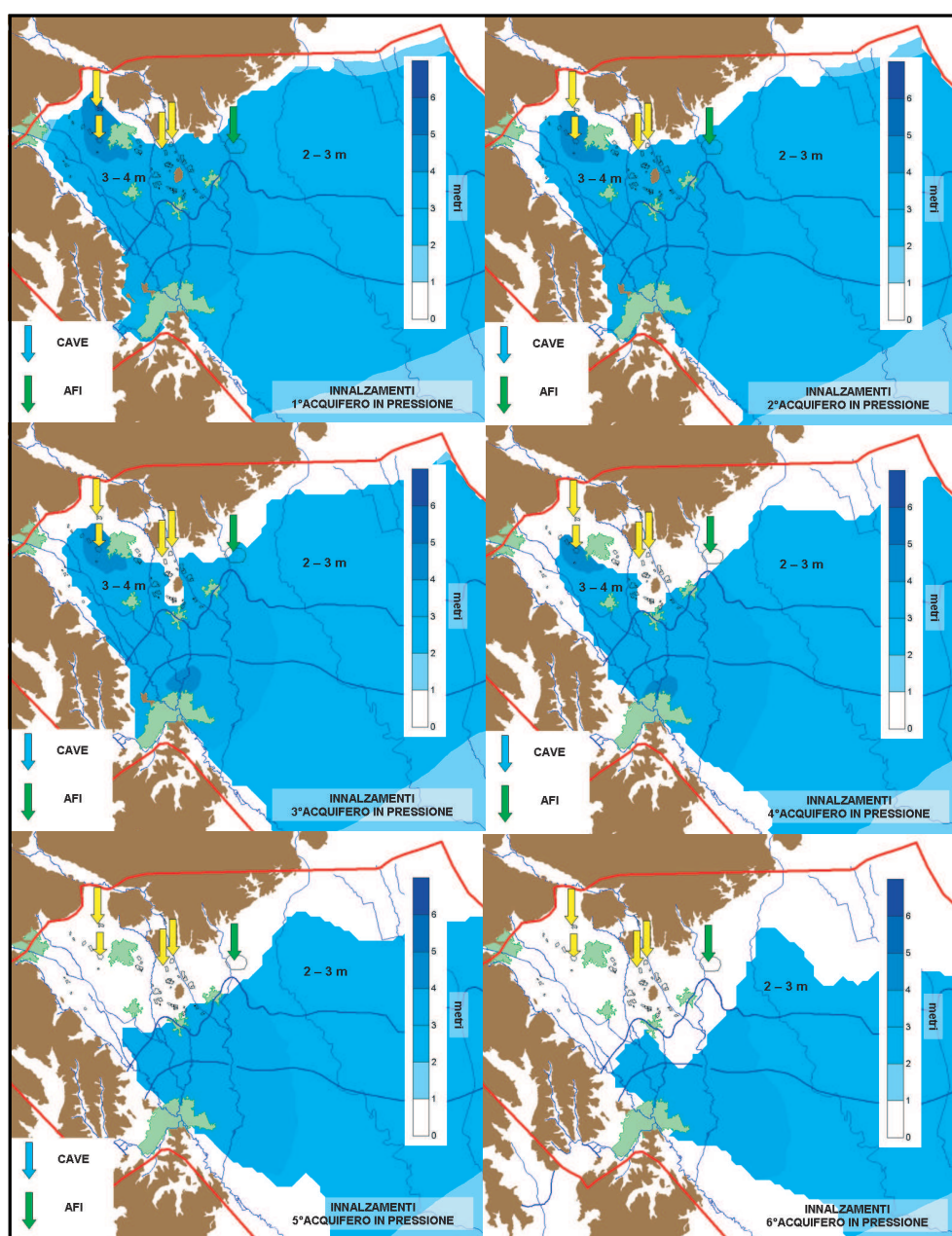


Figura 4.28: Scenario 7 - realizzazione degli interventi di ricarica attraverso l'utilizzo di siti estrattivi, di aree boscate e la chiusura dei pozzi privati (+2,3 m³/s): innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) negli acquiferi in pressione.

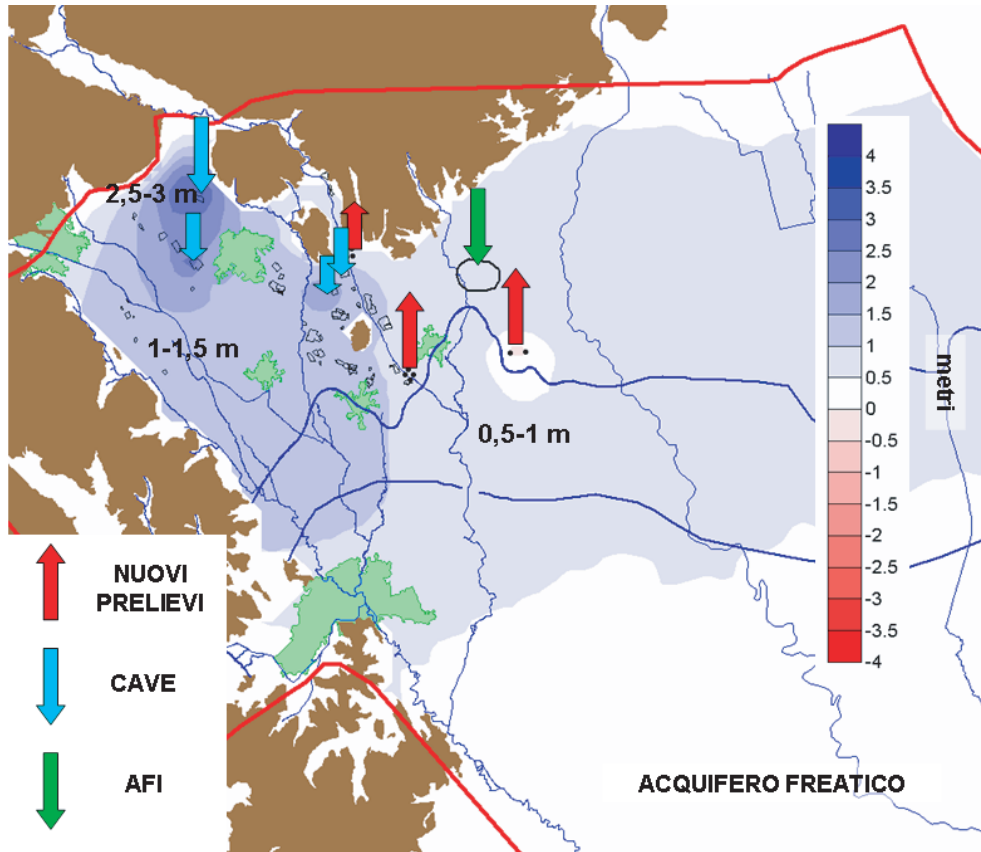


Figura 4.29: *Scenario 8 - compensazione dei nuovi prelievi ($-1,2 \text{ m}^3/\text{s}$) attraverso la realizzazione dei soli interventi di ricarica puntuali (utilizzo di siti estrattivi e di aree boscate, $+1,8 \text{ m}^3/\text{s}$): abbassamenti ed innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) nell'acquifero freatico.*

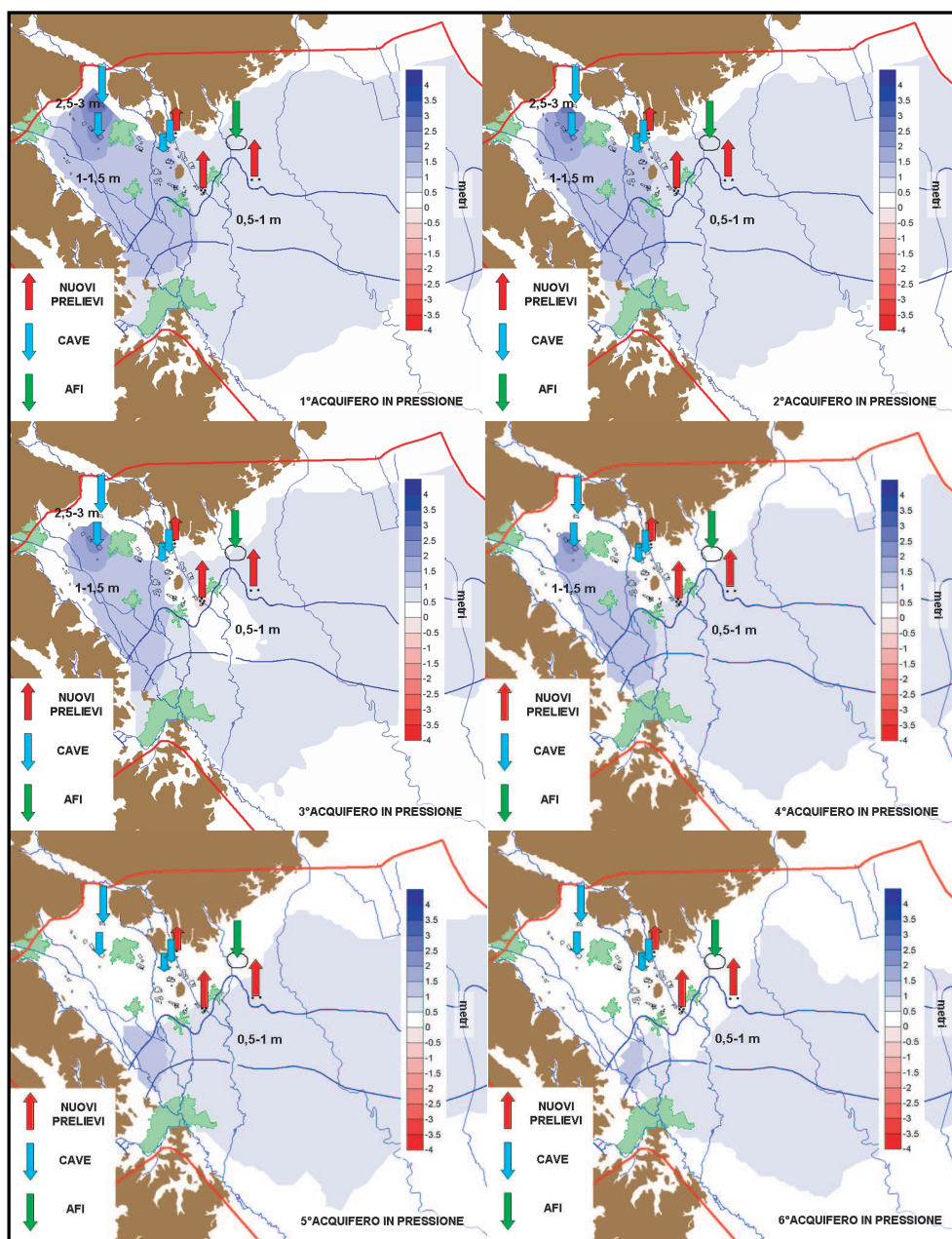


Figura 4.30: Scenario 8 - compensazione dei nuovi prelievi ($-1,2 \text{ m}^3/\text{s}$) attraverso la realizzazione dei soli interventi di ricarica puntuali (utilizzo di siti estrattivi e di aree boscate, $+1,8 \text{ m}^3/\text{s}$): abbassamenti ed innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) negli acquiferi in pressione.

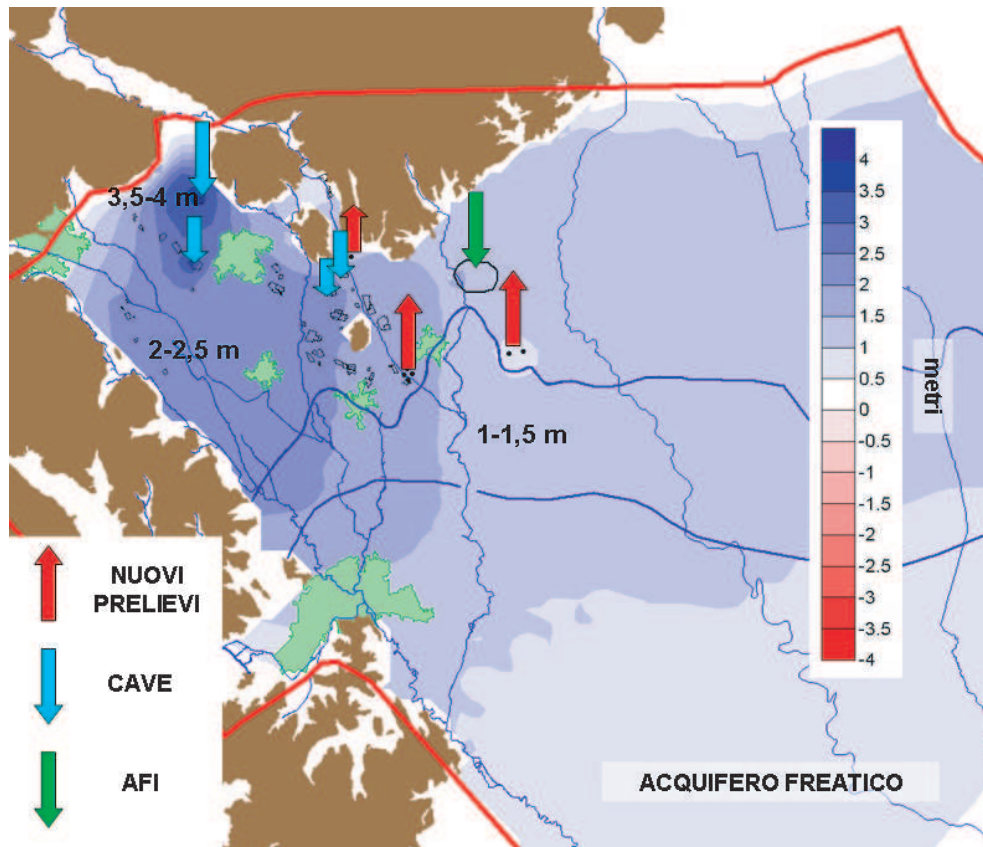


Figura 4.31: Scenario 9 - compensazione dei nuovi prelievi attraverso la realizzazione di tutti gli interventi di ricarica (utilizzo di siti estrattivi, di aree boscate e chiusura dei pozzi privati, $+2,3 \text{ m}^3/\text{s}$): abbassamenti ed innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) nell'acquifero freatico.

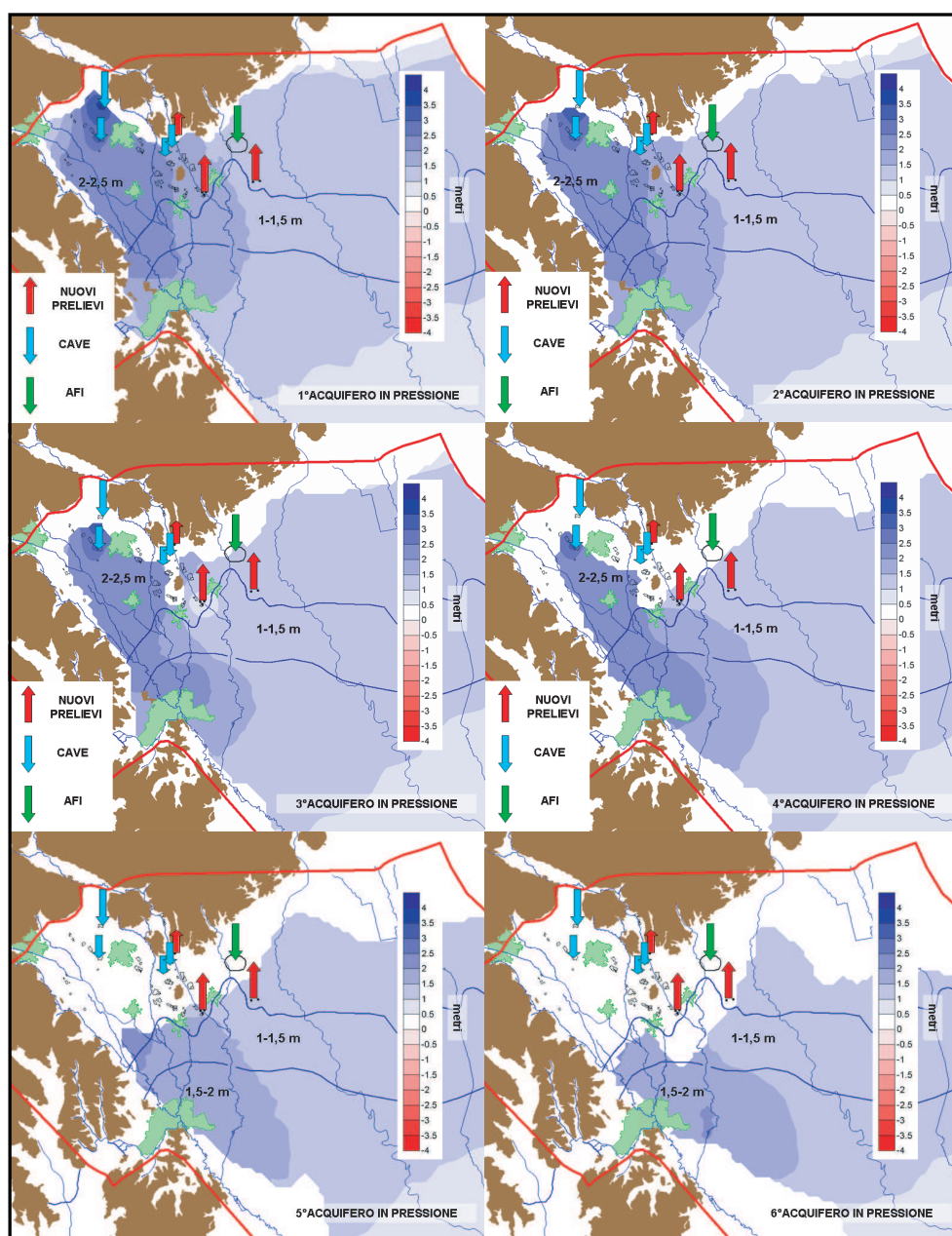


Figura 4.32: Scenario 9 - compensazione dei nuovi prelievi attraverso la realizzazione di tutti gli interventi di ricarica (utilizzo di siti estrattivi, di aree boscate e chiusura dei pozzi privati, $+2,3 \text{ m}^3/\text{s}$): abbassamenti ed innalzamenti negli acquiferi in pressione.

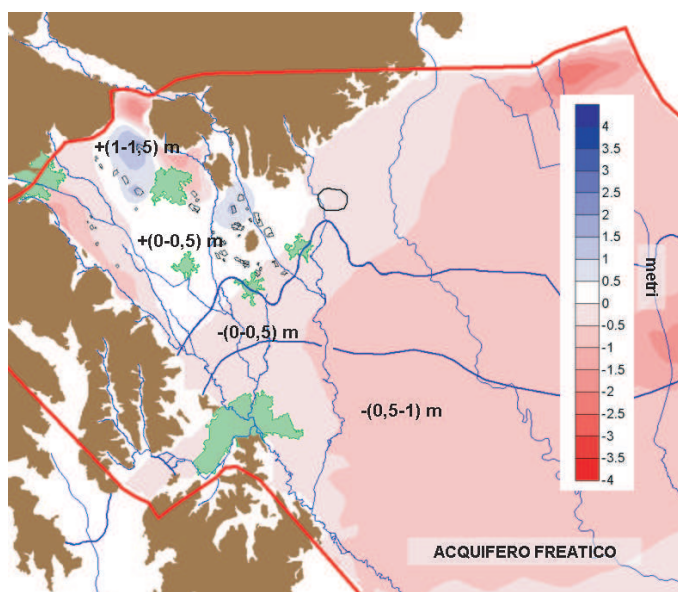


Figura 4.33: *Scenario 10 - compensazione della diminuzione dell'apporto meteorico efficace ($-2,7 \text{ m}^3/\text{s}$) attraverso le 3 tipologie di ricarica (utilizzo di siti estrattivi, di aree boscate e chiusura dei pozzi privati, $+2,3 \text{ m}^3/\text{s}$): abbassamenti ed innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) nell'acquifero freatico.*

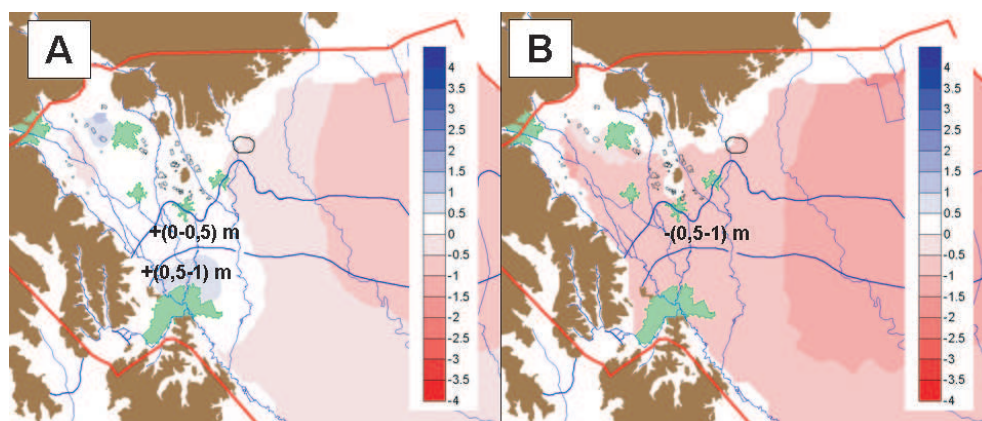


Figura 4.34: *Compensazione della diminuzione dell'apporto meteorico efficace ($-2,7 \text{ m}^3/\text{s}$) attraverso A) le 3 tipologie di ricarica ($+2,3 \text{ m}^3/\text{s}$); B) gli interventi di ricarica puntuale ($+1,8 \text{ m}^3/\text{s}$) nel \mathcal{P} acquifero confinato.*

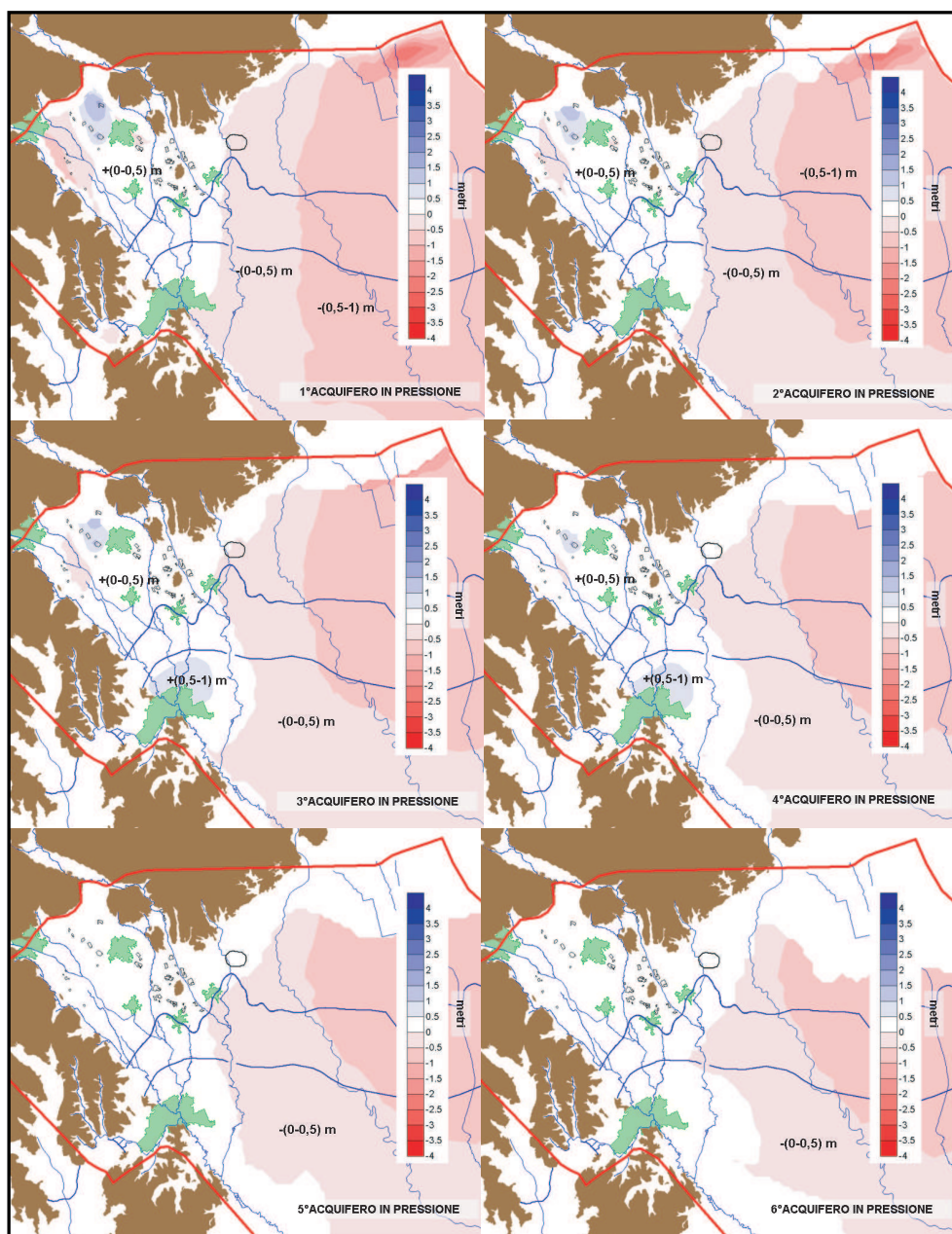


Figura 4.35: Scenario 10 - compensazione della diminuzione dell'apporto meteorico efficace ($-2,7 \text{ m}^3/\text{s}$) attraverso le 3 tipologie di ricarica (utilizzo di siti estrattivi, di aree boscate e chiusura dei pozzi privati, $+2,3 \text{ m}^3/\text{s}$): abbassamenti ed innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) negli acquiferi in pressione.

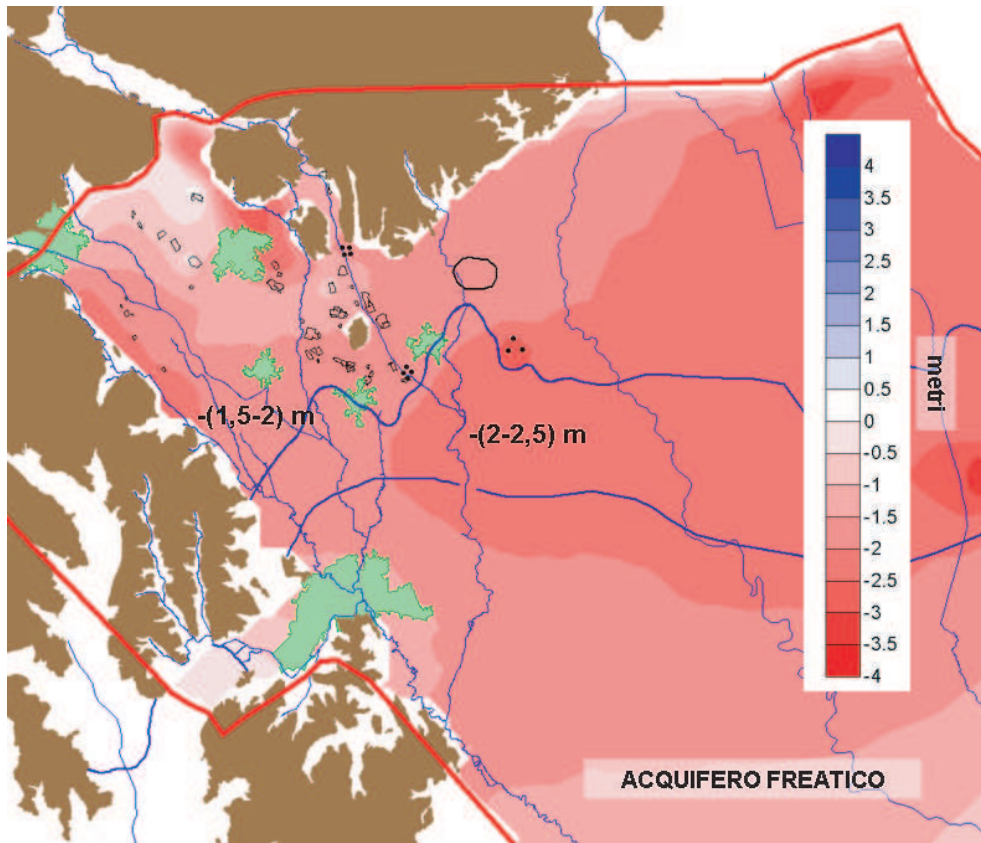


Figura 4.36: *Scenario 11 - compensazione della diminuzione dell'apporto meteorico efficace e dei nuovi prelievi ($-2,7 \text{ m}^3/\text{s} + -1,2 \text{ m}^3/\text{s} = -3,9 \text{ m}^3/\text{s}$) attraverso la realizzazione di tutti gli interventi di ricarica (utilizzo di siti estrattivi, di aree boscate e chiusura dei pozzi privati, $+2,3 \text{ m}^3/\text{s}$): abbassamenti ed innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) nell'acquifero freatico.*

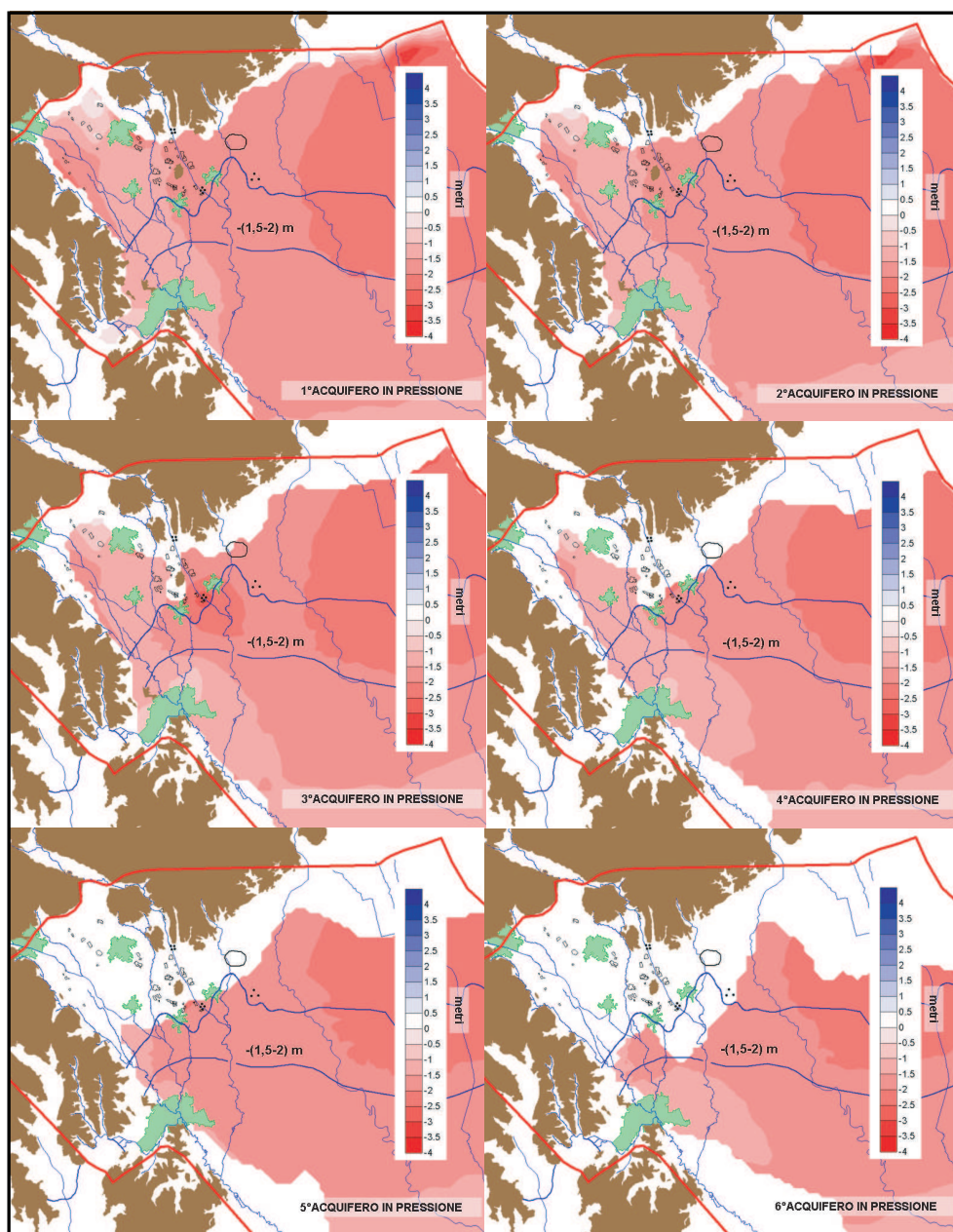


Figura 4.37: Scenario 11 - compensazione della diminuzione dell'apporto meteorico efficace e dei nuovi prelievi ($-2,7 \text{ m}^3/\text{s} + -1,2 \text{ m}^3/\text{s} = -3,9 \text{ m}^3/\text{s}$) attraverso la realizzazione di tutti gli interventi di ricarica (utilizzo di siti estrattivi, di aree boscate e chiusura dei pozzi privati, $+2,3 \text{ m}^3/\text{s}$): abbassamenti ed innalzamenti rispetto alle superfici del 2004 (miglior taratura) negli acquiferi in pressione.

Capitolo 5

La robustezza del modello

Al termine delle attività di creazione, implementazione e taratura del modello di flusso, si è deciso di analizzare la robustezza dei risultati ottenuti. A tal fine, si sono valutati gli effetti indotti sulle piezometrie e sui principali termini del bilancio idrico sotterraneo causati dalle variazioni sia della geometria degli acquitardi, sia della caratterizzazione degli acquiferi e degli acquitardi.

5.1 Robustezza del modello rispetto alle variazioni della geometria degli acquitardi

Il modello strutturale, come esposto nel capitolo 3, è stato ricostruito a partire dalle informazioni stratigrafiche e dalle sezioni geologiche raccolte nel corso dello studio. In particolare, l'informazione relativa alla comparsa delle 6 lenti a bassa permeabilità all'interno del materasso alluvionale, ottenuta attraverso interpolazione spaziale di dati puntuali, risulta di fondamentale importanza al fine di riprodurre correttamente il passaggio dall'acquifero indifferenziato al sistema multifalde. Pertanto, per valutare l'entità degli effetti causati da un eventuale errore commesso sull'assetto geologico, si sono realizzati 30 nuovi modelli strutturali caratterizzati ognuno da una diversa posizione delle linee di comparsa delle 6 lenti di argilla.

5.1.1 Slittamento delle lenti a bassa permeabilità

Le lenti a bassa permeabilità sono state slittate verso nord o verso sud, con passo 500 m ; la nuova linea di comparsa di ognuna delle 6 lenti è parallela alla linea di comparsa originale della lente stessa (le linee di comparsa originali delle 6 lenti sono quelle relative al modello strutturale caratterizzato da slittamento nullo e utilizzato nel corso dello studio). Lo slittamento massimo verso nord è di 5 km e comporta una diminuzione dell'acquifero indifferenziato; lo slittamento massimo verso sud è di 10 km (figura 5.1). Per poter realizzare slittamenti con passo 500 m , è stato necessario modificare la mesh di calcolo bidimensionale infittendola in corrispondenza della fascia di slittamento delle 6 lenti (figura 5.2).

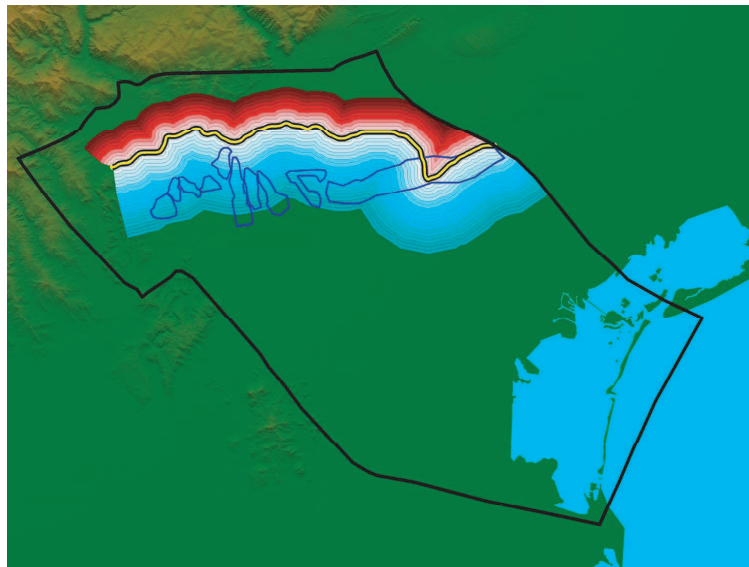


Figura 5.1: *Linea di comparsa della 1° lente a bassa permeabilità e slittamenti.*

Si evidenzia che le lenti sono state slittate tutte contemporaneamente: uno slittamento di 500 m verso sud indica che tutte le lenti subiscono uno slittamento verso sud di 500 m . Pur essendo possibile slittare ogni lente indipendentemente, si è deciso di slittare tutte assieme le 6 lenti: infatti, lo slittamento della sola 1° lente avrebbe messo in comunicazione l'acquifero freatico con il 1° acquifero in pressione ma non ci sarebbe stata nessuna comunicazione con gli altri acquiferi

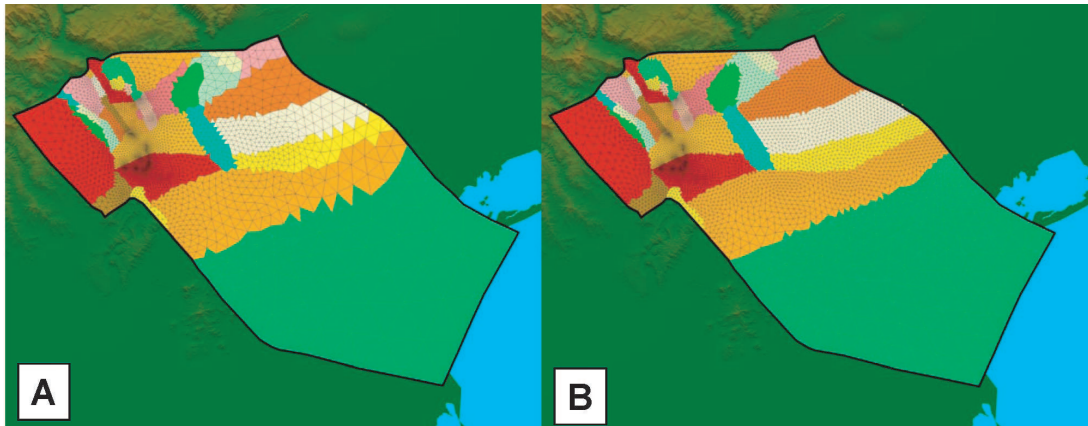


Figura 5.2: *Mesh di calcolo A) originale, B) nuova (realizzata per gli slittamenti delle lenti.)*

sottostanti. Inoltre, è verosimile che l'incertezza circa la comparsa delle lenti riguardi tutte le lenti.

La creazione del modello strutturale, realizzata attraverso il software LAGRIT, necessita di 14 superfici triangolate (piano campagna, substrato roccioso, superfici superiore ed inferiore delle 6 lenti). Tali superfici sono, come precedentemente esposto, delle griglie (mesh) bidimensionali identiche che si differenziano solo per la quota assoluta z . Si ricorda che la quota superiore della lente è uguale alla quota inferiore quando la lente si è esaurita. Per realizzare gli slittamenti, sono state mantenute le superfici superiori delle lenti e si sono ricalcolate le superfici inferiori. Una volta create le aree di slittamento per ognuna delle 6 lenti, cioè le aree ad ugual distanza dalla linea di comparsa della lente (identificate con 500 SUD, 1500 SUD, ... e 500 NORD, 1500 NORD, ...), è stato possibile classificare i nodi delle 12 superfici che delimitano le lenti in base all'area di appartenenza (figura 5.3).

Ad esempio, nel realizzare uno slittamento di 3500 m verso sud, i nodi di ogni lente sono stati classificati nel seguente modo (S_0 indica la comparsa della lente relativa al modello strutturale originale, ossia in assenza di slittamento o con slittamento nullo):

- nodi appartenenti alle aree di slittamento a nord di $S0$: nessuna imposizione, in questi nodi la quota della superficie inferiore è già uguale alla quota della superficie superiore (per ogni lente);
- nodi appartenenti alle aree di slittamento a sud di $S0$ con distanza minore non uguale allo slittamento scelto (3500 m): impongo che la quota della superficie inferiore sia uguale alla quota della superficie superiore;
- nodi appartenenti all'area 10500 SUD e 3500 SUD : la quota della superficie inferiore della lente di questi nodi viene mantenuta fissa e utilizzata per creare la nuova superficie inferiore attraverso l'interpolazione spaziale;
- nodi appartenenti alle aree di slittamento a sud di $S0$ e con distanza maggiore non uguale allo slittamento scelto (3500 m) e minore di 10500 SUD : in questi nodi viene ricalcolato il valore della quota inferiore della lente attraverso l'interpolatore spaziale del kriging.

Per ogni slittamento, una volta classificati i nodi e interpolate le nuove superfici inferiori delle lenti, si è generato un nuovo modello strutturale e la corrispondente griglia di calcolo tridimensionale. Nessuna modifica è stata apportata ai parametri geologici assegnati in fase di taratura. Riassegnate le condizioni al contorno e le portate entranti ed uscenti dal sistema, è stato implementato il modello in 2 modalità:

A assegnando la portata sfiorante dalle risorgive;

B assegnando la quota di sfioro delle risorgive (in questo caso, il codice calcola le portate sfioranti dalle risorgive).

5.1.2 Effetti sulle piezometrie

Per valutare gli effetti indotti dagli slittamenti sulle piezometrie calcolate dal codice numerico, si è introdotto, per ognuno dei 6 acquiferi, il parametro scarto quadratico medio (di seguito indicato SQM , espresso in metri) definito come:

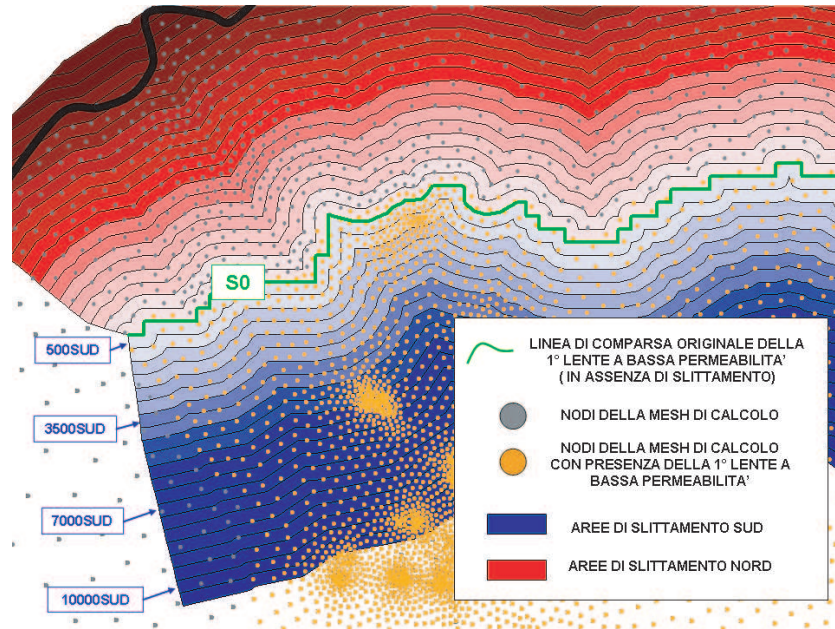


Figura 5.3: Aree di slittamento relative alla 1° lente a bassa permeabilità e classificazione dei nodi.

MESH	NODI	TETRAEDRI
Originale	143.496	831.790
S0	222.687	1.289.570
5000 NORD	229.618	1.330.960
10000 SUD	188.905	1.087.511

Tabella 5.1: Caratteristiche delle griglie tridimensionali di calcolo

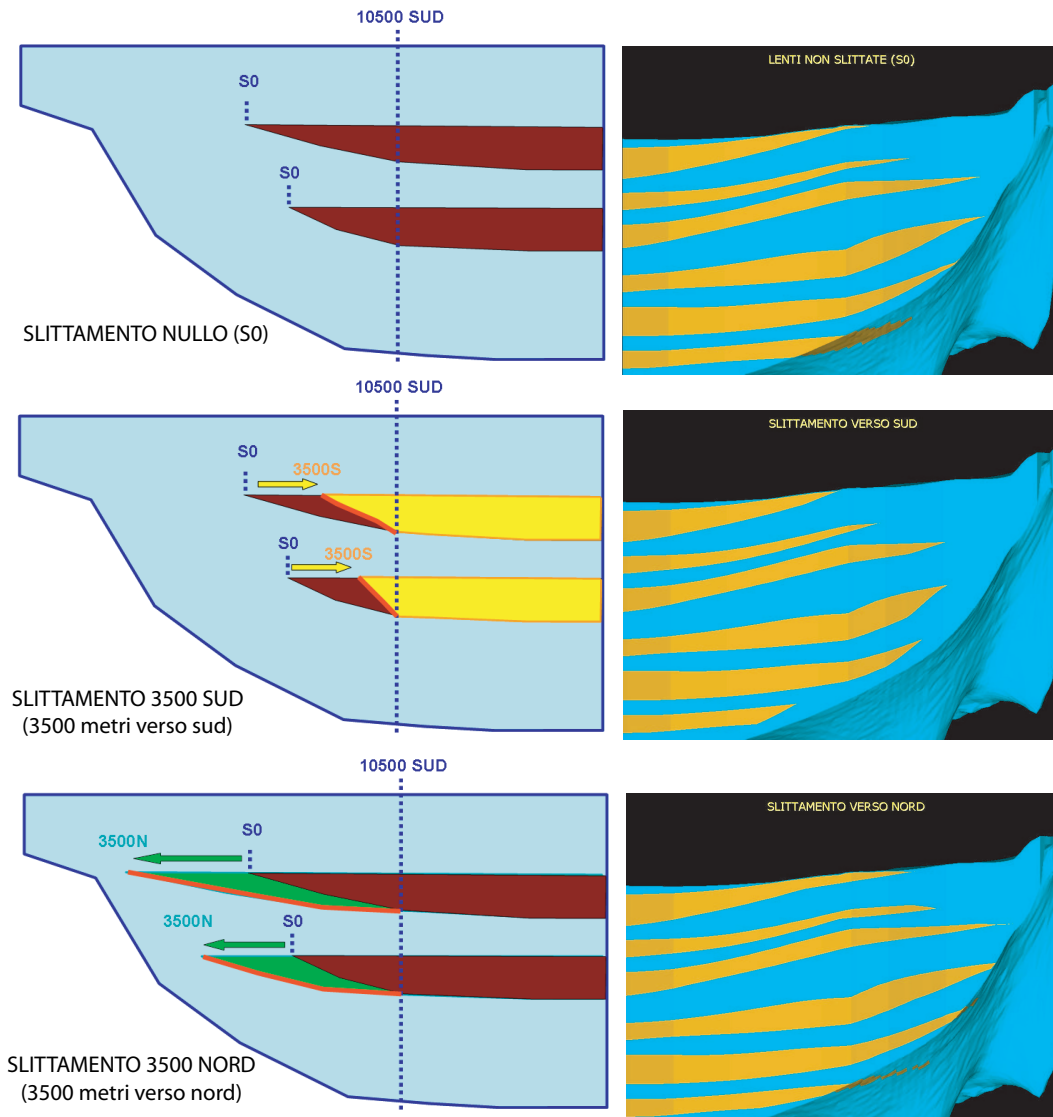


Figura 5.4: *Slittamento delle lenti verso nord e verso sud (evidenziate in rosso le superfici interpolate)*

$$SQM = \sqrt{\frac{\sum_i (h_{S,i} - h_{S0,i})^2}{N}} \quad (5.1)$$

dove:

$h_{S0,i}$ è la quota piezometrica (espressa in m s.l.m.m.) nel nodo i relativa allo slittamento nullo $S0$,

$h_{S,i}$ è la quota piezometrica (espressa in m s.l.m.m.) nel nodo i relativa allo slittamento non nullo S ,

N è il numero di nodi relativi all'acquifero considerato (si sottolinea che il numero di nodi all'interno di un acquifero cambia con lo slittamento eseguito, pertanto il calcolo di SQM utilizza solo i nodi che esistono sia nello slittamento $S0$, sia nello slittamento S).

Il parametro SQM rappresenta la stima della differenza tra la piezometria relativa allo slittamento S e quella relativa allo slittamento nullo $S0$, cioè al modello strutturale originale.

In figura 5.5, si riporta l'andamento di SQM in funzione dello slittamento (riportato nell'asse delle ascisse) per l'acquifero freatico e per i 6 acquiferi in pressione, relativamente alle implementazioni del modello condotte *assegnando la portata uscente dalle risorgive (CASO A)*. Dall'analisi del grafico 5.5 si può osservare che:

1. lo SQM è maggiore nell'acquifero freatico rispetto agli acquiferi in pressione;
2. lo SQM cresce all'aumentare dello slittamento, sia verso nord che verso sud;
3. lo SQM cresce in maniera molto accentuata se chiudo la connessione tra gli acquiferi (slittamenti verso nord).

Analogamente, in figura 5.6, si riporta l'andamento di SQM in funzione dello slittamento per l'acquifero freatico e per i 6 acquiferi in pressione, relativamente alle implementazioni del modello condotte *assegnando la quota di sfioro delle risorgive (CASO B)*. Dall'analisi del grafico 5.6 si può osservare che:

1. lo SQM è minore nell'acquifero freatico rispetto agli acquiferi in pressione (contrariamente al caso precedente);
2. lo SQM cresce all'aumentare dello slittamento, sia verso nord che verso sud (analogamente al caso precedente);
3. lo SQM cresce in maniera molto accentuata se chiudo la connessione tra gli acquiferi (analogamente al caso precedente).

Alla luce di questi risultati, si sono individuati 2 comportamenti (figura 5.7):

1. nel caso dell'acquifero freatico lo SQM relativo al caso A è maggiore allo SQM relativo al caso B per tutti gli slittamenti: ciò è dovuto al fatto che nel caso B vengono assegnate nella fascia delle risorgive le quote assolute del potenziale e quindi nei nodi appartenenti a questa zona la differenza ($h_{S,i} - h_{S0,i}$) è nulla;
2. nel caso degli acquiferi in pressione lo SQM_A è simile allo SQM_B per piccoli slittamenti, mentre per slittamenti maggiori $SQM_A < SQM_B$: l'assegnazione della quota di sfioro delle risorgive ha infatti deboli ripercussioni negli acquiferi confinati.

In conclusione, eventuali piccoli errori nel modello geostrutturale (slittamenti compresi tra 1000 m verso nord e 1000 m verso sud):

- se le simulazioni vengono condotte imponendo la quota di sfioro delle risorgive, non comportano variazioni sostanziali sulle piezometrie (SQM circa 1 m);
- se le simulazioni vengono condotte imponendo la portata sfiorante dalle risorgive, non comportano variazioni sostanziali sulle piezometrie negli acquiferi confinati (SQM circa 1 m), mentre si hanno effetti maggiori nell'acquifero freatico (SQM circa 2 m).

Considerando accettabile uno SQM di 5 m (pari all'errore accettato in fase di taratura del modello), sono ammessi errori strutturali relativi alla linea di comparsa delle lenti di argilla compresi tra 4500 m verso nord e 5000 m verso sud (se impongo la quota di sfioro delle risorgive) e gli slittamenti tra 2500 m verso nord e 7000 m verso sud (se impongo la portata sfiorante dalle risorgive).

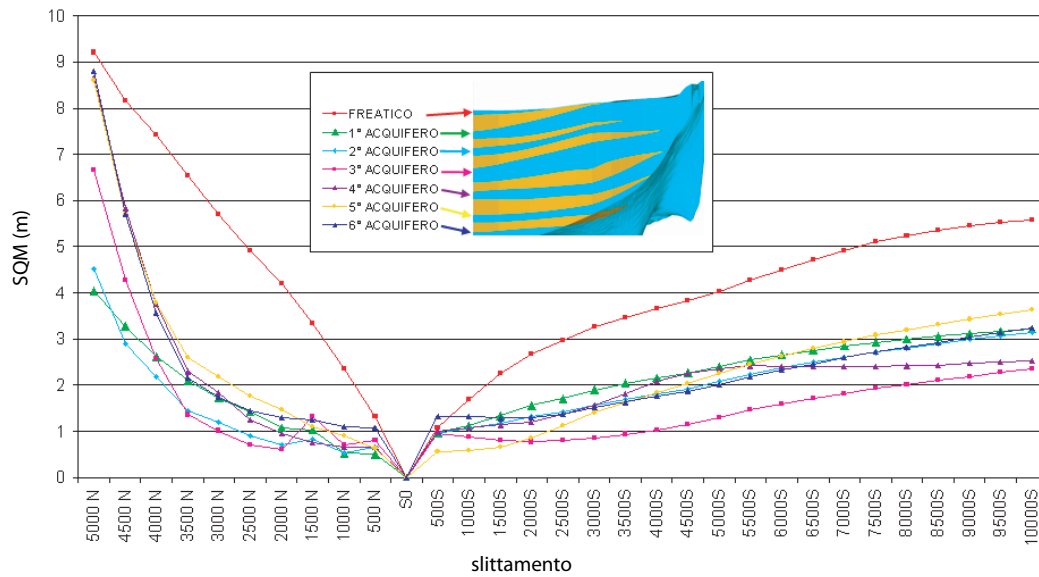


Figura 5.5: Andamento dello SQM al variare dello slittamento; implementazioni del modello condotte assegnando la portata sfiorante dalle risorgive (**CASO A**)

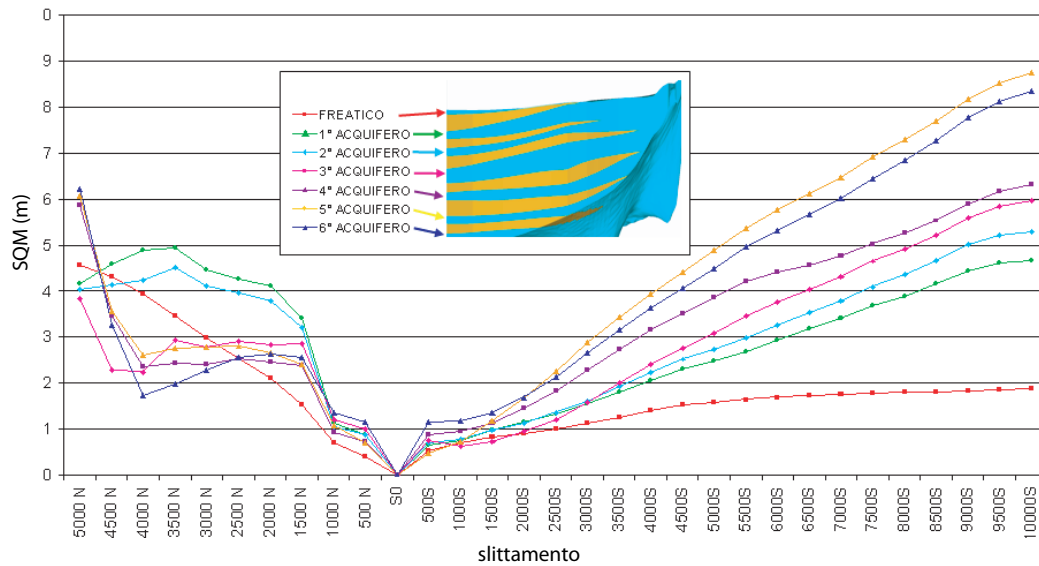


Figura 5.6: Andamento dello SQM al variare dello slittamento; implementazioni del modello condotte assegnando la quota di sfioro delle risorgive (**CASO B**)

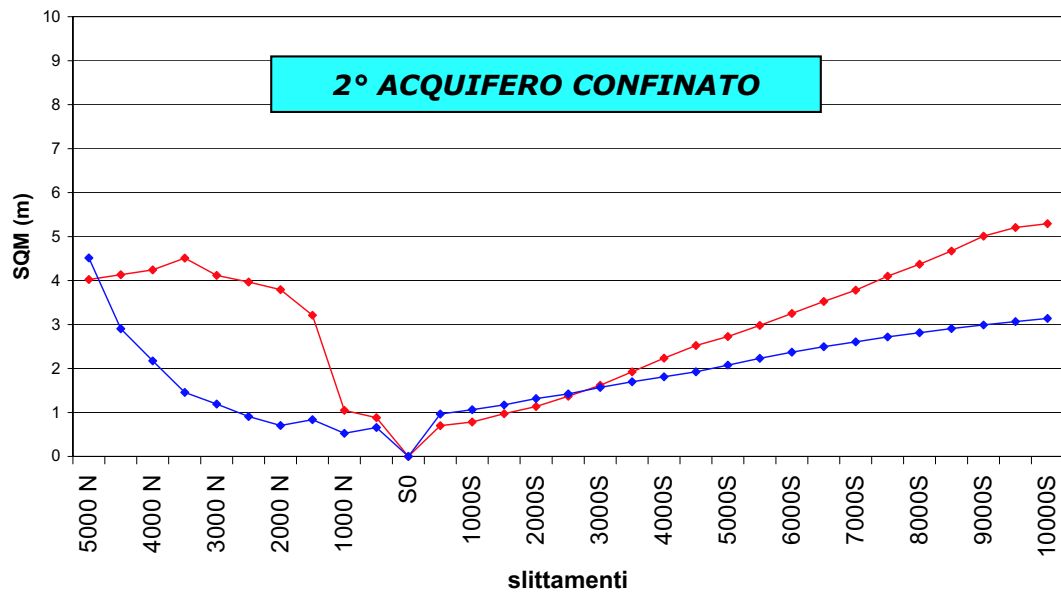
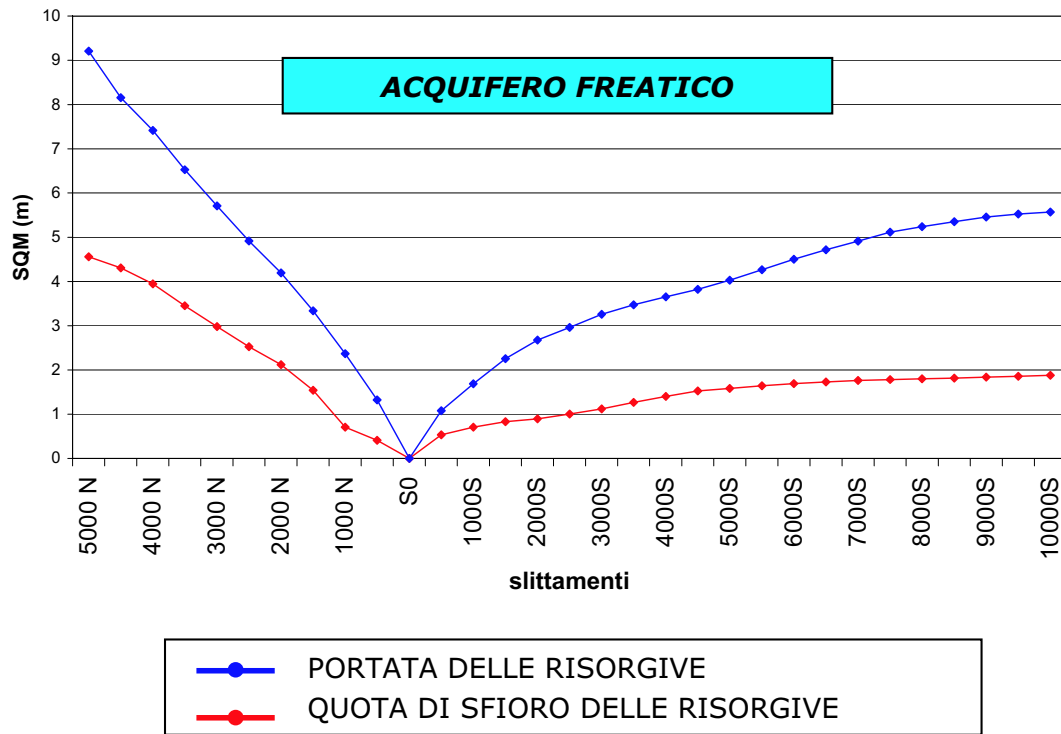


Figura 5.7: Confronto dell'andamento dello SQM al variare dello slittamento nel caso A (assegnata la portata sfiorante dalle risorgive) e nel caso B (assegnata la quota di sfioro delle risorgive).

5.1.3 Effetti sulle portate delle risorgive

Gli effetti sulle portate sfioranti dalle risorgive sono stati valutati guardando le variazioni indotte dagli slittamenti sui valori di portata calcolati dal modello di flusso, implementato assegnando la quota di sfioro delle risorgive. In figura 5.8, si riportano gli andamenti delle portate, calcolate dal modello, sfioranti dai 3 sub bacini in cui sono state suddivise le risorgive (Astico, destra Brenta e sinistra Brenta) in funzione dello slittamento eseguito. Le linee continue rappresentano i valori stimati delle portate, cioè i valori di riferimento (media 2004). E' evidente come gli slittamenti delle lenti comportano variazioni modeste nei valori di portata totale, mentre maggiori sono gli effetti sulle portate suddivise nei 3 sub bacini. Si nota tuttavia la buona aderenza tra i valori di riferimento e i valori calcolati dal modello nel caso di slittamento nullo (S_0), come evidenziato nel capitolo 4.

La figura 5.9 riporta gli scostamenti tra le portate calcolate dal modello nel caso di slittamento nullo S_0 e le portate, sempre calcolate dal modello, nel caso di slittamento non nullo S . Anche in questo caso, si può affermare che un eventuale errore commesso nella linea di comparsa delle lenti a bassa permeabilità causa variazioni modeste dei valori di portata sfiorante dalle risorgive. Questo è particolarmente vero se si considera l'intero sistema delle risorgive afferenti al domino del modello.

5.1.4 Effetti sulle portate attraverso i confini di Dirichlet

Infine, si sono osservate le variazioni indotte dalla modifica della geometria del modello geostrutturale sulle portate attraverso i confini del dominio sui quali è stata imposta un valore di potenziale assegnato (condizione di Dirichlet) costante nel tempo. In particolare, si sono valutate le variazioni delle portate entranti dall'altopiano di Asiago e uscenti dalla laguna. Dalla figura 5.10 emerge che la portata entrante dall'altopiano aumenta se le lenti slittano verso sud: questo vale sia se si assegna la portata sfiorante dalle risorgive sia che si imponga la quota

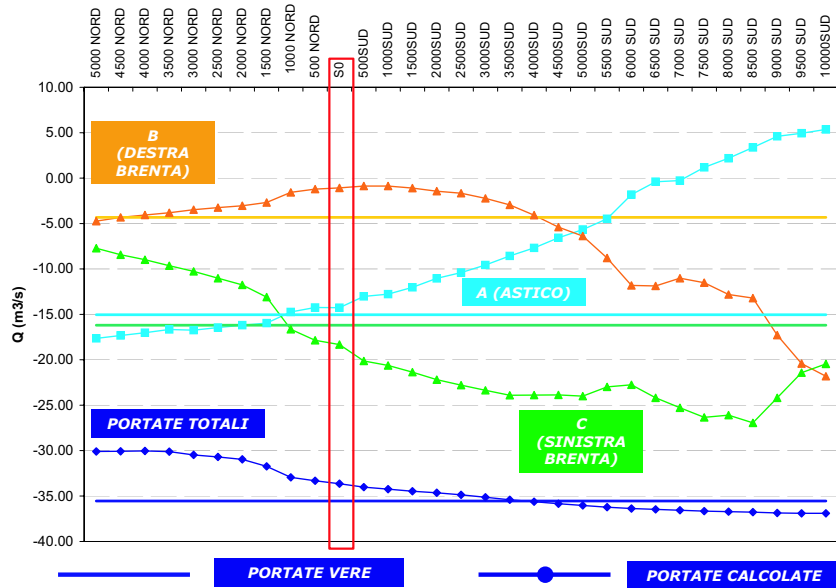


Figura 5.8: *Variazione delle portate uscenti dalle risorgive in funzione dello slittamento delle lenti a bassa permeabilità e confronto con i valori di riferimento stimati.*

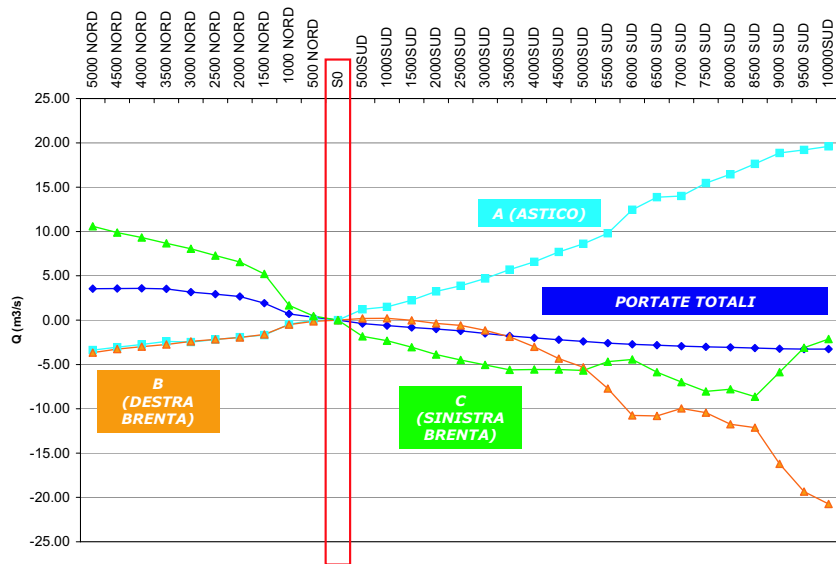


Figura 5.9: *Scostamenti tra le portate calcolate dal modello nel caso di slittamento nullo S0 e le portate, sempre calcolate dal modello, nel caso di slittamento non nullo S.*

di sfioro delle risorgive; mentre la portata uscente dalla laguna cala o rimane costante se le lenti slittano verso sud.

Nelle simulazioni condotte imponendo la quota di sfioro delle risorgive, mentre la comparsa delle lenti slitta verso sud:

- aumentano le portate entranti dall'altopiano ($+3,81 m^3/s$);
- calano le portate uscenti dalla laguna ($-1,78 m^3/s$);
- aumenta la portata sfiorante dalle risorgive ($+6,80 m^3/s$).

Nelle simulazioni condotte imponendo la portata sfiorante dalle risorgive, mentre la comparsa delle lenti slitta verso sud:

- aumentano le portate entranti dall'altopiano ($+3 m^3/s$);
- aumentano le portate uscenti dalla laguna ($+1,56 m^3/s$).

Tuttavia, l'effetto dello slittamento delle lenti a bassa permeabilità, cioè di un errore commesso nella ricostruzione geologica dell'area di studio, sulle portate attraverso i confini di Dirichlet è trascurabile rispetto all'entità delle portate in gioco.

In conclusione, un eventuale errore commesso nella ricostruzione geologica del modello, in particolare nella linea di comparsa delle lenti a bassa permeabilità, ha effetti modesti sia sulle piezometrie, sia sui valori delle portate sfioranti dalle risorgive, sia sui valori di portata entrante ed uscente attraverso i confini del dominio.

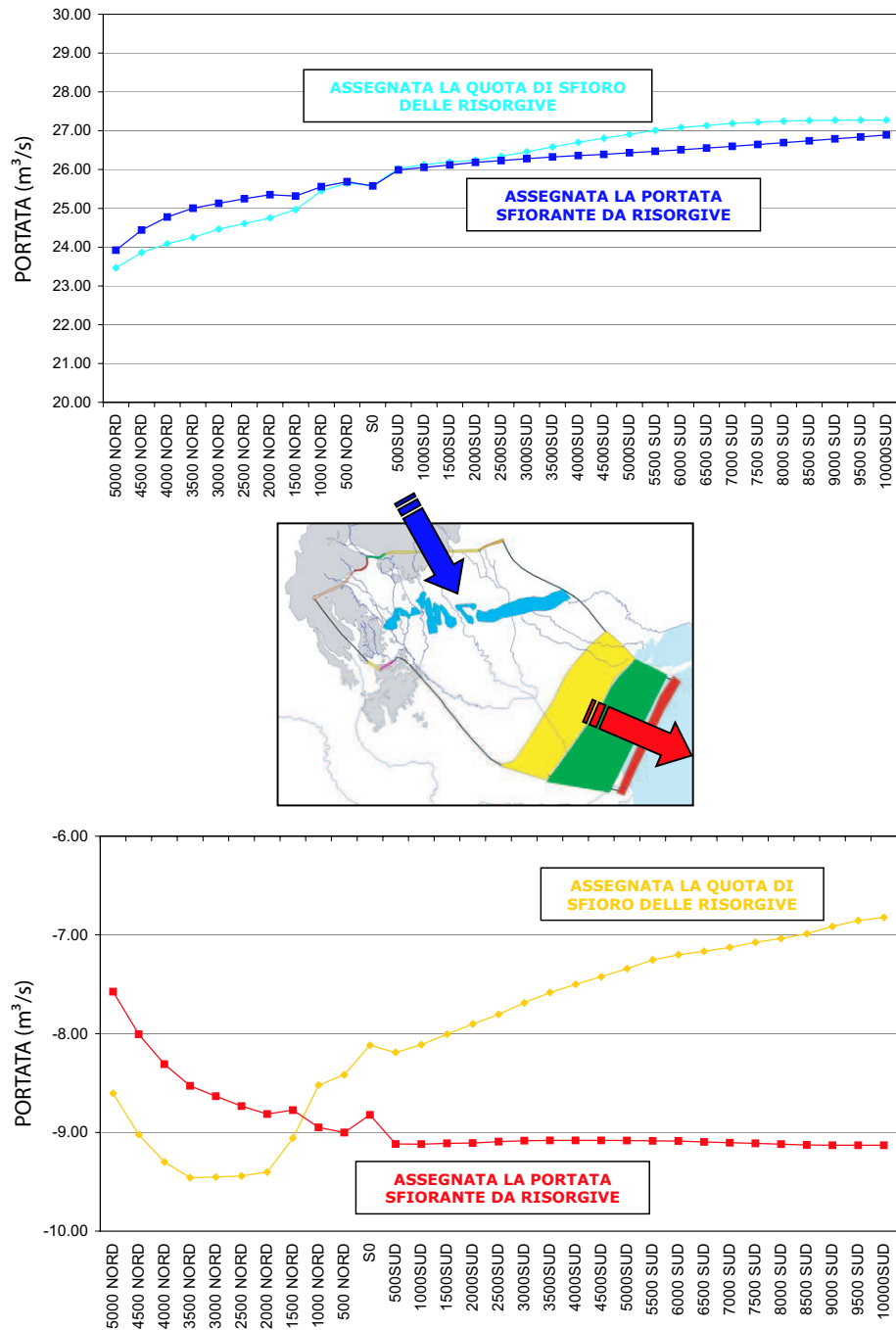


Figura 5.10: *Variazioni indotte dagli slittamenti sulle portate uscenti dalla laguna ed entranti dall'altopiano*

5.2 Robustezza del modello rispetto alle variazioni della parametrizzazione degli acquiferi e degli acquitardi

Analogamente a quanto detto in merito alla ricostruzione del modello geostrutturale, anche la parametrizzazione degli acquiferi e degli acquitardi è stata stimata a partire dalle informazioni reperite in letteratura nel corso dello studio, ed è pertanto potenzialmente affetta da errori. Inoltre, la necessità di attribuire un valore univoco ai parametri geologici (in particolare, al coefficiente di permeabilità) ad ogni zona geologica, rappresentativo della zona geologica stessa, ha, da un lato semplificato sia la procedura di caratterizzazione dei livelli produttivi e dei livelli impermeabili sia la fase di taratura del modello, dall'altro ha impedito una caratterizzazione di dettaglio dell'area di studio. La robustezza del modello rispetto alle variazioni della parametrizzazione degli acquiferi e degli acquitardi è stata testata modificando la modalità di assegnazione del coefficiente di permeabilità (dalle zone geologiche ai nodi).

5.2.1 Variazione della parametrizzazione degli acquiferi e degli acquitardi

Noti i valori del coefficiente di permeabilità K individuati in fase di taratura e assegnati alle 455 zone geologiche, si è generata per ogni zona geologica una serie di valori del coefficiente K da assegnare ai nodi appartenenti alla zona stessa. Le serie generate possono essere raggruppate in 2 classi:

- caso A: distribuzione lognormale di ognuna delle 455 serie di valori di K da assegnare ai nodi, con media $E(x)$ uguale a \bar{K}_{ZONA} , cioè uguale al valore assegnato in fase di taratura alla zona geologica;
- caso B: distribuzione lognormale di ognuna delle 455 serie di valori di K da assegnare ai nodi, con media $E(x)$ traslata rispetto al valore \bar{K}_{ZONA} assegnato in fase di taratura alla zona geologica.

La scelta della distribuzione lognormale deriva dall'analisi dei 157 valori del coefficiente K raccolti nel corso dello studio: il fit ottenuto con il metodo della massima verosomiglianza ha evidenziato la tipica distribuzione lognormale nella curva della densità di probabilità (figura 5.11).

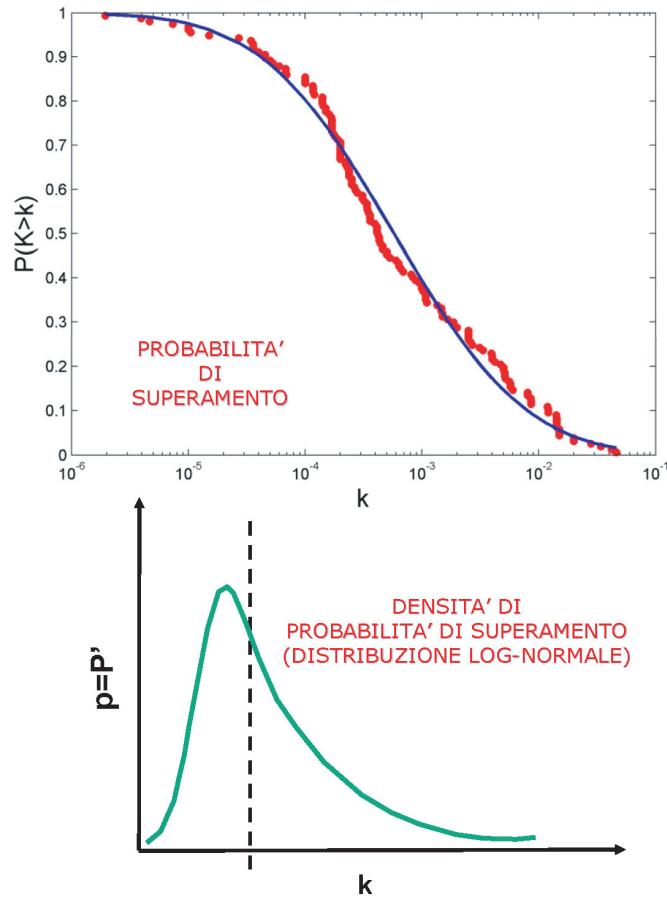


Figura 5.11: *Probabilità di superamento e densità di probabilità (distribuzione lognormale).*

Caso A

Per generare una serie di valori con distribuzione lognormale con media $E(x)$ e deviazione standard $\sqrt{Var(x)}$, occorre:

- generare una serie R con distribuzione normale N a media μ nulla e deviazione standard σ unitaria:

$$R = N(\mu = 0, \sigma = 1) \quad (5.2)$$

- calcolare la media e la deviazione standard della distribuzione normale associata alla distribuzione lognormale che si vuole generare (entrambe in funzione della media $E(x)$ e della deviazione standard $\sqrt{Var(x)}$ della distribuzione lognormale associata):

$$\mu = \ln(E(x)) - \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{Var(x)}{(E(x))^2}\right) \quad (5.3)$$

$$\sigma^2 = \ln\left(1 + \frac{Var(x)}{(E(x))^2}\right) \quad (5.4)$$

- generare la distribuzione lognormale dei valori di K_{NODO} attraverso la relazione:

$$K_{NODO} = \exp(\mu + \sigma R) \quad (5.5)$$

In tabella 5.2, si riportano i parametri delle 8 serie generate di K_{NODO} , relative al caso A ($E(x) = \bar{K}_{ZONA}$). La deviazione standard della distribuzione lognormale varia dal valore minimo di $5\% \bar{K}_{ZONA}$ al valore massimo di $200\% \bar{K}_{ZONA}$.

Caso B

In questo caso, per traslare la media della distribuzione lognormale di K_{NODO} rispetto al valore di \bar{K}_{ZONA} di K^* , è sufficiente utilizzare nelle relazioni 5.3 e 5.4 il nuovo valore di $E(x) = \bar{K}_{ZONA} + K^*$, indicato in tabella 5.3.

Anche in questo caso, la deviazione standard della distribuzione lognormale varia dal valore minimo di $5\% \bar{K}_{ZONA}$ al valore massimo di $200\% \bar{K}_{ZONA}$. La traslazione K^* minima è pari a $5\% \bar{K}_{ZONA}$, la traslazione massima è pari a $200\% \bar{K}_{ZONA}$.

CASO	NOME	$E(x)$	$\sqrt{Var(x)}$
CASO 1	LOGN_5%	\bar{K}_{ZONA}	5% \bar{K}_{ZONA}
CASO 2	LOGN_10%	\bar{K}_{ZONA}	10% \bar{K}_{ZONA}
CASO 3	LOGN_20%	\bar{K}_{ZONA}	20% \bar{K}_{ZONA}
CASO 4	LOGN_30%	\bar{K}_{ZONA}	30% \bar{K}_{ZONA}
CASO 5	LOGN_40%	\bar{K}_{ZONA}	40% \bar{K}_{ZONA}
CASO 6	LOGN_50%	\bar{K}_{ZONA}	50% \bar{K}_{ZONA}
CASO 7	LOGN_100%	\bar{K}_{ZONA}	100% \bar{K}_{ZONA}
CASO 8	LOGN_200%	\bar{K}_{ZONA}	200% \bar{K}_{ZONA}

Tabella 5.2: Parametri delle 8 serie generate di K_{NODO} (caso A).

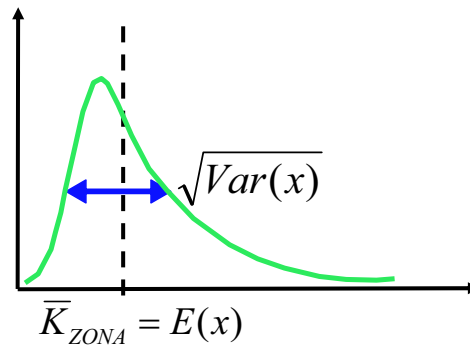


Figura 5.12: Distribuzione lognormale dei valori di K_{NODO} (caso A).

CASO	NOME	$E(x)$	$\sqrt{Var(x)}$
CASO 9	LOGNT_+5%_5%	$\bar{K}_{ZONA} + 5\% \bar{K}_{ZONA}$	$5\% \bar{K}_{ZONA}$
CASO 10	LOGNT_+5%_200%	$\bar{K}_{ZONA} + 5\% \bar{K}_{ZONA}$	$200\% \bar{K}_{ZONA}$
CASO 11	LOGNT_+50%_5%	$\bar{K}_{ZONA} + 50\% \bar{K}_{ZONA}$	$5\% \bar{K}_{ZONA}$
CASO 12	LOGNT_+50%_200%	$\bar{K}_{ZONA} + 50\% \bar{K}_{ZONA}$	$200\% \bar{K}_{ZONA}$

Tabella 5.3: Parametri delle 4 serie generate di K_{NODO} (caso B).

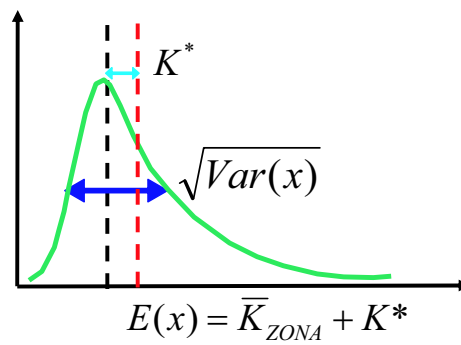


Figura 5.13: Distribuzione lognormale dei valori di K_{NODO} (caso B).

Al fine di verificare la correttezza della procedura di generazione delle serie con distribuzione lognormale dei valori di K_{NODO} , si sono calcolate, a partire dai valori assegnati ai nodi, le medie all'interno di ogni zona. In figura 5.14 si riportano i valori iniziali di K assegnati alle zone geologiche ($K_{START} = \bar{K}_{ZONA}$) e le medie dei valori K_{NODO} all'interno di alcune zone geologiche dell'acquifero freatico: è evidente che mentre nei casi A le medie dei valori assegnati ai nodi sono uguali ai valori originali assegnati alle zone, nei casi B ciò non è più vero.

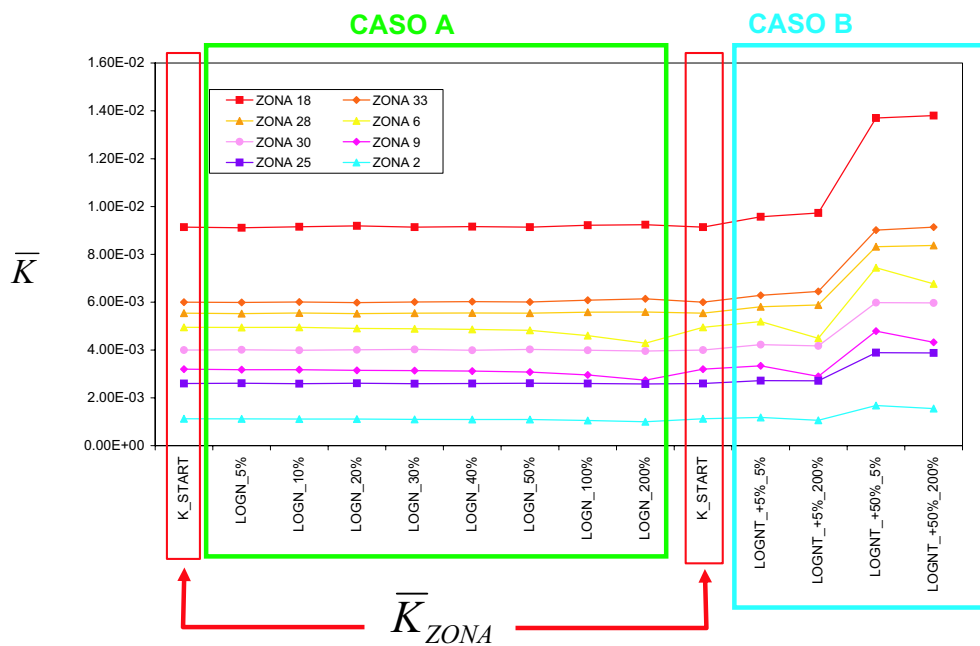


Figura 5.14: Confronto tra \bar{K}_{ZONA} assegnato alle zone geologiche e la media dei valori K_{NODO} all'interno della stessa zona geologica (acquifero freatico).

5.2.2 Effetti sulle piezometrie

Per valutare gli effetti indotti dalla variazione della parametrizzazione degli acquiferi e degli acquitardi sulle piezometrie calcolate dal codice numerico, si è utilizzato il parametro scarto quadratico medio (di seguito indicato SQM , espresso in metri) definito in precedenza (equazione 5.1). Lo SQM è contenuto nel caso A,

cioè gli effetti sulle piezometrie sono minimi se, in fase di assegnazione del coefficiente di permeabilità K ai nodi, viene conservato il valor medio del parametro \bar{K}_{ZONA} assegnato alle zone. Al contrario, nel caso in cui questo valor medio di \bar{K}_{ZONA} non é rispettato nell'assegnazione di K ai nodi (caso B), le variazioni indotte sulle piezometrie non sono trascurabili. Ciò significa che, per poter mantenere le piezometrie simulate dal modello ottenute in fase di taratura, è necessario che la media, all'interno delle zone geologiche, dei valori del parametro K assegnato ai nodi rispetti la parametrizzazione a zone.

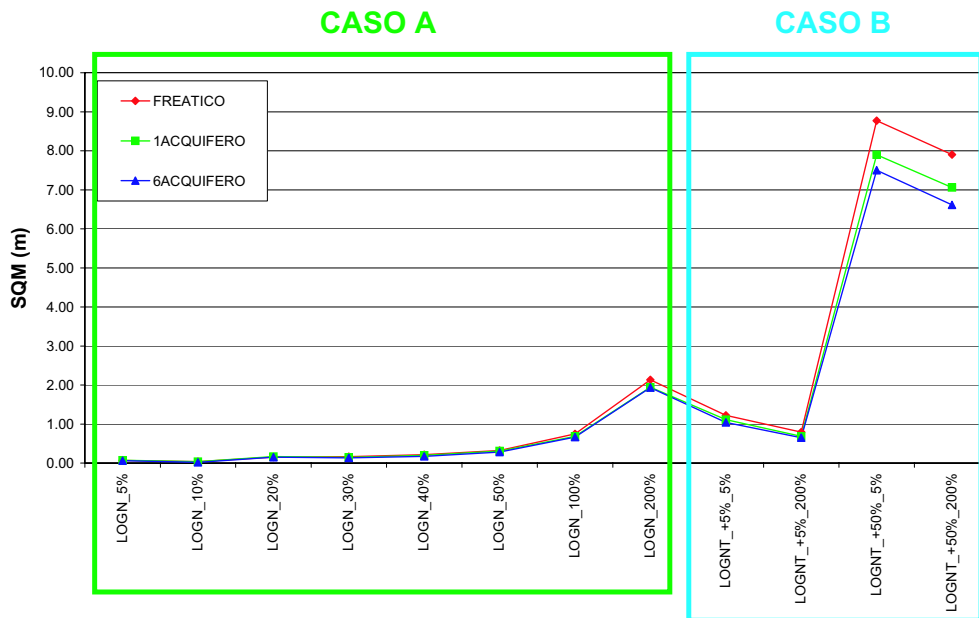


Figura 5.15: SQM in funzione della variazione della parametrizzazione degli acquiferi e degli acquitardi.

5.2.3 Effetti sulle portate attraverso i confini di Dirichlet

Infine, anche in questo caso, si sono osservate le variazioni indotte dalla modifica della parametrizzazione degli acquiferi e degli acquitardi sulle portate attraverso i confini del dominio sui quali è stato imposto un valore di potenziale assegnato (condizione di Dirichlet) costante nel tempo. In particolare, si sono valutate le variazioni delle portate entranti dall'altopiano di Asiago e uscenti dalla laguna. Dalla figura 5.16 emerge che il valore della portata entrante dall'altopiano si modifica, passando da $25 \text{ m}^3/\text{s}$ a $35 \text{ m}^3/\text{s}$, nel caso in cui il valor medio del parametro K assegnato ai nodi non coincide con il valore medio di K assegnato alle zone (caso B). Analogo effetto si ha sulle portate uscenti dalla laguna, che passano da $-9 \text{ m}^3/\text{s}$ a $-16 \text{ m}^3/\text{s}$. Alla luce di questi risultati si può affermare che anche i termini del bilancio vengono modificati in maniera non trascurabile se non si conserva il valore medio di \bar{K}_{ZONA} (assegnato alle zone) nel passaggio di assegnazione di K ai nodi.

La variazione della parametrizzazione degli acquiferi e degli acquitardi ha dimostrato quindi l'importanza di conoscere le proprietà delle formazioni porose eterogenee a scala non locale. Tale risultato ha ulteriormente giustificando la procedura di attribuzione dei parametri a zone geologiche, adottata in fase di creazione e taratura del modello di flusso.

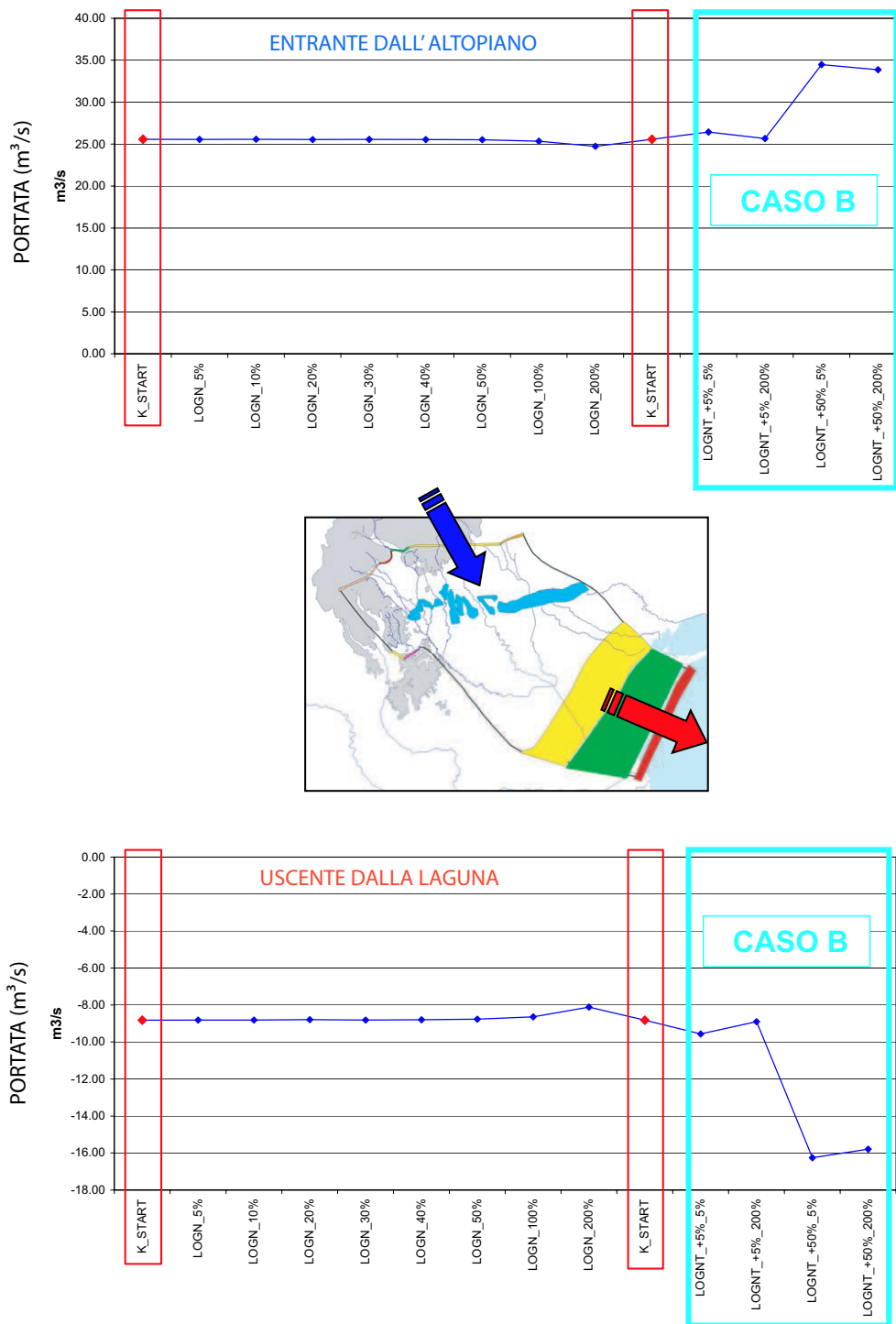


Figura 5.16: Variazioni indotte dagli parametrizzazione assegnata a zone sulle portate uscenti dalla laguna ed entranti dall'altopiano.

Conclusioni

Il modello di flusso sviluppato nel corso dello studio costituisce un importante strumento a disposizione degli Enti competenti, quali Province, Autorità d'Ambito e Gestori, di supporto alla gestione della risorsa idrica sotterranea presente nei territori del Vicentino. Il modello consente infatti di affrontare e gestire le problematiche quantitative attuali e di dare risposte certe sulla sostenibilità, nel medio-lungo periodo, degli attuali livelli di sfruttamento delle acque sotterranee in relazione a talune criticità emerse.

Lo strumento realizzato è aperto: ogni nuovo elemento conoscitivo di carattere geostrutturale ed idrogeologico, eventualmente reso disponibile nel tempo, può alimentare il modello e contribuire all'aggiornamento dell'assetto geostrutturale e del bilancio idrologico.

Le attività di campo hanno contribuito da un lato a verificare alcune informazioni ormai datate (ad esempio, la capacità disperdente del sistema idrografico Leogra-Timomchio), dall'altro ad aumentare la conoscenza idrogeologica dei territori, attraverso la raccolta dati piezometrici, lo studio dell'efficacia della ricarica artificiale e l'esecuzione di nuove prove di pompaggio.

L'evidente crisi idrica che ha caratterizzato gli ultimi anni e che si è ripresentata nel 2007, deve renderci consapevoli del carattere finito dei sistemi acquiferi del Vicentino e dell'importanza di una loro gestione sostenibile, capace di tramandare le risorse idriche che ha avuto a disposizione questa generazione alle generazioni future. I trend negativi registrati nei pozzi monitorati, la possibilità di anni caratterizzati da scarsi apporti meteorici, la riduzione della capacità di ricarica dei sistemi acquiferi a causa della progressiva urbanizzazione del territorio

e l'eventuale realizzazione di nuovi prelievi ad uso acquedottistico, rendono ancora più urgente la necessità di prevedere tempestivi, e spazialmente distribuiti, interventi di ricarica degli acquiferi.

L'implementazione del modello di flusso ha evidenziato che tali interventi, da realizzarsi, ad esempio, attraverso la creazione di adatti invasi in prossimità dei corsi d'acqua (utilizzando ex siti estrattivi), o con l'utilizzo di canalette irrigue (specie nel periodo invernale per non togliere alla falda il contributo derivante dalla loro capacità disperdente), o ancora di acque spagliate su aree boscate, necessitano di un'attenta valutazione circa la loro reale efficacia in relazione al posizionamento nel territorio. E' infatti auspicabile che ricariche forzate possano provocare un incremento dei livelli piezometrici anche negli acquiferi in pressione (adatti a prelievi ad uso acquedottistico): per tal motivo devono essere posizionati in corrispondenza all'acquifero indifferenziato delle zone pedemontane. E' inoltre del tutto ragionevole, per una pratica veramente sostenibile, che le ricariche siano commisurate ai prelievi aggiuntivi d'acqua, e che sia valutata con attenzione la possibilità di usare a fini di ricarica acque che effettivamente avrebbero lasciato il sistema degli acquiferi vicentini.

Come più volte osservato, l'efficacia degli interventi di ricarica è fortemente connessa alla comparsa delle lenti a bassa permeabilità: è evidente che gli interventi realizzati prima dell'imbocco degli acquiferi in pressione, cioè in corrispondenza dell'acquifero indifferenziato, avranno effetti positivi anche nel sistema a falde sovrapposte confinate. Al fine di simulare correttamente gli effetti della ricarica, il modello geostrutturale è stato ricostruito con grande accuratezza, in particolare in corrispondenza dell'imbocco del sistema multifalde. D'altra parte, l'analisi della robustezza del modello geostrutturale rispetto alle variazioni della geometria delle lenti a bassa permeabilità ha evidenziato che un eventuale errore commesso nella ricostruzione geologica, in particolare nella linea di comparsa delle lenti, ha effetti modesti sia sulle piezometrie, sia sui valori delle portate sfioranti dalle risorgive, sia sui valori di portata entrante ed uscente attraverso i confini del dominio. Analogamente, la variazione della parametrizzazione degli acquiferi e degli acquitardi ha dimostrato l'importanza di conoscere le proprietà

delle formazioni porose eterogenee a scala non locale. Inoltre, è stata confermata la validità della procedura di assegnazione dei parametri geologici alle zone, adottata in fase di creazione e taratura del modello di flusso.

Dall'analisi degli scenari realizzati è emersa l'efficacia di tutti gli interventi posizionati nell'area di ricarica, cioè a nord della linea di comparsa della prima lente a bassa permeabilità. In particolare è da registrarsi l'effetto benefico (in termini di innalzamento dei livelli piezometrici) negli acquiferi in pressione derivante dalla chiusura dei pozzi privati (da $3 \text{ m}^3/\text{s}$ a $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$); questo tipo di intervento, facile da realizzarsi ma che richiede un'adeguata sensibilità ambientale, è da preferirsi per la presenza diffusa nel territorio di questi pozzi privati che emungono a diverse profondità. Interventi puntuali, quali la realizzazione di invasi e di aree boscate allagate, hanno effetti più localizzati e comunque strettamente connessi con le caratteristiche idrogeologiche del sito prescelto. Nuovi prelievi sono da considerarsi ammissibili qualora mitigazioni prodotte da ricariche forzate siano dimostrabilmente efficaci. In particolare, lo studio evidenzia come il previsto prelievo ($1,2 \text{ m}^3/\text{s}$) in località Breganze-Fara Vicentino (350 l/s), Montecchio Precalcino-Passo di Riva (450 l/s), Ancignano-Schiavon (400 l/s), condurrebbe ad abbassamenti distribuiti nei vari livelli piezometrici in una vasta area del vicentino. Infiltrazioni forzate in siti mirati individuati sono capaci di sostanziali mitigazioni di tali abbassamenti.

Si può quindi affermare che il modello matematico di flusso predisposto appare insostituibile per la dimostrata capacità di previsione della risposta del sistema a nuovi prelievi/ricariche in siti prestabiliti.

STAZIONE 2


Località

Campagnola-Greselin

Comune

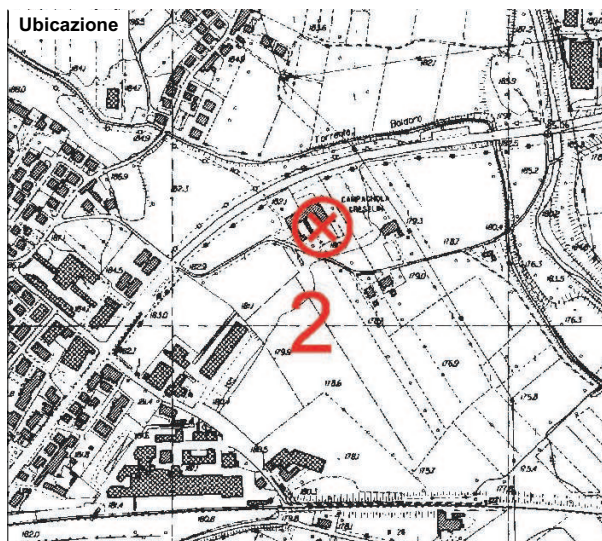
Schio

Indirizzo

Via Campagnolo, 27/29

Coordinata G. Boaga X 1685227,4

Coordinata G. Boaga Y 5065146,4

**Quota assoluta bocca pozzo
(m s.l.m.m.)** 182,59

Profondità rispetto b.p. (m) 15,83

Altezza b.p. rispetto al p.c. (m) 0,95

Profondità rispetto p.c. (m) 14,88

Diametro (cm) 140

Uso

-

STAZIONE 5



Località	Cabrelle
Comune	Schio
Indirizzo	Via Garziera, 18
Coordinata G. Boaga X	1687465,0
Coordinata G. Boaga Y	5065898,6
Quota assoluta bocca pozzo (m s.l.m.m.)	171,16



Profondità rispetto b.p. (m)	27,55
Altezza b.p. rispetto al p.c. (m)	0,85
Prodondità rispetto p.c. (m)	26,70
Diametro (cm)	140
Uso	-

STAZIONE 7


Località

Sorano

Comune

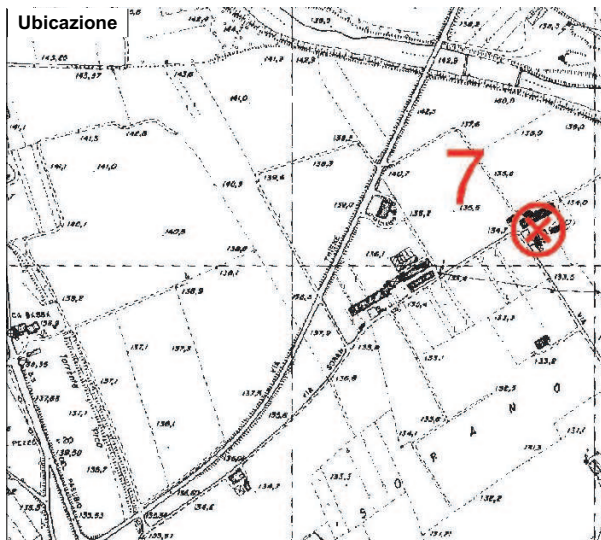
Malo

Indirizzo

Via Sorano

Coordinata G. Boaga X 1687907,1

Coordinata G. Boaga Y 5061567,4

**Quota assoluta bocca pozzo
(m s.l.m.m.)** 135,25

Profondità rispetto b.p. (m) 65,86

Altezza b.p. rispetto al p.c. (m) 0,89

Profondità rispetto p.c. (m) 64,97

Diametro (cm) 110

Uso

-

STAZIONE 10

**Località**

Garziera

Comune

Zanè

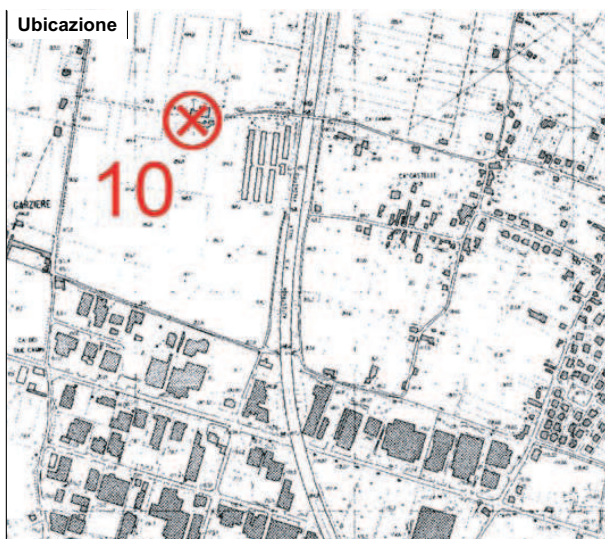
Indirizzo

Via Cà Zanina

Coordinata G. Boaga X 1689124,3

Coordinata G. Boaga Y 5066901,5

Quota assoluta bocca pozzo (m s.l.m.m.) 192,37



Profondità rispetto b.p. (m) 123,00

Altezza b.p. rispetto al p.c. (m) 0,00

Prodondità rispetto p.c. (m) 123,00

Diametro (cm)**Uso**

irriguo

STAZIONE 10CIB


Località

Ca' Buina Longhella

Comune

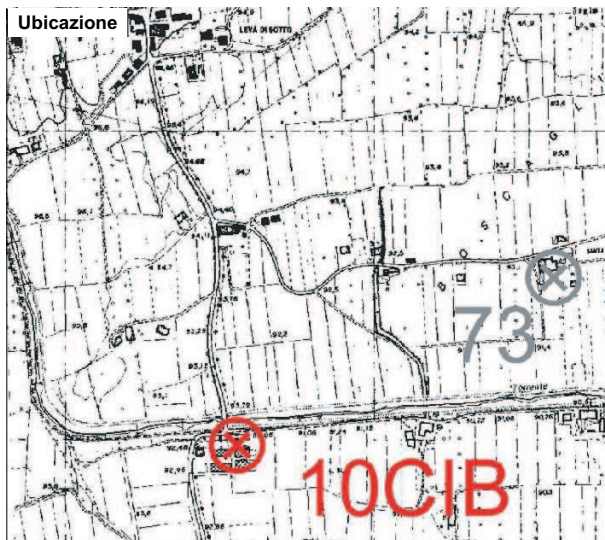
Marostica

Indirizzo

Via Ca' Buina, 1

Coordinata G. Boaga X 1707774,7

Coordinata G. Boaga Y 5068505,3

**Quota assoluta bocca pozzo
(m s.l.m.m.)** 91,85

Profondità rispetto b.p. (m) 30,20

Altezza b.p. rispetto al p.c. (m) 0,00

Profondità rispetto p.c. (m) 30,20

Diametro (cm) 100

Uso

aziendale

STAZIONE 17CIB



Località	
Boschi	
Comune	
Carmignano	
Indirizzo	
Via Maglio	
Coordinata G. Boaga X	1711751,0
Coordinata G. Boaga Y	5057173,2
Quota assoluta bocca pozzo (m s.l.m.m.)	45,00



Profondità rispetto b.p. (m)	6,00
Altezza b.p. rispetto al p.c. (m)	0,00
Prodondità rispetto p.c. (m)	6,00
Diametro (cm)	300
Uso	-

STAZIONE 27


Località

Case Gelain

Comune

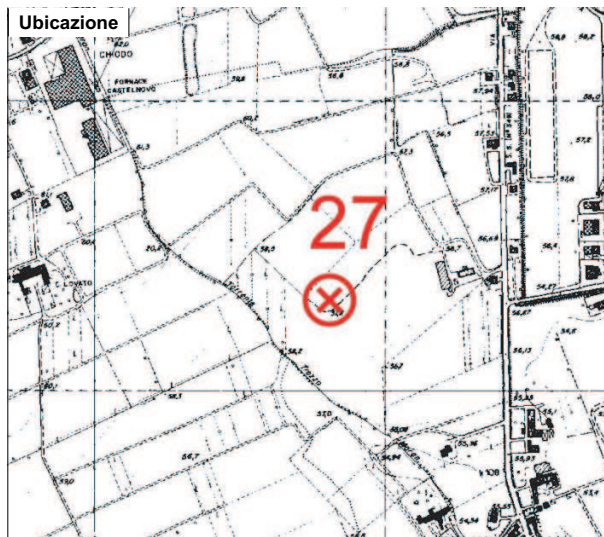
Caldogno

Indirizzo

Via Altura Paradiso, 21

Coordinata G. Boaga X 1693905,5

Coordinata G. Boaga Y 5054153,3

**Quota assoluta bocca pozzo
(m s.l.m.m.)** 57,52

Profondità rispetto b.p. (m) 12,00

Altezza b.p. rispetto al p.c. (m) 0,75

Profondità rispetto p.c. (m) 11,25

Diametro (cm) 100

Uso

Monitoraggio falda

STAZIONE 28

**Località**

S. Anastasia

Comune

Zugliano

Indirizzo

Via S. Anastasia, 10

Coordinata G. Boaga X

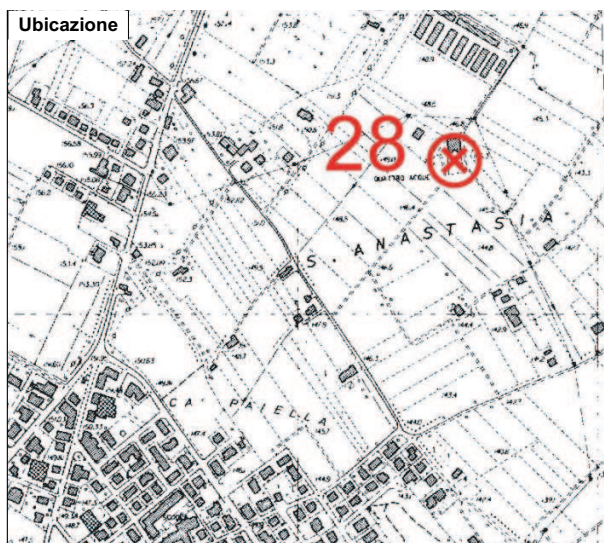
1694260,7

Coordinata G. Boaga Y

5065766,5

**Quota assoluta bocca pozzo
(m s.l.m.m.)**

148,58

**Profondità rispetto b.p. (m)**

29,43

Altezza b.p. rispetto al p.c. (m)

0,95

Profondità rispetto p.c. (m)

28,48

Diametro (cm)

124

Uso

-

STAZIONE 32


Località

Villaverla

Comune

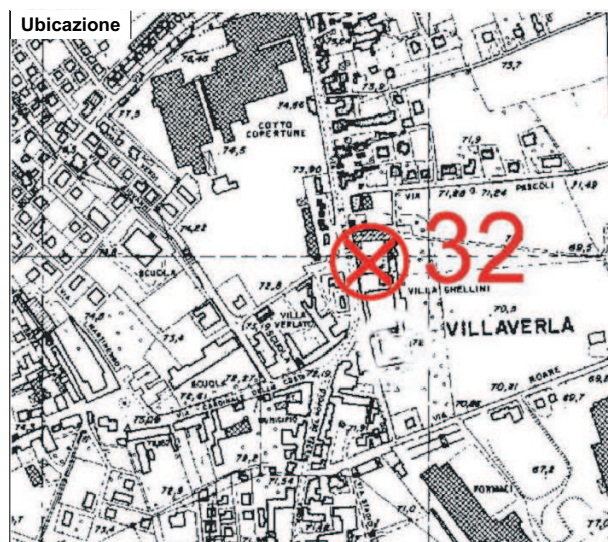
Villaverla

Indirizzo

Via S. Antonio, 18

Coordinata G. Boaga X 1694449,4

Coordinata G. Boaga Y 5058383,5

**Quota assoluta bocca pozzo
(m s.l.m.m.)** 73,79

Profondità rispetto b.p. (m) 21,21

Altezza b.p. rispetto al p.c. (m) 0,75

Profondità rispetto p.c. (m) 20,46

Diametro (cm) 140

Uso

-

STAZIONE 41

**Località**

Maglio-Molle

Comune

Montecchio P.

Indirizzo

Via Maglio, 83

Coordinata G. Boaga X	1698215,1
------------------------------	-----------

Coordinata G. Boaga Y	5062340,4
------------------------------	-----------

Quota assoluta bocca pozzo (m s.l.m.m.)	99,04
--	-------



Profondità rispetto b.p. (m)	34,84
-------------------------------------	-------

Altezza b.p. rispetto al p.c. (m)	0,10
--	------

Prodondità rispetto p.c. (m)	34,74
-------------------------------------	-------

Diametro (cm)	110
----------------------	-----

Uso

-

STAZIONE 48


Località

Olmo

Comune

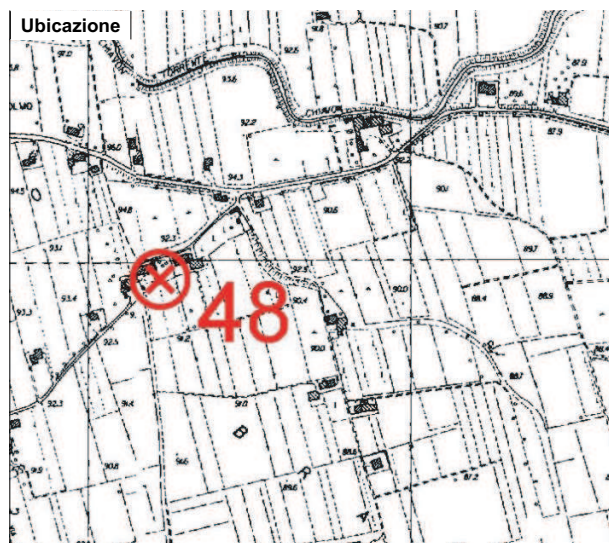
Breganze

Indirizzo

Via DonPrimoMazzolari 4

Coordinata G. Boaga X 1701100,7

Coordinata G. Boaga Y 5063477,3

**Quota assoluta bocca pozzo
(m s.l.m.m.)** 95,18

Profondità rispetto b.p. (m) 33,62

Altezza b.p. rispetto al p.c. (m) 0,00

Profondità rispetto p.c. (m) 33,62

Diametro (cm) 90

Uso

-

STAZIONE 60

**Località**

C. Carli

Comune

Mason Vic.

Indirizzo

Via Colombara, 59

Coordinata G. Boaga X

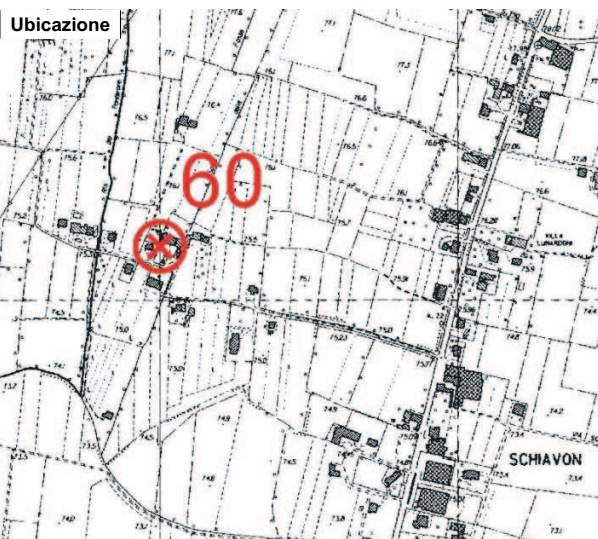
1705379,0

Coordinata G. Boaga Y

5064607,9

**Quota assoluta bocca pozzo
(m s.l.m.m.)**

76,77

**Profondità rispetto b.p. (m)**

17,28

Altezza b.p. rispetto al p.c. (m)

0,65

Profondità rispetto p.c. (m)

16,63

Diametro (cm)

100

Uso

-

STAZIONE 70

**Località**

Mura Alta

Comune

Nove

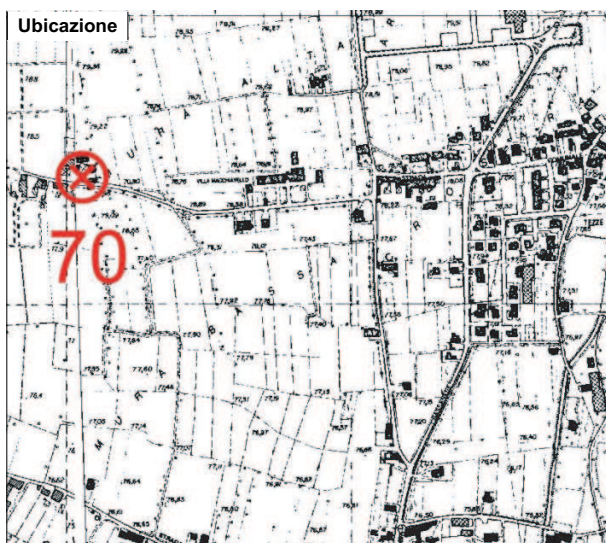
Indirizzo

Via Mura

Coordinata G. Boaga X 1707534,7

Coordinata G. Boaga Y 5065228,5

**Quota assoluta bocca pozzo
(m s.l.m.)** 78,90



Profondità rispetto b.p. (m) 22,00

Altezza b.p. rispetto al p.c. (m) 0,52

Profondità rispetto p.c. (m) 21,48

Diametro (cm) 130

Uso

-

STAZIONE 72


Località

Case Rigoni

Comune

Pozzoleone

Indirizzo

Via S. Carlo, 16

Coordinata G. Boaga X

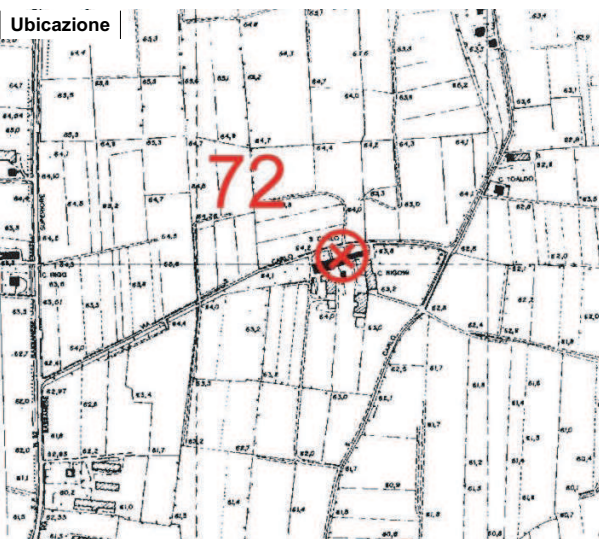
1708245,6

Coordinata G. Boaga Y

5061024,9

**Quota assoluta bocca pozzo
(m s.l.m.m.)**

65,02


Profondità rispetto b.p. (m)

11,50

Altezza b.p. rispetto al p.c. (m)

0,70

Profondità rispetto p.c. (m)

10,80

Diametro (cm)

70

Uso

-

STAZIONE AVS_M

**Località**

Marano

Comune

Marano

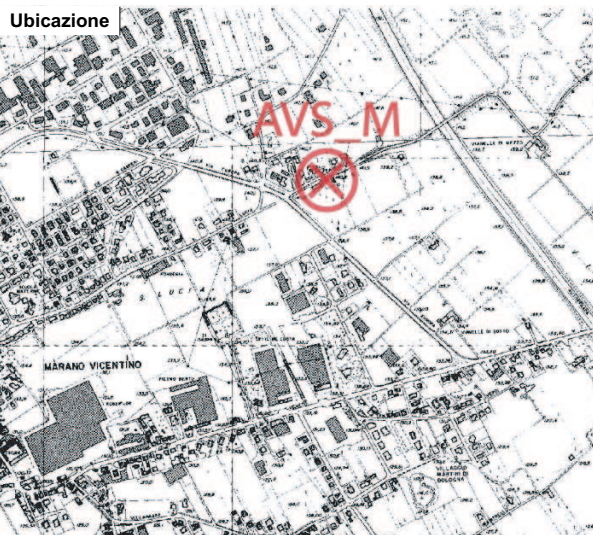
Indirizzo

Via Cappuccini (Pozzo)

Coordinata G. Boaga X 1690245,0

Coordinata G. Boaga Y 5063442,0

**Quota assoluta bocca pozzo
(m s.l.m.m.)** 140,80



Profondità rispetto b.p. (m) 104,00

Altezza b.p. rispetto al p.c. (m) 0,30

Profondità rispetto p.c. (m) 103,70

Diametro (cm) 100

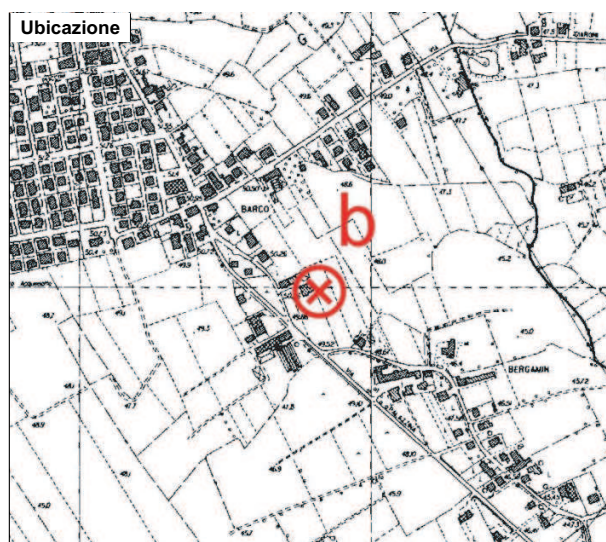
Uso

rar. Acquedottistico

STAZIONE b



Località	
Barco	
Comune	
Caldogno	
Indirizzo	
Via Barco, 97	
Coordinata G. Boaga X	1695911,3
Coordinata G. Boaga Y	5053511,5
Quota assoluta bocca pozzo (m s.l.m.m.)	49,71



Profondità rispetto b.p. (m)	6,02
Altezza b.p. rispetto al p.c. (m)	0,30
Prodondità rispetto p.c. (m)	5,72
Diametro (cm)	100
Uso	-

STAZIONE Q


Località

C. Dal Santo

Comune

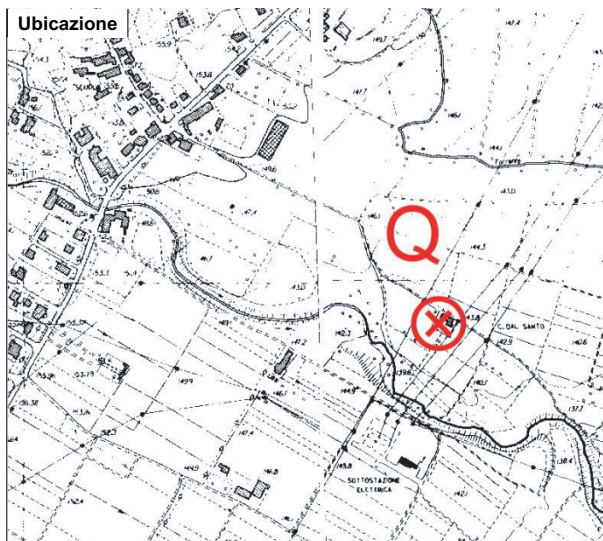
Zugliano

Indirizzo

Via Cavaion, 6

Coordinata G. Boaga X 1694696,1

Coordinata G. Boaga Y 5066430,7

**Quota assoluta bocca pozzo
(m s.l.m.m.)** 144,96

Profondità rispetto b.p. (m) 8,53

Altezza b.p. rispetto al p.c. (m) 0,92

Profondità rispetto p.c. (m) 7,61

Diametro (cm) 100

Uso

-

Appendice B: Modello accoppiato di evapotraspirazione e infiltrazione

B.1 Telerilevamento ed uso del suolo

B.1.1 Introduzione

Il Telerilevamento si può definire come l'insieme di tecniche, strumenti e mezzi interpretativi che permettono di determinare le caratteristiche delle superfici a terra attraverso informazioni mediate delle onde elettromagnetiche da esse riflesse od emesse. Queste tecniche introducono metodi di misura e monitoraggio ambientale di aree le cui dimensioni ne rendono impossibile una caratterizzazione da terra sincrona e spazialmente distribuita. L'indagine sulla natura di superfici poste lontano dall'osservatore per mezzo di onde elettromagnetiche, può avvenire a distanze che variano da qualche metro (*proximal sensing*) fino a migliaia di chilometri (*remote sensing*, e.g. le osservazioni satellitari).

L'acquisizione dei dati telerilevati avviene per mezzo di sensori montati su aerei o satelliti i quali misurano il flusso di energia associato alla radiazione elettromagnetica che le superfici emettono o riflettono. Onde elettromagnetiche sono infatti emesse da qualsiasi corpo, su lunghezze d'onda che dipendono dalla temperatura del corpo stesso e dalle caratteristiche fisiche, chimiche e geometriche della sua superficie. Se si considera un'onda elettromagnetica incidente su una

superficie, essa viene in parte assorbita, in parte trasmessa e in parte riflessa (Figura B-1).

Il rapporto tra il flusso di energia riflessa ed il flusso di energia incidente è strettamente legato alle proprietà chimico-fisiche dell'oggetto. Numerose classi di oggetti o tipologie di superficie possono essere pertanto identificate definendo la loro *firma spettrale*, ovvero la funzione caratteristica che esprime la frazione di flusso radiante (riflettanza) riflessa al variare della lunghezza d'onda. Ad esempio, è rilevante da un punto di vista idrologico essere in grado di mappare spazialmente la presenza di diversi tipi di vegetazione (quali seminativi o vegetazioni ad alto fusto di diverso tipo). Ciò può ottenersi osservando che la firma spettrale della vegetazione presenta caratteri tipici che dipendono dal contenuto e dal tipo di clorofilla (la quale assorbe fortemente negli intervalli del rosso e del blu, mentre riflette nel campo del verde) e dalla struttura fogliare. E' possibile dunque, come si vedrà in seguito, discriminare, per mezzo del telerilevamento, diverse specie vegetali, come anche seguirne il loro ciclo vegetativo (le foglie appaiono più verdi in primavera-estate quando il contenuto di clorofilla è maggiore, mentre nel periodo di senescenza autunnale si riduce l'assorbimento nelle bande spettrali del rosso). Anche la risposta spettrale dell'acqua, un'altra tipologia superficiale di interesse idrologico, risulta riconoscibile attraverso il telerilevamento, in quanto caratterizzata da un assorbimento accentuato per le lunghezze d'onda maggiori del visibile e del vicino infrarosso.

Da questi esempi si deduce dunque che, misurando l'energia che viene riflessa dalla superficie terrestre in corrispondenza a diverse lunghezze d'onda (Tabella B-1 e Figura B-2) si può costruire la risposta spettrale dei diversi oggetti presenti nella scena di ripresa e, per mezzo di questa, si può inferire la natura delle superfici che la compongono.

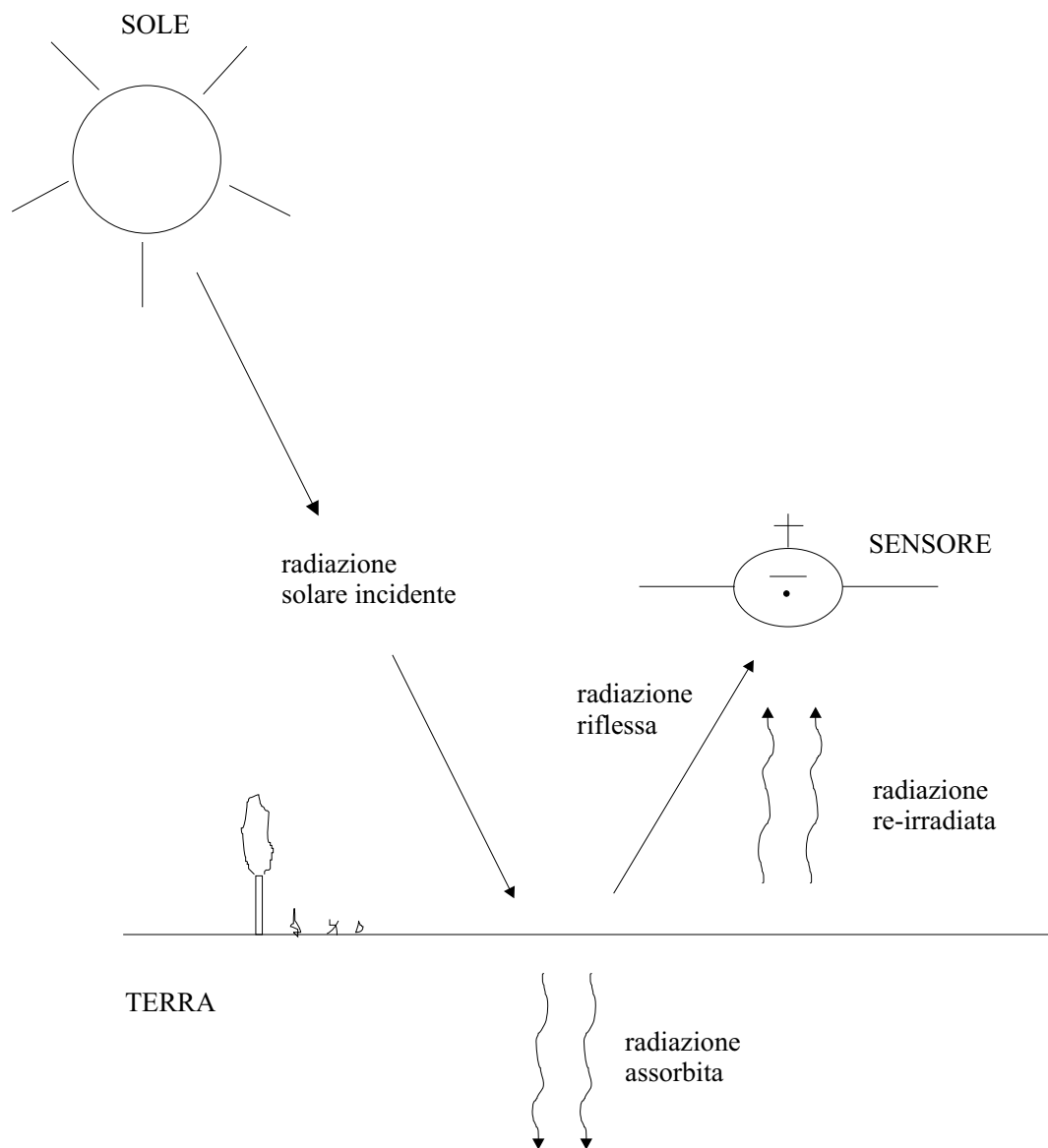


Figura B-1: *Schema della radiazione osservata da un sensore.*

Regione dello spettro	Limiti
Raggi gamma	$< 0.03 \text{ nm}$
Raggi X	$0.03 \div 300 \text{ nm}$
Ultravioletto	$0.30 \div 0.38 \mu\text{m}$
Visibile	$0.38 \div 0.72 \mu\text{m}$
Radiazione infrarossa	
Vicino infrarosso	$0.72 \div 1.30 \mu\text{m}$
Medio infrarosso	$1.30 \div 3.00 \mu\text{m}$
Lontano infrarosso	$3.00 \div 1000 \mu\text{m} (1 \text{ mm})$
Microonde	$1 \text{ mm} \div 30 \text{ cm}$
Onde radio	$\geq 30 \text{ cm}$

Tabella B-1: *Principali intervalli dello spettro elettromagnetico.*

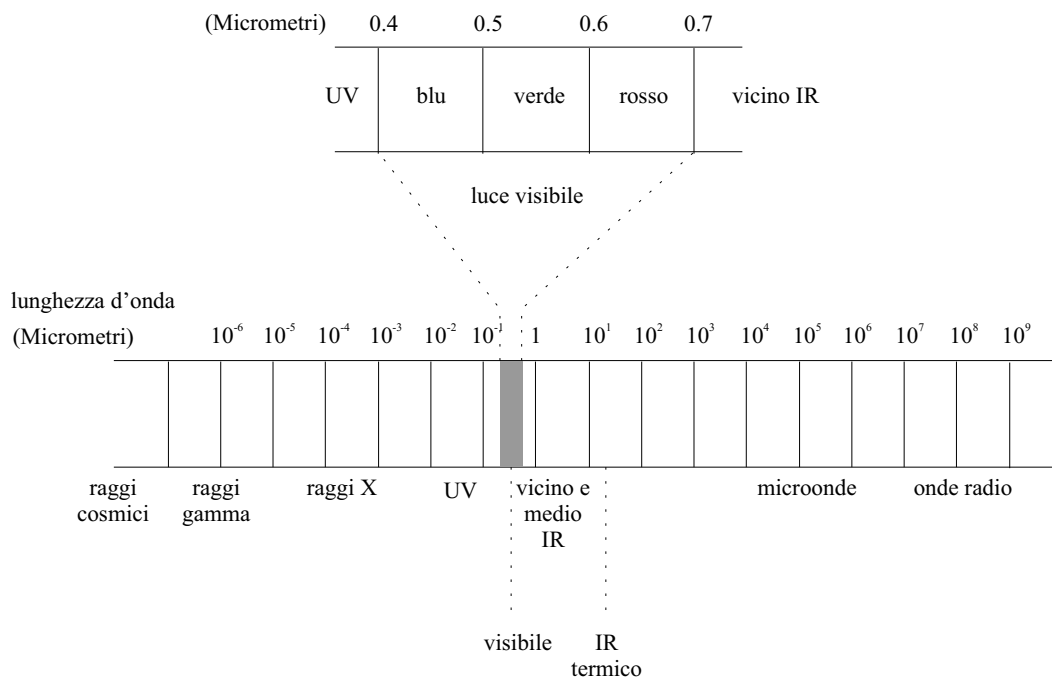


Figura B-2: *Spettro elettromagnetico.*

B.1.2 I sensori per il telerilevamento

Molti dei sensori ideati per le osservazioni ed il monitoraggio ambientali, cui si farà riferimento nel seguito, sono di tipo passivo, ovvero misurano la radiazione solare riflessa dalle superfici e dai corpi presenti al suolo in un insieme discreto di intervalli di lunghezze d'onda (*bande*) nel campo del visibile e del vicino infrarosso. Per ogni elemento (*pixel*) della scena acquisita il sensore fornisce dunque il valore del flusso radiativo osservato (e.g. misurato in termini di 'radianza', ovvero flusso di energia per unità di superficie ed unità di angolo solido in funzione della frequenza centrale di ogni banda di acquisizione (cfr. Figura B-3). I dati telerilevati così ottenuti sono caratterizzati da risoluzioni che definiscono l'accuratezza con la quale sono rappresentate le informazioni da un punto di vista spaziale, spettrale e radiometrico. La risoluzione geometrica è definita dalle dimensioni dell'area elementare al suolo (i.e. il pixel) sulla quale è misurato il flusso medio di energia riflessa. La risoluzione spettrale è legata all'ampiezza delle bande nelle quali sono discretizzati gli spettri rilevati. La risoluzione radiometrica è data dall'accuratezza con la quale viene rappresentata la misura del flusso di energia in forma digitale. Questa rappresentazione avviene per mezzo di un numero intero, *Digital Number* (DN), di lunghezza prefissata (ad esempio 8 bit, come nel caso del Landsat 5).

Il sensore Thematic Mapper

Nel presente lavoro si sono utilizzati i dati acquisiti dal sensore satellitare Thematic Mapper a bordo del satellite Landsat 5 che fornisce una risoluzione geometrica al suolo di 30 m ed una risoluzione radiometrica di 7 bande nello spettro visibile ed infrarosso. La buona risoluzione radiometrica consente di esaltare alcune caratteristiche particolari della superficie, che differenziano gli oggetti presenti, associandole ad ognuno dei colori di una rappresentazione policroma.

Il satellite Landsat 5 è stato lanciato il primo marzo del 1984 e sorvola la terra a 750 km di distanza, percorrendo un'orbita quasi polare ed eliosincrona di 98° con un tempo di ciclo di copertura che dura 16 giorni. Il sistema di ripresa

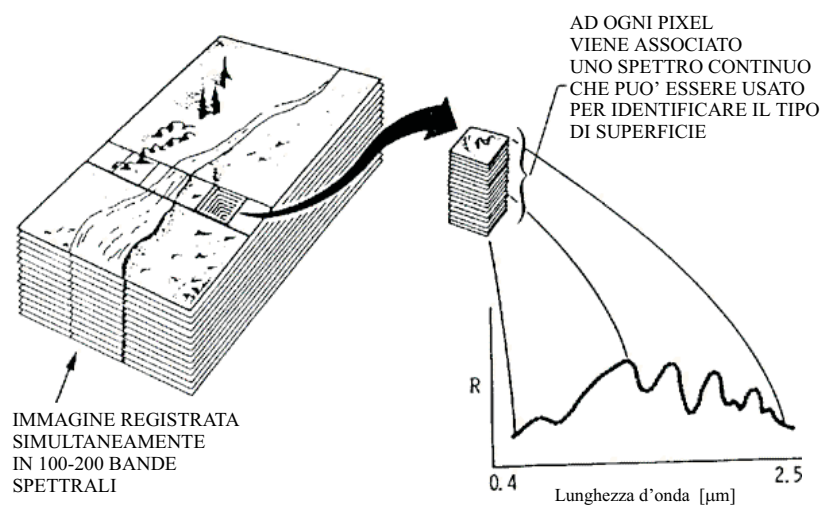


Figura B-3: *Esempio di spettro relativo ad pixel di un'immagine.*

Thematic Mapper esegue una scansione della superficie in 7 diverse bande dello spettro elettromagnetico: la Banda 1 corrispondente al blu ($0,45 - 0,52\mu\text{m}$), la 2 corrispondente al verde ($0,52 - 0,60\mu\text{m}$), la 3 corrispondente al rosso ($0,62 - 0,69\mu\text{m}$), la 4 relativa all'infrarosso vicino ($0,76 - 0,90\mu\text{m}$), la 5 relativa al primo infrarosso medio ($1,55 - 1,75\mu\text{m}$), la 6 relativa all'infrarosso termico ($10,4 - 12,5\mu\text{m}$), la 7 relativa al secondo infrarosso medio ($2,08 - 2,35\mu\text{m}$); la risoluzione geometrica al suolo nelle bande 1-5 e 7 è di 30 metri, mentre nella banda 6 (termica) è di 120 m; l'ampiezza della striscia di ripresa al suolo è di 185 km.

Nel 1999 è diventato operativo il Landsat 7, che monta un sistema di ripresa migliorato (Enhanced Thematic Mapper Plus, ETM+), con il quale risulta disponibile una ottava banda pancromatica con 15 m di risoluzione al suolo, mentre la banda 6 presenta una risoluzione geometrica migliorata a 60 m; le sue caratteristiche orbitali sono le medesime del LS5, rispetto al quale ha una sfasatura di volo di 8 giorni.

L'immagine di cui ci siamo serviti è stata acquisita il 14 settembre 1999 dal satellite LS5 e comprende tutta la regione Veneto e parte del Trentino Alto Adige e del Friuli Venezia Giulia (Fig. B-4).



Figura B-4: *Rappresentazione a colori quasi naturali dei dati Landsat 5.*

B.1.3 L'elaborazione dei dati telerilevati

L'utilizzo di dati telerilevati per mappature ambientali quantitative ed affidabili è normalmente preceduto da alcune elaborazioni intese ad eliminare le inaccuratezze indotte dalle inevitabili incertezze di osservazione e dalle interferenze atmosferiche. La procedura di elaborazione spesso prevede i seguenti passi:

1. Calibrazione radiometrica;
2. Correzione atmosferica;
3. Correzione geometrica;
4. Georeferenziazione;
5. Confronto dei dati satellitari con informazioni ancillari a terra.

Calibrazione radiometrica

La calibrazione radiometrica dei dati è necessaria al fine di trasformare i dati acquisiti dal sensore remoto in forma di Digital Number in forma di flusso di energia. Le funzioni di trasformazione necessarie alle procedure di calibrazione radiometrica sono dipendenti dal sensore da cui l'immagine è stata acquisita e dal momento dell'acquisizione e sono normalmente forniti contestualmente ai dati.

Correzione atmosferica

Le onde elettromagnetiche che giungono al suolo interagiscono con l'atmosfera terrestre, ed in modo particolare con i gas (anidride carbonica, ossigeno, ozono, ecc.), il vapor d'acqua e le polveri fini che in essa si trovano (Figura B-5). Questa interazione dipende sia dalla lunghezza del percorso che l'onda compie prima di giungere al sensore, sia dalle condizioni atmosferiche al momento dell'osservazione.

I processi di interazione radiativa in atmosfera di principale interesse ai fini del telerilevamento sono lo *scattering* e l'*assorbimento*.

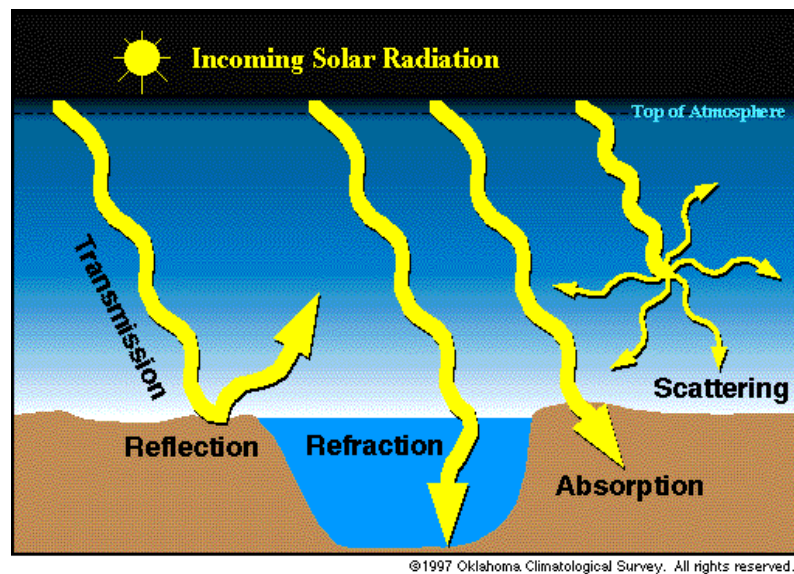


Figura B-5: Schematizzazione delle interazioni tra raggio luminoso e atmosfera e tra raggio luminoso e superficie terrestre

Il fenomeno dello scattering si verifica per interazione delle particelle fini o gassose dell'atmosfera con la radiazione elettromagnetica, che produce la diffusione delle onde elettromagnetiche stesse (cfr. Figura B-5). Questo fenomeno dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione (un'onda elettromagnetica può interagire con un particella quando la sua lunghezza d'onda sia paragonabile alle dimensioni caratteristiche di questa). L'effetto di scattering, per quanto riguarda l'acquisizione di immagini telerilevate, si traduce in un minore contrasto degli oggetti a terra perchè alla loro radianza $i_{\lambda,\beta,\phi}$ va a sommarsi quella dovuta alla diffusione atmosferica $i_{\lambda,\beta,\phi}^s$ ma anche quella riflessa dalle superfici circostanti $i_{\lambda,\beta,\phi}^l$, che, per effetto di scattering multiplo, giungono al sensore (Figura B-6). La radianza osservata dal sensore $i_{\lambda,\beta,\phi}^r$ risulta dunque dal contributo di componenti multiple:

$$i_{\lambda,\beta,\phi}^r = i_{\lambda,\beta,\phi} + i_{\lambda,\beta,\phi}^s + i_{\lambda,\beta,\phi}^l. \quad (6)$$

L'assorbimento si verifica per interazione della radiazione elettromagnetica con i gas presenti in atmosfera. Questi sono in grado di assorbire parte del-

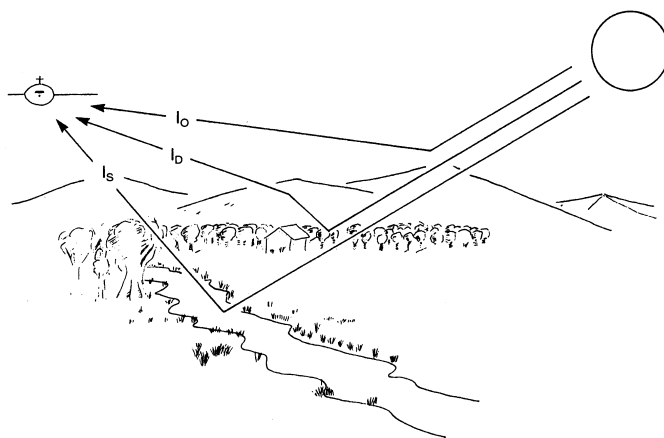


Figura B-6: Schematizzazione delle interazioni tra la radiazione elettromagnetica, l'atmosfera e il bersaglio. I_0 è l'energia che arriva al sensore per effetto di scattering atmosferico, I_S l'energia riflessa dal bersaglio che arriva direttamente al sensore, I_D l'energia che arriva al sensore per effetto di scattering dell'energia riflessa da altri corpi presenti sulla scena.

l'energia elettromagnetica che li attraversa per poi rimetterla sotto forma di energia radiante con lunghezza d'onda maggiore (nell'intervallo dell'infrarosso termico). La trasmittanza, $\tau_{\lambda,\beta,\phi}$, frazione dell'energia incidente che emerge dal gas, è funzione della lunghezza d'onda, come evidenziato anche in Figura B-7.

I modelli di correzione atmosferica tengono conto dei processi di trasferimento radiativo sommariamente descritti e possono essere applicati a dati telerilevati per ridurne o rimuoverne gli effetti. Questi modelli trasformano, tipicamente, i dati di radianza in dati di riflettanza, indipendenti, quindi, dalle particolari condizioni atmosferiche al momento dell'osservazione. La correzione atmosferica rende quindi gli spettri rilevati in remoto confrontabili con spettri rilevati in loco da strumenti portatili, e con quelli rilevati da altri sensori remoti in diverse condizioni. L'operazione può inoltre permettere di creare una libreria spettrale che, definite le caratteristiche fisiche delle tipologie di superficie di interesse, ne raccoglie le firme spettrali. Tale libreria può essere quindi usata per il riconoscimento dei bersagli all'interno di immagini raccolte nella stessa area geografica

ma in tempi diversi, oppure su aree geografiche diverse ma dove vi siano target analoghi.

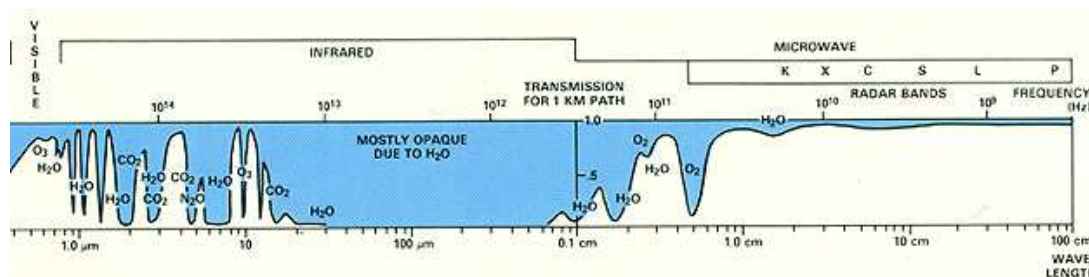


Figura B-7: *Andamento del coefficiente di trasmissione della radiazione elettromagnetica in atmosfera in funzione della lunghezza d'onda espressa in μm .*

Correzione geometrica

La correzione geometrica si rende necessaria per correggere deformazioni dovute a variazioni nelle condizioni di ripresa o alle caratteristiche delle ottiche impiegate per l'osservazione. È assolutamente necessaria nel caso di dati acquisiti da sensori aerei, a causa delle frequenti ed inevitabili oscillazioni di assetto dell'aeromobile, mentre è solitamente già effettuata dalle agenzie di gestione dei sensori satellitari prima della consegna del dato.

Georeferenziazione

La georeferenziazione è la procedura con la quale si effettua una precisa collocazione geografica dei dati telerilevati sulla base di una cartografia accurata dell'area di interesse utilizzando un sistema di coordinate metrico, (e.g. solitamente le Carte Tecniche Regionali in coordinate Gauss-Boaga). La georeferenziazione avviene tramite l'identificazione di un adeguato numero di punti notevoli (GCP: *Ground Control Points*) nell'immagine telerilevata dei quali siano note le coordinate nella cartografia di riferimento. L'immagine da georeferenziare viene quindi deformata secondo funzioni predefinite in modo da minimizzare la somma

delle differenze quadratiche tra i valori delle coordinate dei GCP assunti dopo la deformazione e i valori delle coordinate degli stessi punti nella cartografia di riferimento.

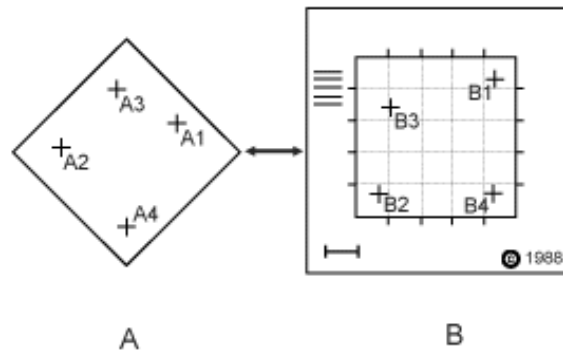


Figura B-8: *Georeferenziazione.*

Una volta deformata l'immagine, ovvero ridefinita la posizione di ciascun pixel, il problema diviene quello di decidere come meglio stimare i valori di radianza da attribuire a ciascuno dei nuovi pixel. La scelta più immediata, e qui utilizzata, consiste nell'attribuire ad ogni pixel della nuova configurazione il valore del più vicino pixel nell'immagine prima della deformazione. Questo metodo, detto del 'più prossimo vicino', ha il vantaggio di preservare i valori originali di radianza della scena acquisita. Altri metodi calcolano i valori di radianza del pixel corretto come media pesata dei pixel non corretti vicini, ma presentano lo svantaggio di non conservare i valori di radianza dell'immagine acquisita inizialmente, con possibili effetti negativi sui successivi passi di elaborazione dell'immagine.

Nel presente lavoro si è scelto di utilizzare il metodo del Nearest Neighbor e si sono utilizzate come verità a terra le Ortofoto dell'Atlante Italiano che consistono nell'interpretazione a video di 105 fotogrammi aerei, corrispondenti ai fogli della Carta Tecnica Regionale in scala 1 : 10.000, a colori e ad 1 metro di risoluzione spaziale, con date di ripresa comprese tra il 1998 e il 1999. In Figura B-9 è mostrato il risultato della georeferenziazione dell'immagine Landsat 5.

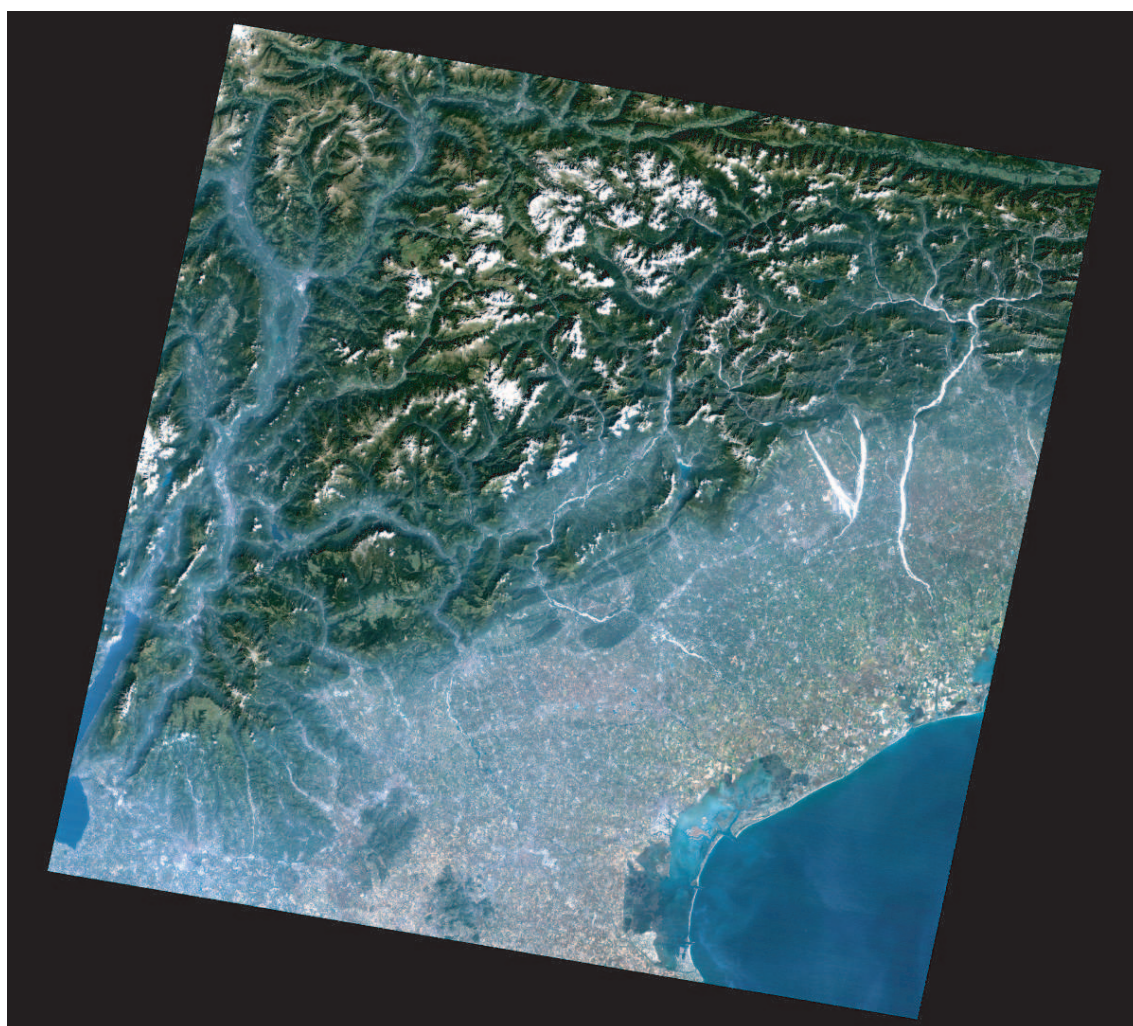


Figura B-9: Rappresentazione a colori quasi naturali dei dati Landsat TM dopo la georeferenziazione.

B.1.4 La classificazione dell'immagine

Lo classificazione di un insieme di dati telerilevati è una procedura che consente di raggruppare in insiemi con caratteristiche fisiche omogenee (classi) i diversi elementi presenti nella scena di interesse, creando una carta tematica che descriva la variabilità spaziale delle caratteristiche al suolo rilevanti. È importante notare che per effettuare un riconoscimento affidabile delle diverse superfici presenti non è sufficiente la mera applicazione di algoritmi per la loro discriminazione, ma è necessaria una diretta conoscenza dell'area analizzata. È quindi importante lo svolgimento di uno studio preliminare a terra delle caratteristiche dell'area di osservazione, in particolare determinando quali siano le classi rilevanti per l'applicazione di interesse e se queste siano spettralmente discriminabili.

Le procedure di classificazione possono essere suddivise in due principali tipologie:

1. *Classificazione controllata*: la Classificazione controllata può essere definita come il processo attraverso il quale si assegnano ad una classe di appartenenza i pixel incogniti dell'immagine in base alla somiglianza delle loro caratteristiche spettrali con quelle di zone di riferimento, o ROI (Region Of Interest), che rappresentano ciascuna una classe di interesse. Le ROI sono operativamente costituite da insiemi di pixel, le cui caratteristiche fisiche a terra sono note, selezionati all'interno della scena sulla base della conoscenza diretta del territorio (Figura B-10). La scelta oculata delle ROI ha riflessi decisivi sul risultato della classificazione e deve basarsi su informazioni certe.

I vantaggi principali della classificazione guidata possono essere così riassunti:

- l'operatore ha il massimo controllo sulle classi d'informazione da analizzare, stabilendo a priori le loro caratteristiche, ed il loro numero;
- il risultato della classificazione produce direttamente una partizione del territorio nelle classi di uso del suolo di interesse;

- l'operatore può rendersi facilmente conto di eventuali problemi nella discriminazione di alcune classi verificando la corretta classificazione delle ROI selezionate.

Gli svantaggi e le limitazioni della classificazione controllata sono invece:

- l'operatore impone a priori una divisione in classi che può, in mancanza di una completa conoscenza del territorio, essere inadeguata alla descrizione dell'area in esame; all'interno di una stessa classe potrebbero infatti nascondersi caratteristiche di più classi di interesse aventi caratteristiche spettrali simili;
- le ROI sono spesso scelte in base alla loro rappresentatività della categoria di interesse senza considerarne l'uniformità nelle caratteristiche spettrali. Un'unica ROI rappresentativa di una foresta, ad esempio, è insufficiente a caratterizzare completamente questa categoria perché al suo interno vi sono molteplici specie vegetali con diverse firme spettrali. Si rende necessaria perciò, un'adeguata conoscenza delle caratteristiche spettrali delle classi di interesse;
- la selezione di una ROI rappresentativa di una classe di interesse che risulti infrequente all'interno dell'area o che occupi zone di piccola estensione (rispetto alla dimensione del pixel) può risultare difficoltosa od imprecisa.

La scelta delle aree di riferimento è, come si è detto, il passo più importante della classificazione controllata. Le ROI selezionate per ciascuna categoria devono essere il più possibile rappresentative ed è quindi necessario che siano sufficientemente estese, distribuite nell'immagine e che mostrino una sufficiente uniformità spettrale. Per quanto riguarda le dimensioni, è importante che ciascuna ROI non sia troppo piccola, affinché sia statisticamente significativa, e che non sia troppo grande, affinché le caratteristiche spettrali della categoria di interesse non siano mescolate con quelle di altre categorie confinanti. L'esperienza indica che è da preferire una scelta di

numerose ROI di dimensioni ridotte, piuttosto che poche ROI di grandi dimensioni.

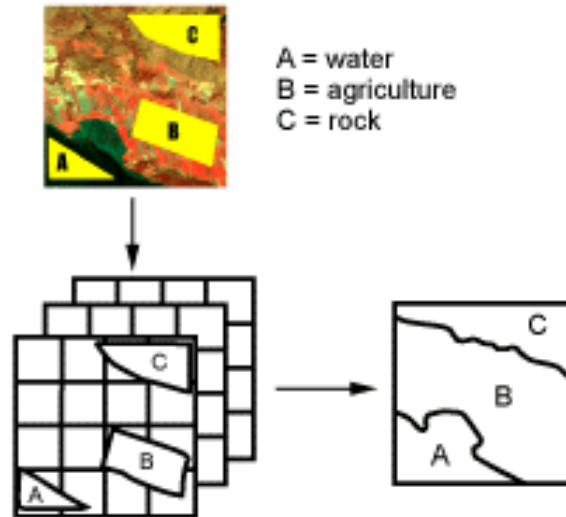


Figura B-10: *Supervised classification.*

2. *Classificazione non controllata* : è il processo inverso al precedente. Le classi spettrali sono inizialmente raggruppate unicamente sulla base della somiglianza tra le loro caratteristiche spettrali e solo in seguito sono raggruppate dall'utente in classi di informazione rilevanti dal punto di vista fisico (Figura B-11). Solitamente si indica preliminarmente quanti siano i gruppi o famiglie da individuare e si specificano alcuni parametri spettrali in relazione alla distanza di separazione e alla variabilità tra le varie aree. Il processo di classificazione è di solito iterativo, raggruppando progressivamente i pixel nel numero di classi stabilito. Al termine dell'aggregazione dei pixel in gruppi, l'intervento dell'operatore è richiesto per riconoscere il significato fisico (qualora esista) delle classi determinate sulla base della sola somiglianza spettrale. La classificazione non controllata non è quindi priva di intervento umano, ma ha il vantaggio di non richiedere a priori la specificazione di un insieme di classi predeterminate.

Il funzionamento dell'algoritmo che implementa l'Unsupervised Classification,

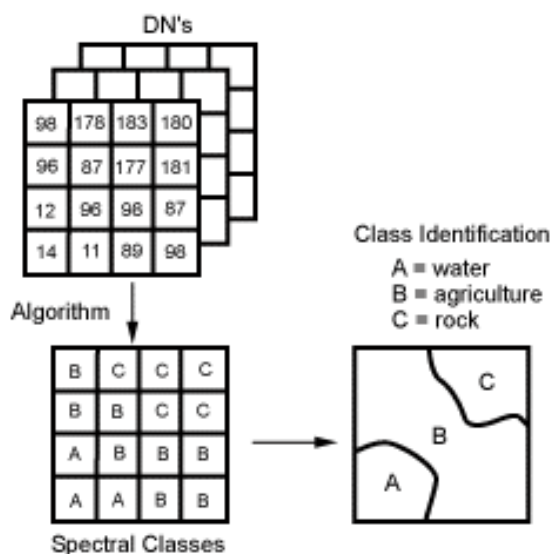


Figura B-11: *Classificazione non controllata.*

come per esempio l'algoritmo **K-means**, è semplice da spiegare. I dati relativi alla radianza o riflettanza di tutti i pixel possono essere riportati in quello che viene chiamato *scatter plot*: un grafico generato nell'iperspazio delle bande di registrazione dove le coordinate di ogni punto rappresentano i valori di radianza o riflettanza per ogni banda.

Per quanto riguarda la classificazione di tipo controllato, i metodi maggiormente utilizzati sono l'algoritmo dell'*Angolo spettrale* ("*Spectral Angle Mapper*", *SAM*) e l'algoritmo della *Massima verosimiglianza* (*maximum likelihood*) [9].

Algoritmo dell'Angolo spettrale

Si consideri il caso di un'immagine nella quale le informazioni spettrali siano contenute in due bande spettrali. Lo spettro di un generico pixel può rappresentarsi come un vettore in un diagramma cartesiano in cui gli assi esprimono i valori di radianza per ciascuna banda. Il metodo SAM considera gli spettri medi di ogni ROI come rappresentativi delle diverse classi e ne calcola il vettore corrispondente nello spazio delle bande. Un pixel incognito viene quindi clas-

sificato confrontandone lo spettro con quello rappresentativo di ciascuna delle classi di interesse per mezzo dell'angolo (spettrale) compreso tra i due vettori nello spazio delle bande. La classe di appartenenza del pixel incognito viene determinata identificando l'angolo minimo tra tutti quelli calcolati. Il pixel resta, invece, non classificato se le distanze angolari dai vettori rappresentativi delle diverse classi risultano tutte superiori ad una soglia fissata, che viene determinata per calibrazione. Nella Figura B-12 è rappresentato l'angolo spettrale nel caso esemplificativo di due sole bande. Considerato il caso generale di n bande, l'angolo spettrale è semplicemente definito considerando il prodotto scalare tra due vettori, $\vec{u} \cdot \vec{v}$:

$$\vec{u} \cdot \vec{v} = \sum_{i=1}^n (u_i v_i) = uv \cos \alpha \quad (7)$$

dove u_i e v_i sono le componenti dei due vettori nell'iperspazio delle bande, mentre u e v sono i moduli dei vettori stessi. Dalla 7 si ottiene facilmente l'angolo spettrale α :

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\sum_{i=1}^n (u_i v_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n v_i^2}} \right) \quad (8)$$

Il vantaggio più rilevante del metodo SAM è che esso può produrre risultati corretti anche quando sia applicato ad una scena non uniformemente illuminata o nella quale gli effetti atmosferici siano fortemente variabili nello spazio. L'angolo formato da due spettri della medesima categoria e relativi a diverse condizioni di illuminazione è infatti nullo, nella misura in cui si possa assumere che le condizioni di illuminazione condizionino unicamente il flusso di energia totale incidente e riflessa e dunque solo il modulo dei vettori in questione.

Algoritmo della massima verosimiglianza

Il classificatore di massima verosimiglianza si basa sulla definizione della probabilità che il pixel che si intende classificare appartenga alla i -esima classe C_i , condizionata al fatto che il suo spettro sia \mathbf{x} (vettore n -dimensionale avente come

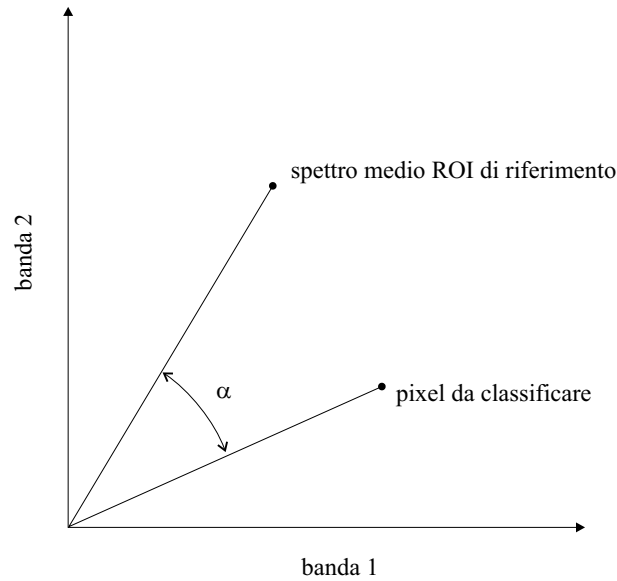


Figura B-12: Spazio generato da due bande di acquisizione: α angolo spettrale (SAM) tra lo spettro medio di una classe e quello del pixel da classificare.

componenti i valori di radianza o riflettanza osservati nel pixel considerato). Indicata con $P[C_i|\mathbf{x}]$ tale probabilità, il classificatore assegnerà il pixel alla classe per la quale essa risulta massima. Tramite la definizione Bayesiana di probabilità condizionale è possibile esprimere la $P[C_i|\mathbf{x}]$ nel modo seguente:

$$P[C_i|\mathbf{x}] = \frac{f[\mathbf{x}|C_i]P[C_i]}{f(\mathbf{x})} \quad (9)$$

dove $P[C_i]$ è la probabilità della classe i -esima, $f(\mathbf{x})$ è la densità di probabilità dello spettro \mathbf{x} indipendentemente dalla classe di appartenenza, mentre $f[\mathbf{x}|C_i]$ è la densità di probabilità dello spettro \mathbf{x} condizionata, per gli spettri provenienti dalla classe i -esima. La classificazione procede attraverso il calcolo della probabilità (9) per tutte le classi e determinando la classe C_k per la quale essa è massima. Poichè dunque il denominatore della (9) è uguale qualsiasi sia la classe considerata, il suo calcolo può essere tralasciato. La densità di probabilità condizionata $f[\mathbf{x}|C_i]$ può essere stimata se si dispone di campioni degli spettri provenienti da ciascuna classe: a tale scopo devono essere individuate nella scena

delle aree campione il cui uso del suolo sia noto. La $f[\mathbf{x}|C_i]$ viene solitamente assunta essere Gaussiana (multivariata) e diviene possibile, utilizzando gli spettri dei pixel appartenenti a tali aree, stimare i parametri che la definiscono (ad es. con il metodo dei momenti) fornendone la forma analitica necessaria all'utilizzo della (9). Per quanto riguarda i termini $P[C_i]$, spesso indicati col nome di *pesi bayesiani*, essi rappresentano la probabilità che, scelto un pixel a caso nell'immagine, esso appartenga alla classe C_i . Tali probabilità non sono note a priori e spesso vengono supposte uguali e pari all'unità. In alternativa, essendo disponibile da parte dell'operatore una conoscenza a priori della zona, è possibile assegnare dei valori a tali pesi che riflettano un'approssimativa distribuzione degli usi del suolo.

La matrice di confusione

Una volta eseguita la procedura di classificazione è necessario determinare una misura degli errori commessi ovvero valutare la possibilità di errate assegnazioni dei pixel alle diverse classi. Un primo tipo di errore è commesso in quei casi in cui un pixel non può essere assegnato dal classificatore ad alcuna classe. Se tale errore avviene in un gran numero di casi può indicare che esistono nella scena ulteriori classi che non sono state prese in considerazione.

Gli errori di maggior interesse sono quelli di commissione ed omissione. Si ha un errore di omissione quando un pixel appartenente alla generica classe j non viene ad essa assegnato. Un errore di commissione si verifica invece quando un pixel non appartenente alla classe j viene ad essa assegnato. Un modo comune per rappresentare i diversi tipi di errore è rappresentato dalla **matrice di confusione**:

- gli elementi delle colonne j di tale matrice, indicano il numero di pixel appartenenti alla classe j , che il metodo di classificazione assegna alle diverse classi, ciascuna rappresentata da una riga;
- l'elemento j della colonna j (cioè l'elemento diagonale) indica il numero di

pixel appartenenti alla classe j che sono stati correttamente assegnati dal classificatore alla classe j di riferimento. I rimanenti elementi della colonna j indicano il numero di pixel della stessa classe j che sono stati assegnati in maniera errata dal classificatore ad altre classi.

Per la costruzione della matrice di confusione vengono individuate delle aree di validazione, distinte dalle aree di interesse utilizzate per la classificazione, aventi caratteristiche note.

Si possono definire alcuni indici che, sulla base della matrice di confusione, danno un'indicazione generale sul grado di correttezza della classificazione. Questi indici vanno considerati non in maniera assoluta, ma solo allo scopo di confrontare diversi metodi di classificazione per i quali si utilizzano le medesime aree di riferimento e le stesse aree di validazione.

I due indici più utilizzati sono l'**accuratezza della classificazione** (A) e il **coefficiente kappa** (K) e vengono così definiti:

$$\text{accuratezza della classificazione:} \quad A = \frac{\sum_{i=1}^r c_{ii}}{N} \quad (10)$$

dove c_{ii} sono gli elementi diagonali della matrice quadrata di confusione, r la sua dimensione e N il numero complessivo di pixel di tutte le aree test.

$$\text{coefficiente kappa:} \quad K = \frac{N \sum_{i=1}^r c_{ii} - \sum_{i=1}^r c_{i\text{Col}} c_{i\text{Rig}}}{N^2 - \sum_{i=1}^r c_{i\text{Col}} c_{i\text{Rig}}} \quad (11)$$

$c_{i\text{Col}}$ è la somma degli elementi della colonna i e $c_{i\text{Rig}}$ è, invece, la somma degli elementi della riga i .

Vengono calcolati l'accuratezza della classificazione e il coefficiente kappa per la ipotetica matrice di confusione in Tabella B-2 con 6 aree di riferimento (6 classi nell'immagine) e di conseguenza 6 aree test.

Aree test							
Classi	1	2	3	4	5	6	$c_{i Rig}$
1	50	3	0	0	2	5	60
2	4	62	3	0	0	1	70
3	4	4	70	0	8	3	89
4	0	0	0	64	0	0	64
5	3	0	2	0	71	1	77
6	10	3	1	3	0	33	50
$c_{i Col}$	71	72	76	67	81	43	N=410

Tabella B-2: Esempio di matrice di confusione.

$$\sum_{i=1}^6 c_{ii} = (50 + 62 + 70 + 64 + 71 + 33) = 350$$

$$A = \frac{\sum_{i=1}^r c_{ii}}{N} = \frac{350}{410} = 0.85 = 85\%$$

$$\sum_{i=1}^r c_{i Col} c_{i Rig} = 71 \cdot 60 + 72 \cdot 70 + 76 \cdot 89 + 67 \cdot 64 + 81 \cdot 77 + 43 \cdot 50 = 28739$$

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r c_{ii} - \sum_{i=1}^r c_{i Col} c_{i Rig}}{N^2 - \sum_{i=1}^r c_{i Col} c_{i Rig}} = \frac{410 \cdot 350 - 28739}{168100 - 28739} = \frac{114761}{139361} = 0.82$$

-Errori di "commissione": Nell'esempio di Tabella B-2 per la Classe 1 l'errore di commissione è $10/60 = 0.167$.

-Errori di "omissione": Nel nostro caso, per l'Area test 1 l'errore di omissione è $21/71 = 0.296$.

Altri indici utili alla valutazione della qualità di una classificazione sono:

-*Producer Accuracy* misura che indica la probabilità che il classificatore assegni un pixel alla classe A tra quelle che effettivamente appartengono all'area test

A. Nel nostro caso per l'area test 1 la Producer Accuracy vale $50/71 = 0.704$.

-*User Accuracy* misura che indica la probabilità che un pixel classificato come classe A appartenga realmente all'area test A. Per la classe 1 dell'esempio, l'*User Accuracy* vale $50/60 = 0.833$.

Anche se non è possibile stabilire relazioni di carattere generale, una classificazione può assumersi normalmente soddisfacente quando sia $K > 0.75$ [9] o tutti gli elementi diagonali della matrice di confusione siano superiori all'80% (e.g. Foody, 2002).

Classificazione dell' area di studio

L'obiettivo della classificazione è quello di creare una carta tematica dell'uso del suolo relativamente alla zona di interesse. L'algoritmo utilizzato è il SAM e la classificazione su cui ci si è basati è di tipo controllato. Innanzitutto ci si è preposti lo scopo di distinguere le aree permeabili da quelle impermeabili. All'interno delle aree impermeabili sono stati inseriti i territori edificati (centri abitati, strade, ponti, ecc.) e le superfici rocciose. Diverso è il discorso per le superfici permeabili. Il loro grado di permeabilità dipende, infatti, dalla natura del substrato e dalla sua copertura. Da un punto di vista idrologico un suolo nudo differisce in modo importante da quello di un suolo vegetato: le radici delle piante, infatti creano dei percorsi preferenziali per l'infiltrazione dell'acqua, che raggiunge più velocemente le falde, diminuendo lo scorrimento superficiale. Le piante inoltre assorbono grandi quantità d'acqua, restituendone una buona parte all'atmosfera per evapotraspirazione. Le piante inoltre diminuiscono l'effetto battente della pioggia, proteggendo il suolo dal dilavamento anche in zone ad elevata pendenza, dove contrastano gli effetti erosivi.

Il primo passo è stato quello di individuare e classificare i pixel appartenenti alle classi caratteristiche presenti all'interno della zona in esame tenendo in considerazione le categorie necessarie per l'applicazione del modello di infiltrazione.

Le classi caratteristiche scelte, in base alla precisione dell'immagine, sono quindi:

1. **Acqua** comprendente gli specchi e i corsi d'acqua presenti all'interno del bacino;
2. **Bosco** senza distinzione tra conifere e latifoglie;
3. **Superfici Impermeabili** che comprende rocce, suolo nudo ed edificato;
4. **Ghiaia** situata per lo più lungo il greto dei fiumi;
5. **Prato** comprendente le zone di verde non destinate alla produzione agricola;
6. **Terreni Agricoli** senza distinzioni tra i vari tipi.

Per la classificazione ci si è basati sulla Carta d'uso del suolo del Bacino Scolante nella Laguna di Venezia in formato shape (file di Arcview Gis) la quale è molto dettagliata rispetto la precisione che si può ottenere da una immagine del satellite LS5. L'immagine in questione è stata classificata considerando la sua rappresentazione in colori quasi naturali ed in falsi colori in modo da cogliere le caratteristiche salienti dei terreni legate alla loro colorazione. Dopo aver classificato l'immagine sulla base di un elevato numero di ROI si sono prese delle altre aree test con le quali si è costruita la matrice di confusione che è mostrata in Tabella B-3.

I parametri che denotano il livello di correttezza della classificazione risultano:

$$A = 91.3022\%$$

$$K = 0.8927$$

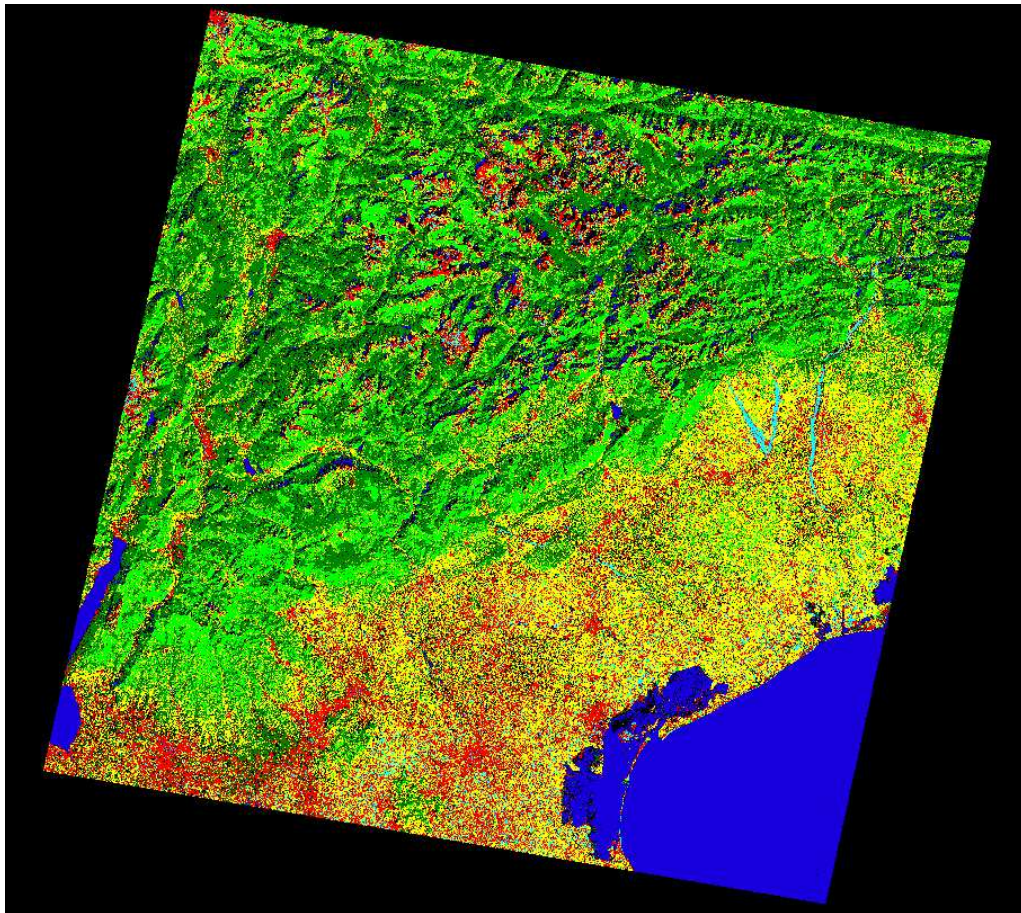
mentre gli altri indici per la valutazione della bontà della classificazione sono riassunti in Tabella B-4. Il risultato finale della classificazione è mostrato in Figura B-13.

Aree test (%)							
Classi	Acqua	Bosco	Ghiaia	Sup.imp.	T.agric.	Prato	Total
Inclass.	0.77	5.66	0.00	7.27	1.20	0.22	3.32
Acqua	99.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.54
Bosco	0.00	81.72	0.00	0.23	1.20	1.34	18.32
Ghiaia	0.00	0.00	96.73	8.68	0.34	0.00	12.14
Sup.imp.	0.00	0.00	3.00	78.19	12.69	1.56	21.39
T.agric.	0.00	7.21	0.27	5.63	81.13	12.25	17.84
Prato	0.00	5.41	0.00	0.00	3.43	84.63	12.45
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

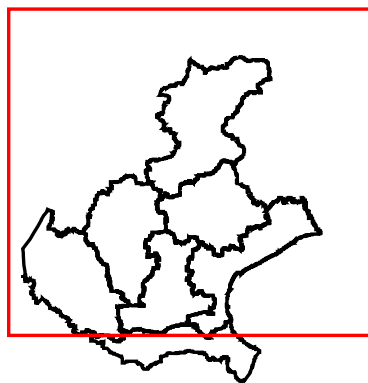
Tabella B-3: *Matrice di confusione della classificazione.*

Classi	Commission(%)	Omission(%)	Prod. Acc.(%)	User Acc.(%)
Acqua	0.00	0.77	99.23	100.00
Bosco	2.31	18.28	81.72	97.69
Ghiaia	17.63	3.27	96.73	82.37
Sup.imp.	12.12	21.81	78.19	87.88
T.agric.	25.28	18.87	81.13	74.72
Prato	14.03	15.37	84.63	85.97

Tabella B-4: Principali indici della classificazione.



Inquadramento della zona



Legenda

Uso__suolo

- | | |
|---|--------------------------|
|  | <i>Inclassificato</i> |
|  | <i>Bosco</i> |
|  | <i>Sup. impermeabili</i> |
|  | <i>Acqua</i> |
|  | <i>Terreni agricoli</i> |
|  | <i>Prato</i> |
|  | <i>Ghiaia</i> |

Figura B-13: *Mappa dell'uso del suolo del Veneto.*

B.1.5 Analisi dell' espansione insediativa nella provincia di Vicenza

La crescita economica e demografica della provincia di Vicenza degli ultimi 30 anni è stata accompagnata da un evidente sviluppo delle aree abitative e industriali, soprattutto nella zona dell'Alta pianura e nelle aree pianeggianti di fondo valle (le zone di ricarica degli acquiferi). Questa situazione ha ridotto sensibilmente la superficie di ricarica e ha modificato le modalità di smaltimento degli afflussi meteorici verso la rete fognaria. Va anche segnalato che i volumi d'acqua vengono trasportati a valle molto rapidamente per effetto delle grandi superfici impermeabilizzate (asfaltature, pavimentazioni, coperture di abitazioni e di insediamenti industriali), e quindi i tempi di corrivazione sono diminuiti. Alla combinazione di questi due fattori si fa corrispondere una riscontrata diminuzione di infiltrazione efficace di circa $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$, nel periodo 1980-1998 [10].

Allo scopo di mostrare la diminuzione di infiltrazione efficace per effetto dell'aumento di superficie impermeabile nell'area di ricarica, si sono create due mappe d'uso del suolo della zona di nostro interesse (in particolare l'Alto Vicentino) a partire da immagini Landsat acquisite rispettivamente nel 1987 e nel 2002.

I dati del 1987 (Fig. B-14) sono stati acquisiti il 27 luglio dal satellite Landsat 5 che monta a bordo il sensore Thematic Mapper, mentre i dati del 2002 (Fig. B-15) derivano dal satellite Landsat 7 con sensore ETM+ e data di acquisizione 3 agosto 2002. Dopo aver verificato che le immagini fossero corrette radiometricamente e georeferenziate, sono state classificate basandosi sulle conoscenze dirette dei luoghi e su mappe d'uso del suolo di anni vicini a quelli di interesse (in formato shape).

Le classi caratteristiche scelte sono le stesse della mappa di uso del suolo del Veneto, con l'aggiunta della classe Nuvole in quanto costituiscono una percentuale elevata delle immagini. I risultati delle classificazioni (Figg. B-16 e B-17) denotano una maggiore impermeabilizzazione del territorio nell'anno 2002, in particolare nelle zone di Schio e Thiene. Questo trova riscontro nell'elevato

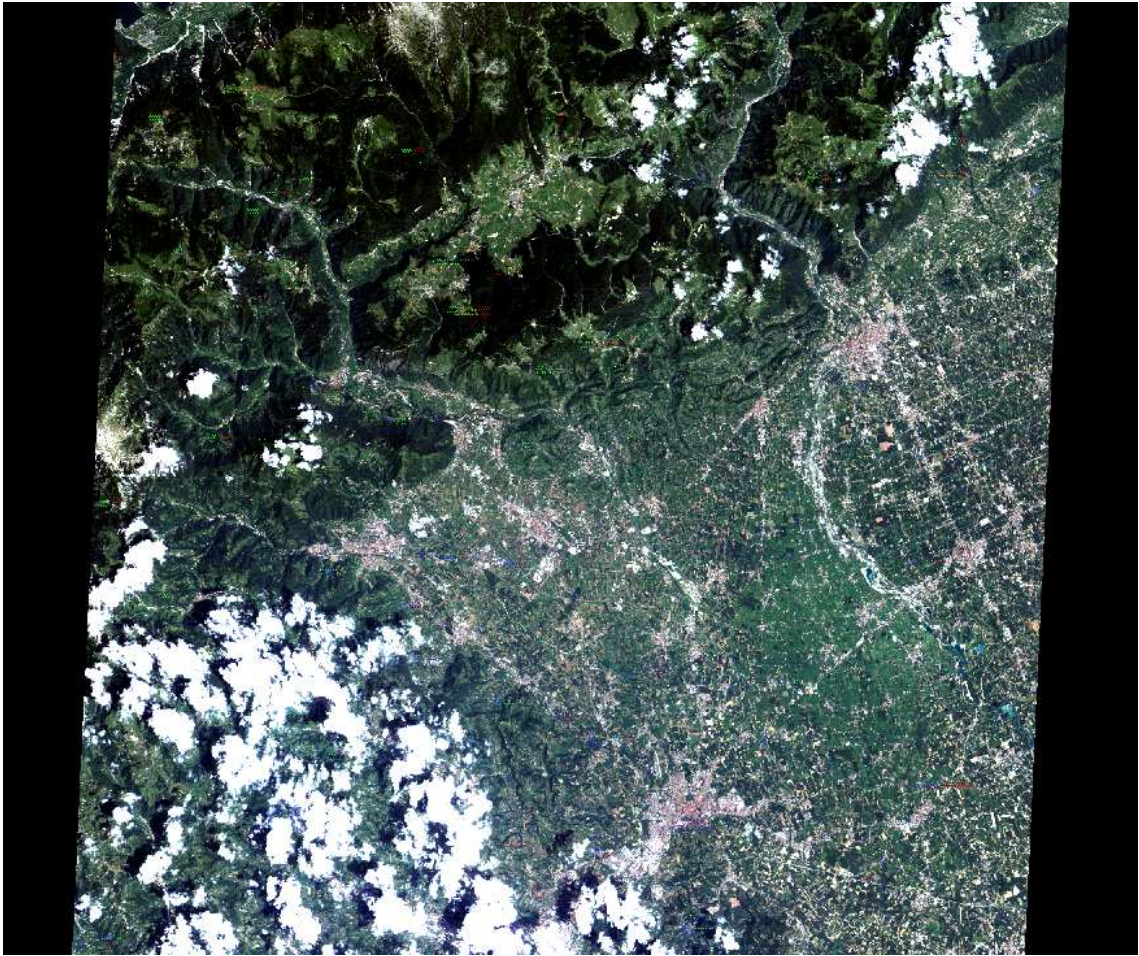


Figura B-14: *Rappresentazione a colori quasi naturali dei dati Landsat 5 della Provincia di Vicenza (anno 1987).*



Figura B-15: *Rappresentazione a colori quasi naturali dei dati Landsat 7 della Provincia di Vicenza (anno 2002).*

incremento di costruzioni civili ed industriali in quella zona negli ultimi decenni.

Dall'analisi delle due matrici di confusione si trovano delle discordanze nelle percentuali di copertura delle classi Bosco e Prato ma sono per lo più dovute alla diversa distribuzione delle nuvole nelle immagini. A tal proposito si nota che le zone d'ombra delle nuvole sono per lo più classificate come Acqua a causa della somiglianza dei rispettivi spettri elettromagnetici.

Qui di seguito sono riportate le matrici di confusione delle classificazioni in modo da comprendere le distribuzioni di copertura del suolo della zona (Tabelle B-5 e B-6).

I parametri che denotano il livello di correttezza delle classificazioni risultano rispettivamente:

$$A = 91.180\% \quad K = 0.886 \quad \text{per i dati LS5 del 1987 ;}$$

$$A = 93.034\% \quad K = 0.911 \quad \text{per i dati LS5 del 2002.}$$

Aree test (%)								
Classi	Acqua	Bosco	Sup.imp.	T.agric.	Prato	Nuvole	Ghiaia	Total
Inclass.	0.00	0.00	1.87	9.90	0.22	5.28	0.00	4.27
Acqua	99.31	0.65	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	5.96
Bosco	0.34	92.79	0.29	4.81	5.87	0.00	0.00	32.30
Sup.imp.	0.34	0.00	82.71	1.97	0.39	0.00	0.00	11.64
T. agric.	0.00	1.95	13.83	82.06	16.44	0.00	0.00	11.68
Prato	0.00	4.61	0.00	11.16	77.30	0.00	0.00	10.41
Nuvole	0.00	0.00	0.43	0.00	0.00	99.85	0.00	27.06
Ghiaia	0.00	0.00	2.59	0.00	0.00	0.15	100.00	0.95
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Tabella B-5: *Matrice di confusione della classificazione del 1987.*

Aree test (%)								
Classi	Acqua	Bosco	Sup.imp.	Prato.	T.agric	Nuvole	Ghiaia	Total
Inclass.	6.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.38	0.51
Acqua	91.80	0.00	0.68	0.00	0.00	0.00	0.00	3.61
Bosco	1.64	99.00	4.11	4.67	2.82	0.00	0.00	26.60
Sup.imp.	0.00	0.00	76.71	0.00	0.00	0.00	11.54	7.28
Prato	0.00	0.00	1.87	79.44	4.69	0.00	0.00	11.78
T.agric	0.00	0.00	6.85	15.89	92.49	0.00	0.00	15.26
Nuvole	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	32.81
Ghiaia	0.00	0.00	10.27	0.00	0.00	0.00	73.08	2.15
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Tabella B-6: *Matrice di confusione della classificazione del 2002.*

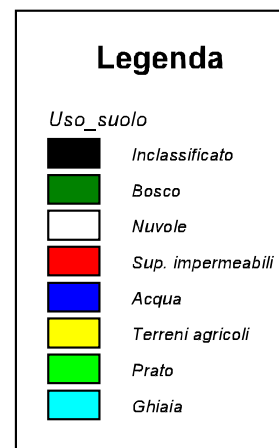
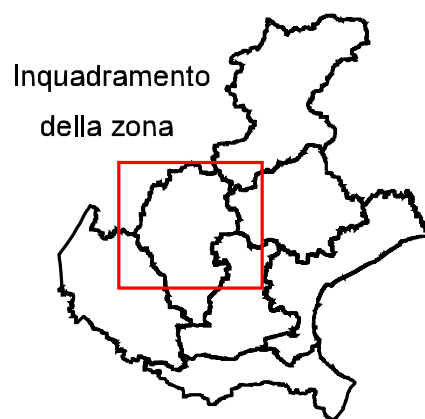
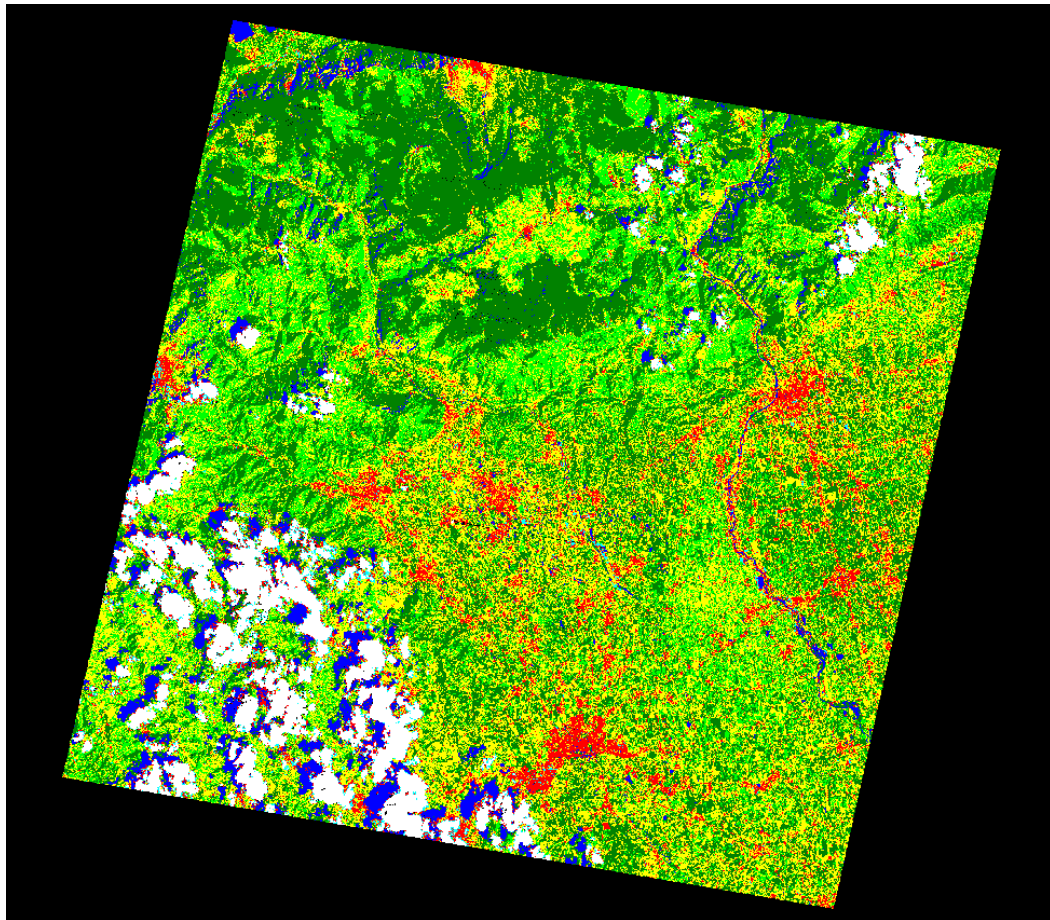


Figura B-16: *Mapa dell'uso del suolo della Provincia di Vicenza (anno 1987).*

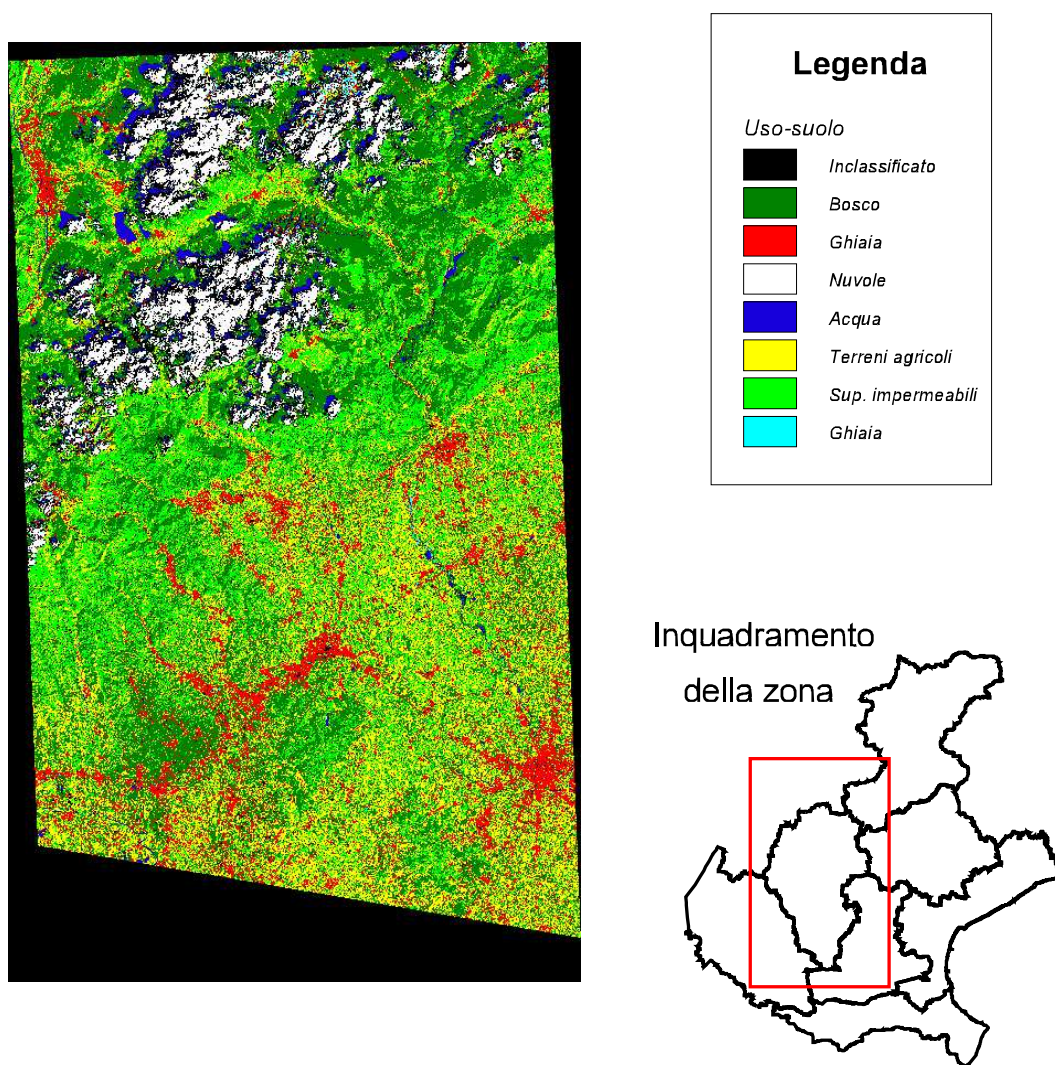


Figura B-17: *Mappa dell'uso del suolo della Provincia di Vicenza (anno 2002).*

B.2 Il modello di infiltrazione ed evapotraspirazione

La corretta determinazione dei flussi di massa che, infiltrandosi nel terreno, raggiungono la falda sottostante, necessita di una accurata modellazione di tutti i fenomeni di scambio di massa e di energia tra la superficie e l'atmosfera sovrastante. La necessità infatti di analizzare fenomeni di infiltrazione e di ricarica della falda a scale temporali superiori a quelle caratteristiche del singolo evento meteorico (tipicamente dell'ordine delle ore o, al più, del giorno) richiede l'abbinamento dei classici metodi di analisi dell'infiltrazione con un accurato bilancio energetico al fine di stimare il non trascurabile flusso di massa dovuto all'evapotraspirazione. A tal proposito l'evapotraspirazione, che costituisce il flusso dominante nell'arco di tempo compreso tra due successivi eventi meteorici, determina le condizioni iniziali di umidità del terreno all'inizio del successivo evento, influenzando pertanto la capacità di infiltrazione del suolo e la velocità con la quale i volumi infiltrati percolano fino a raggiungere il livello di falda sottostante.

La necessità di tenere in conto di un complesso sistema di processi strettamente interconnessi tra loro, governati dalle condizioni di umidità del suolo, determina altresì l'inadeguatezza dei tradizionali metodi empirici di separazione dei deflussi (coefficiente di deflusso, CN-SCS, ecc.) e l'utilità di metodi fisicamente basati che permettano l'accoppiamento con adeguati modelli per la stima dell'evapotraspirazione.

Il flusso di ricarica viene stimato mediante un bilancio idrologico a scala oraria applicato ad un volume di controllo coincidente con lo strato superficiale di terreno ed è rappresentato in modo schematico in Figura B-18, dove j rappresenta l'intensità di precipitazione, i indica la precipitazione che si infiltra nel terreno, s il termine di deflusso superficiale, p il termine di deflusso sub-superficiale, ET il flusso di evapotraspirazione ed r il flusso di ricarica della falda.

Il modello matematico adottato è in grado di accoppiare al bilancio di massa un opportuno bilancio di energia che metta in conto l'effetto a lungo termine

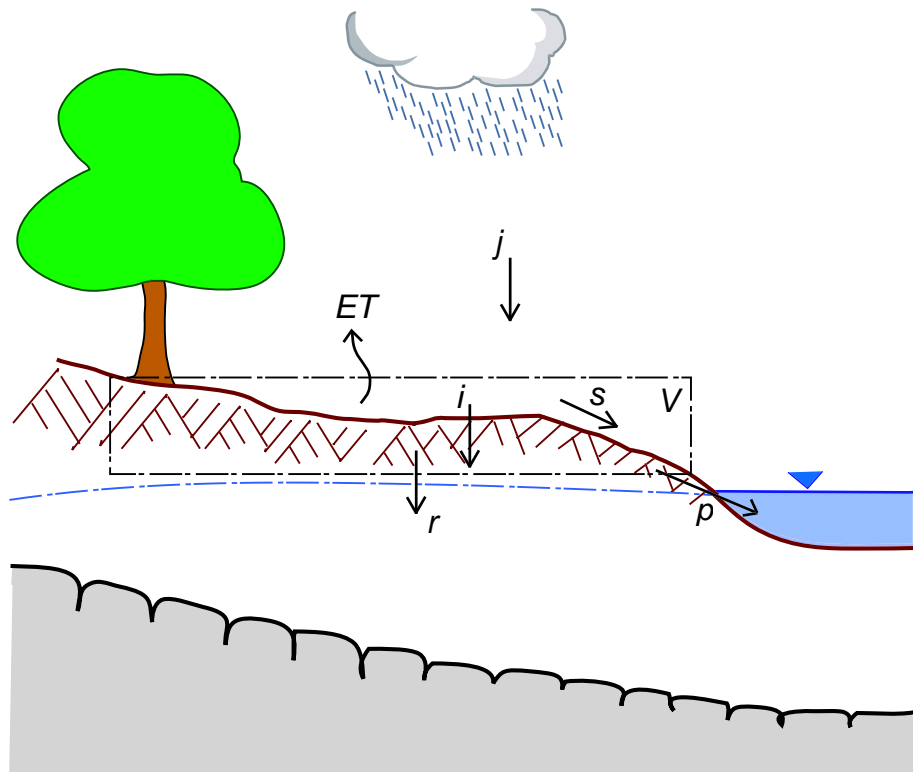


Figura B-18: *Termini di flusso che compaiono nella formulazione del bilancio idrologico.*

dovuto all'evapotraspirazione. L'equazione di bilancio idrologico per un volume di suolo al di sotto della superficie di area unitaria può esprimersi:

$$\frac{dV(t)}{dt} = i(t) - r(t) - ET(t) - p(t) \quad (12)$$

A tale equazione deve aggiungersi l'equazione di bilancio energetico, in questo caso rappresentata dall'eq. di Penman-Montieth (41) che esprime l'evapotraspirazione.

Si descrivono nel seguito i modelli idrologici sviluppati per il calcolo dei termini di infiltrazione e di evapotraspirazione e quindi del contributo alla ricarica della falda, r (mm/giorno).

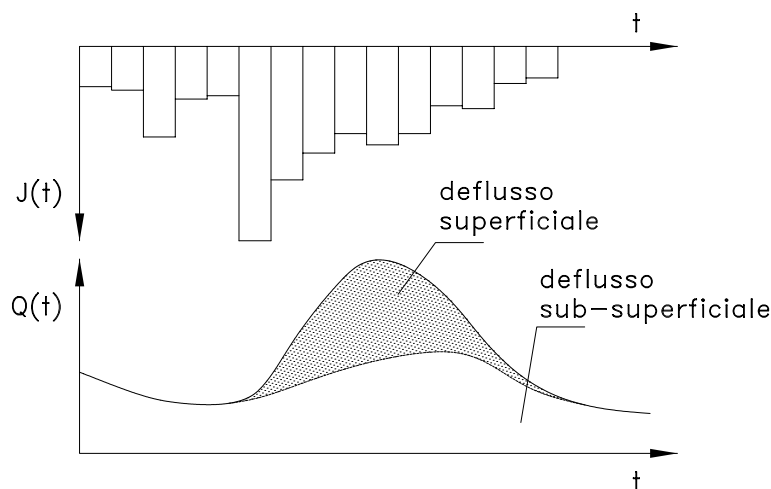


Figura B-19: *Separazione della pioggia in deflusso superficiale e sub-superficiale.*

B.2.1 La precipitazione efficace

La precipitazione efficace rappresenta l'eccedenza della precipitazione rispetto alla capacità di infiltrazione del suolo.

Il calcolo della precipitazione efficace è utile per verificare se ed in quali condizioni si produca nelle zone di interesse precipitazione efficace.

Si possono distinguere due meccanismi di generazione di precipitazione efficace o separazione dei deflussi:

1. **Meccanismo di Dunne** : la saturazione del suolo avviene per progressivo esaurimento del volume invasabile nello strato collaborante di terreno. A saturazione avvenuta la capacità di infiltrazione del suolo si annulla e la precipitazione successiva è interamente efficace.
2. **Meccanismo di Horton**: la saturazione avviene superficialmente, se e quando l'intensità della precipitazione eccede la capacità di infiltrazione del terreno.

La dinamica d'infiltrazione descritta è concettualmente schematizzata in Figura B-19.

B.2.2 Caratteristiche e proprietà dei suoli: l'acqua nel terreno

L'acqua che si infiltra nel terreno è soggetta a processi di redistribuzione nella porzione di suolo saturo e non saturo, la cui descrizione matematica è necessaria alla valutazione della capacità di infiltrazione.

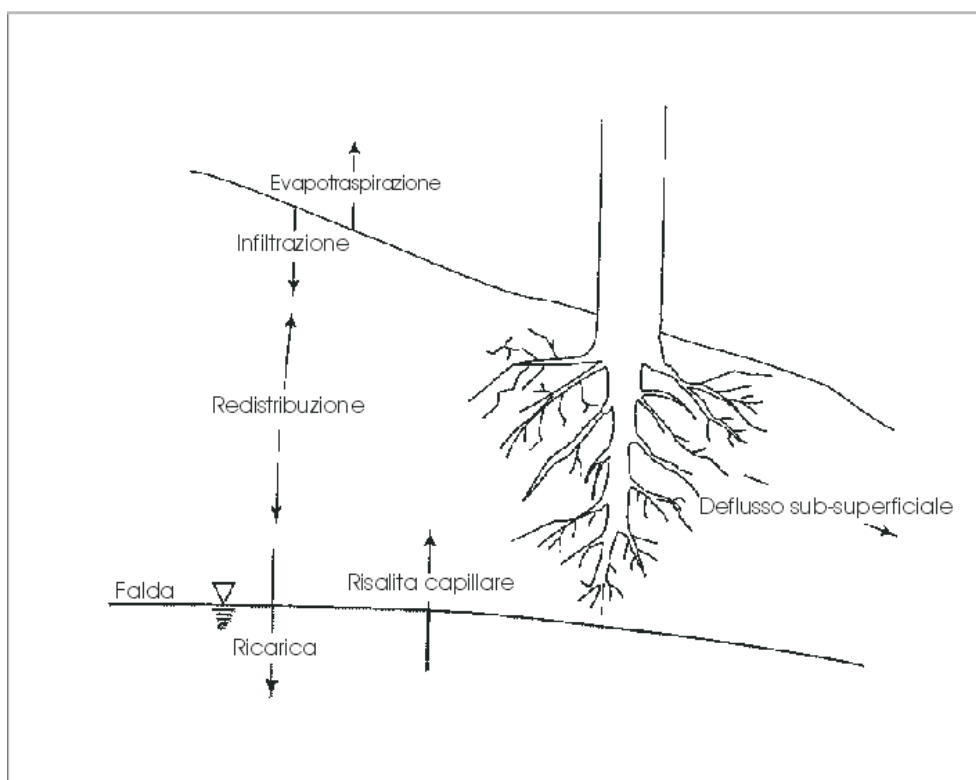


Figura B-20: *Moti dell'acqua nel terreno.*

I processi di redistribuzione comprendono:

- evapotraspirazione dagli strati superficiali del terreno e dalle piante,
- risalita capillare,
- ricarica della falda,
- deflusso sub-superficiale,

- deflusso profondo.

Le modalità con le quali avvengono i flussi subsuperficiali sono a loro volta funzione del grado di saturazione del terreno, la cui specificazione richiede la definizione di alcune proprietà dei suoli.

Proprietà indici dei terreni

Si consideri un suolo omogeneo come un sistema trifase costituito da materiale solido, acqua e aria. Un campione di mezzo poroso di volume V , appartenente a tale suolo, è composto di una parte solida V_s e di una parte V_v di vuoti, i quali possono essere occupati da acqua o gas. Si definisce porosità il rapporto:

$$\phi = \frac{V_v}{V}; \quad (13)$$

per i terreni naturali generalmente $\phi = 0,3 \div 0,6$. Indicato con V_w il volume d'acqua presente nel terreno si definisce contenuto d'acqua del terreno θ

$$\theta = \frac{V_w}{V} \quad 0 \leq \theta \leq \phi. \quad (14)$$

Proprietà idrauliche dei terreni

Il moto nei mezzi porosi saturi è descritto dalla legge di Darcy

$$v_x = -K_h \frac{d(z + \frac{p}{\gamma_w})}{dx}, \quad (15)$$

dove v_x è la velocità in direzione x , z l'altezza rispetto ad un sistema di riferimento arbitrariamente scelto, p la pressione dell'acqua, γ_w la densità dell'acqua e K_h la conduttività idraulica del mezzo. Poichè γ_w è costante per problemi idrologici che non coinvolgono gradienti di temperatura o salinità conviene usare la piezometrica ψ definita come:

$$\psi = \frac{p}{\gamma_w}, \quad (16)$$

nell'applicare la legge di Darcy allo studio dell'infiltrazione. Nei moti di filtrazione in mezzi porosi insaturi conduttività idraulica e piezometrica sono funzioni

del contenuto d'acqua θ ; la legge di Darcy perciò diventa:

$$v_x = -K_h(\theta) \frac{d[z + \psi(\theta)]}{dx} \quad (17)$$

Dalla (17) si può dedurre che la conduttività idraulica, o permeabilità, è la velocità alla quale l'acqua si muove in un mezzo poroso sotto l'azione di un gradiente unitario di energia potenziale. Essa dipende dalle dimensioni dei canalicoli disponibili per il passaggio dell'acqua: in condizioni di saturazione per $\theta = \phi$, K_h raggiunge il valore massimo di K_{hsat} che dipende dalle dimensioni dei grani che costituiscono il terreno; in condizioni di parziale saturazione dipende dalle dimensioni dei grani e dal grado di saturazione $S = \frac{\theta}{\phi}$. Per un dato suolo la relazione tra conduttività idraulica e contenuto d'acqua è generalmente non lineare così come quella tra piezometrica e contenuto d'acqua. L'andamento qualitativo di tali relazioni è riportato in Figura B-21.

Nel presente lavoro si sono utilizzate le relazioni approssimate determinate da Clapp e Hornberger (1978)[11]:

$$\psi(\theta) = |\psi_s| \left(\frac{\theta}{\phi}\right)^{-b}, \quad (18)$$

$$K_h(\theta) = K_{hsat} \left(\frac{\theta}{\phi}\right)^c. \quad (19)$$

Nelle equazioni (18) e (19) ψ_s , b e $c \cong 2b+3$ sono parametri sperimentali dipendenti dalla tessitura del terreno, che è determinata dalla percentuale in peso di argilla, limo e sabbia presenti nel suolo dopo che le particelle aventi diametro superiore a quelle di sabbia (0,2 mm) siano state rimosse, secondo lo schema elaborato dallo U.S. Department of Agriculture (Figura B-22).

I valori dei parametri che definiscono i legami costitutivi secondo Clapp e Hornberger sono riportati in Tabella B-7 per le diverse tipologie di terreno. Il contenuto d'acqua che può essere trattenuto dal terreno contro la forza di gravità è rappresentato dalla capacità di campo θ_{FC} .

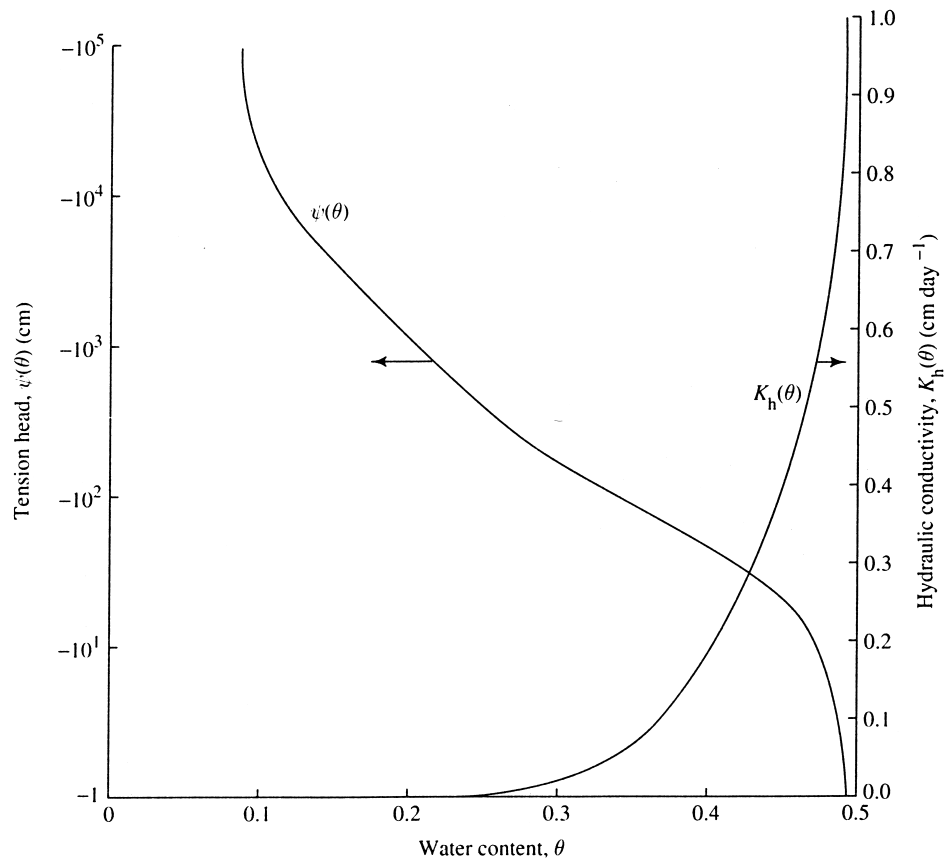


Figura B-21: *Forme caratteristiche delle relazioni idrauliche $\psi(\theta)$ e $K_h(\theta)$ per terreni insaturi. (per questo terreno $\phi = 0,5$).*

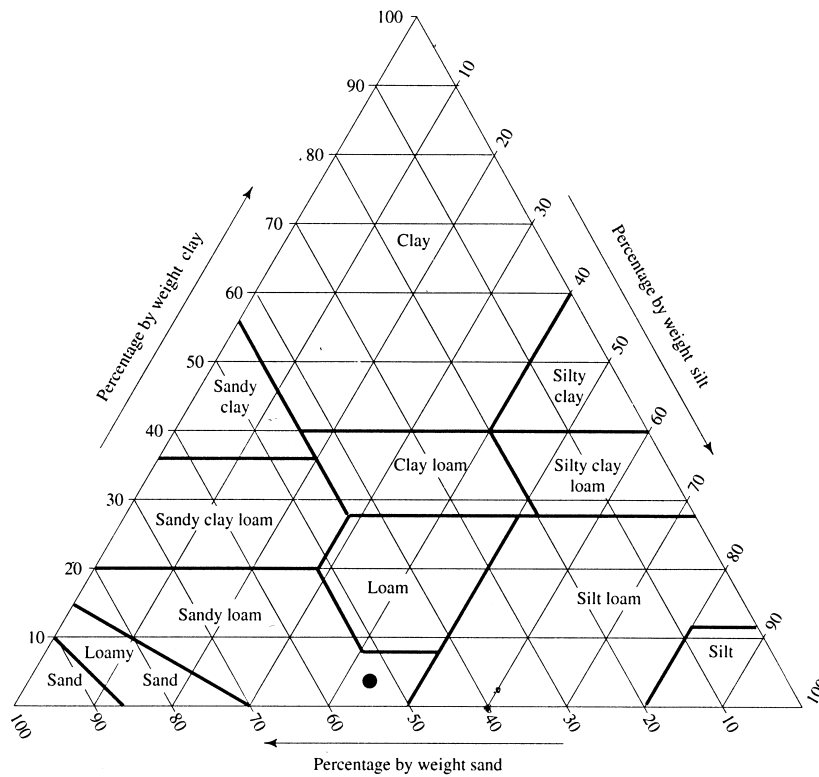


Figura B-22: *Triangolo di tessitura del terreno*

B.2.3 L'Infiltrazione

Definizioni

Si consideri un evento di pioggia che cominci al tempo $t = 0$ e finisca al tempo $t = t_w$; la velocità di infiltrazione, $f(t)$, è la velocità alla quale l'acqua penetra nel suolo attraverso la superficie. Si definisce inoltre l'intensità di precipitazione $w(t)$, la capacità di infiltrazione $f_c(t)$ come la massima velocità a cui l'infiltrazione può avvenire e il battente idraulico dell'acqua sopra la superficie del terreno $Y(t)$. Per modellare il processo di infiltrazione è necessario distinguere 3 condizioni:

1. **Battente idraulico nullo** : In questo caso la velocità di infiltrazione è uguale all'intensità di precipitazione ed è minore o al più uguale alla

Classe di tessitura	ϕ	$K_{h,sat}$ (mm/h)	ψ_f (mm)	θ_{FC}
Sand	0.437	> 40	49.5	0.07 ÷ 0.17
Loamy sand	0.437	29.9	61.3	0.11 ÷ 0.19
Sandy loam	0.453	10.9	110.1	0.18 ÷ 0.28
Silt loam	0.501	6.5	166.8	0.22 ÷ 0.36
Loam	0.463	3.4	88.9	0.20 ÷ 0.30
Sandy clay loam	0.398	1.5	218.5	0.22 ÷ 0.32
Silty clay loam	0.471	1.0	273.0	0.30 ÷ 0.37
Clay loam	0.464	1.0	208.8	0.30 ÷ 0.37
Sandy clay	0.430	0.6	239.0	0.27 ÷ 0.34
Silty clay	0.479	0.5	292.2	0.30 ÷ 0.42
Clay	0.475	0.3	316.3	0.32 ÷ 0.40

Tabella B-7: Valori dei parametri che definiscono i legami costitutivi dei terreni secondo lo schema di Figura B-22 [11].

capacità di infiltrazione:

$$Y(t) = 0, \quad f(t) = w(t) \leq f_c(t). \quad (20)$$

2. **Saturazione superficiale:** quando l'intensità di precipitazione è maggiore della capacità di infiltrazione si forma un battente idraulico:

$$Y(t) > 0, \quad f(t) = f_c(t) \leq w(t). \quad (21)$$

3. **Saturazione sub-superficiale:** Si forma un battente idraulico poichè l'intero terreno è saturo e non può più avere luogo alcuna infiltrazione. In questo caso la velocità di infiltrazione è nulla:

$$Y(t) \geq 0, \quad f(t) = 0. \quad (22)$$

Caratteristiche fondamentali del processo di infiltrazione

Studi sperimentali del processo di infiltrazione durante il quale avvenga saturazione superficiale dimostrano che la velocità di infiltrazione assume valori elevati all'inizio dell'evento, seguiti da una rapida diminuzione, per poi tendere asintoticamente ad un valore costante.

La Figura B-23 mostra i profili verticali del contenuto d'acqua in funzione del tempo, indicando come vi sia un fronte di saturazione che si propaga verso il basso. Si tratta ora di determinare la velocità di infiltrazione in funzione del tempo t , $f(t)$, durante un evento di pioggia. Infatti $f(t)$ dipende da:

1. Intensità di precipitazione $w(t)$;
2. Conduttività idraulica satura alla superficie;
3. Contenuto d'acqua iniziale del terreno θ_0 ;
4. Pendenza e scabrezza della superficie del terreno;
5. Caratteristiche chimiche di tale superficie;
6. Proprietà chimiche e fisiche dell'acqua.

Il modello del processo di infiltrazione che verrà descritto nel paragrafo successivo permetterà di esaminare gli effetti dei primi tre punti di cui sopra. Tuttavia prima di passare alla fase successiva si rende necessario un'analisi quantitativa del modo in cui tali fattori sono influenzati dalle condizioni ambientali.

- **Intensità di precipitazione:** Le equazioni (20), (21) e (22) definiscono le condizioni in cui $w(t)$ e $Y(t)$ determinano un intervallo di possibili valori per $f(t)$.
- **Conduttività idraulica alla superficie:** Si può dimostrare che il minimo valore della capacità di infiltrazione di un terreno è circa uguale a K_{hsat} .
- **Copertura del suolo:** La conduttività idraulica, a parità di caratteristiche del terreno può variare in modo significativo in funzione dell'uso del suolo.

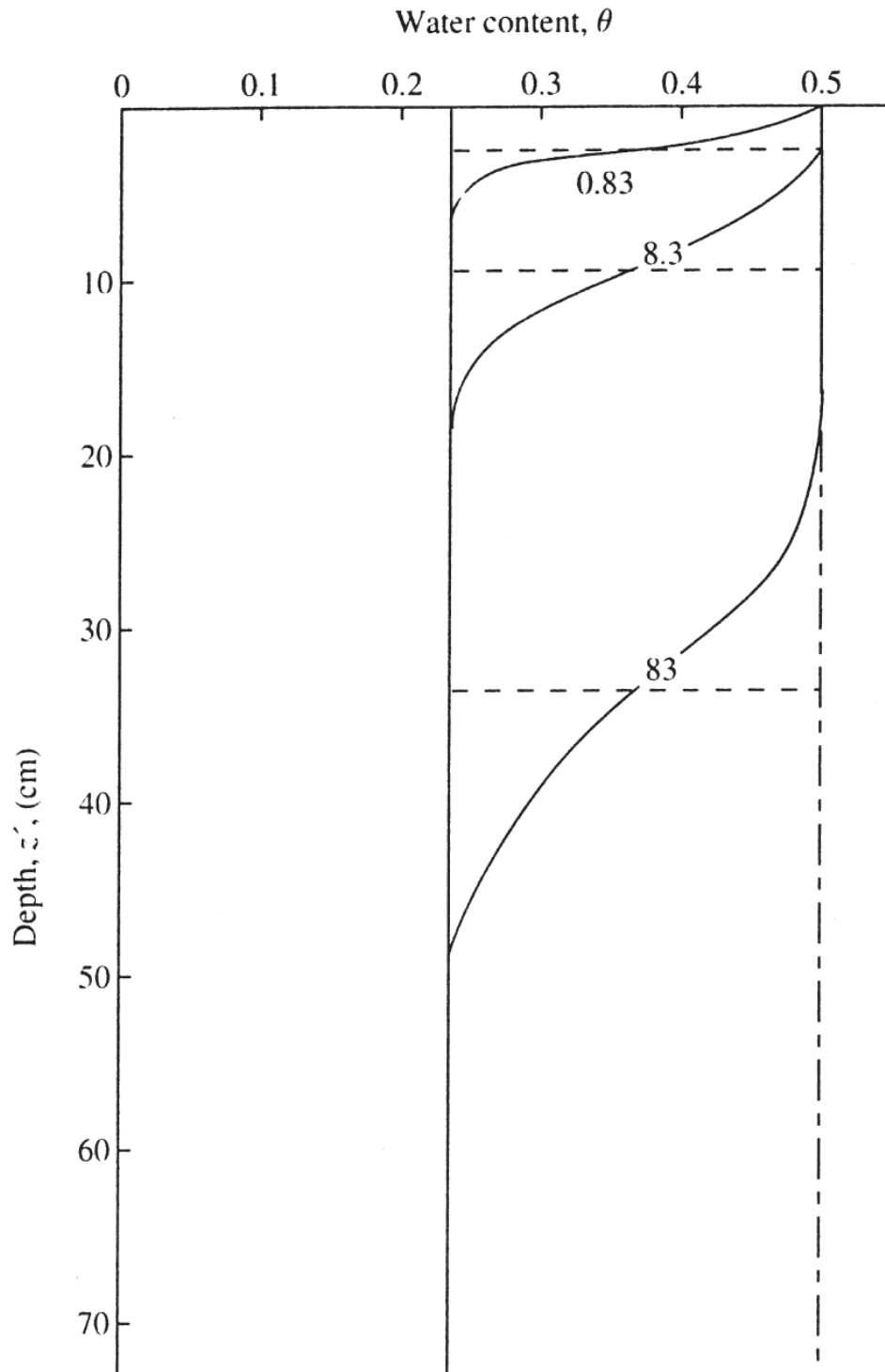


Figura B-23: *Profili del contenuto d'acqua in un terreno argilloso con $\phi = 0,50$ per un'infiltrazione costante a battente idraulico nullo.*

B.2.4 Il modello di Green-Ampt

Il modello di Green-Ampt applica la legge di Darcy e il principio di conservazione della massa in una formulazione uni-dimensionale alle differenze finite che permette una visione realistica del processo di infiltrazione combinando i due meccanismi di separazione dei deflussi:

- *Meccanismo di Dunne*: la saturazione avviene per progressivo esaurimento del volume invasabile localmente nello strato collaborante del terreno (spessore inferiore al metro). A saturazione avvenuta non è possibile più alcuna infiltrazione e la precipitazione successiva defluisce interamente sulla superficie.
- *Meccanismo di Horton*: la saturazione avviene superficialmente, quando l'intensità di precipitazione eccede la capacità di infiltrazione del terreno.

Si consideri pertanto un parallelepipedo rettangolare di terreno orientato in modo tale che una dimensione sia parallela all'asse verticale z .

Le dimensioni Δx , Δy , Δz devono essere abbastanza grandi da comprendere un volume rappresentativo di terreno. Se il moto avviene solo in direzione verticale (z'), l'equazione di conservazione della massa è data da:

$$\rho_w v_{z'} \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta t - \rho_w \left(v_{z'} + \frac{\partial v_{z'}}{\partial z'} \Delta z \right) \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta t = \rho_w \frac{\partial \theta}{\partial t} \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta t, \quad (23)$$

dove ρ_w è la densità dell'acqua, $v_{z'}$ la velocità in direzione z' e θ il contenuto d'acqua. Assumendo una densità costante l'equazione di continuità diventa:

$$-\frac{\partial v_{z'}}{\partial z'} = \frac{\partial \theta}{\partial t}. \quad (24)$$

L'equazione di Darcy, (17), poichè $\frac{z}{z'} = -1$, diventa

$$v_{z'} = K_h(\theta) - K_h(\theta) \frac{d\psi(\theta)}{dz'}. \quad (25)$$

Si consideri ora un volume di terreno che sia omogeneo fino ad una profondità indefinita. Questo significa che la porosità ϕ e la conduttività idraulica satura

K_{hsat} , sono costanti in tutto il volume. Il contenuto d'acqua θ al tempo $t = 0$ sia anch'esso costante e uguale a $\theta_0 < \phi$. Al tempo $t = 0$ il flusso d'acqua in direzione verticale è dato dalla (25) come:

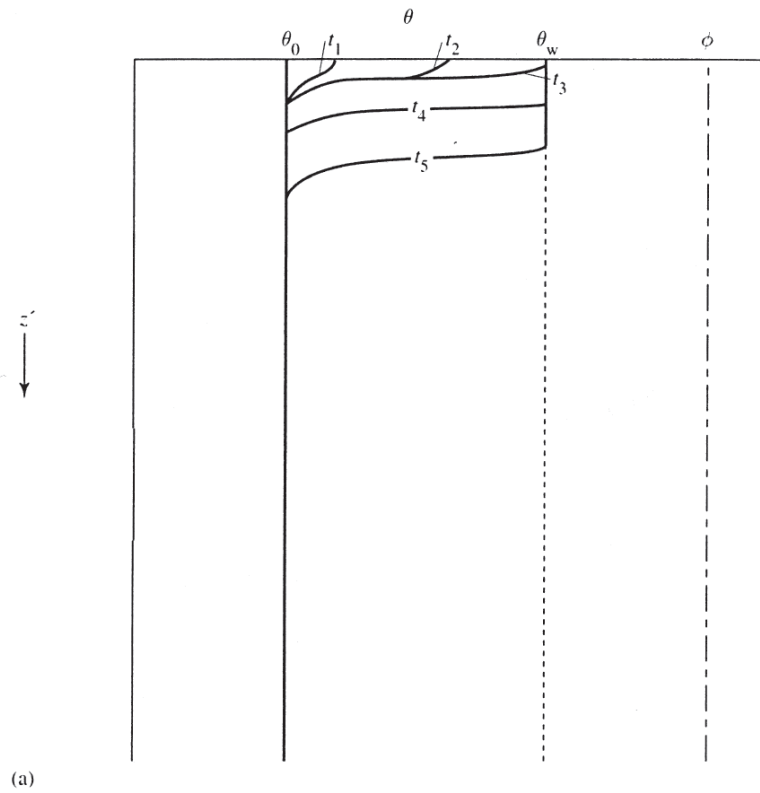
$$v_{z'}(z, 0) = K_h(\theta_0). \quad (26)$$

A partire dal tempo $t = 0$, l'acqua comincia ad arrivare alla superficie ad una velocità w fino ad un tempo t_w . A questo punto si rende necessario distinguere due casi:

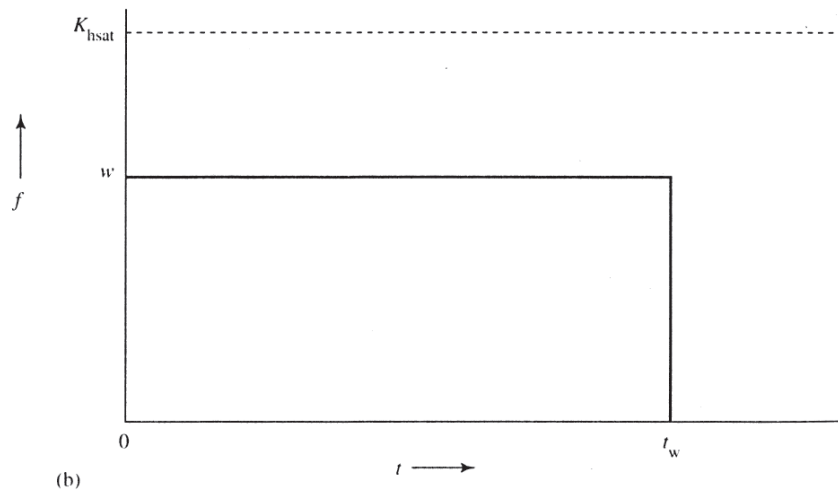
1. $w < K_{hsat}$: Si consideri un sottile strato superficiale di terreno dove l'equazione (26) si applica all'istante in cui l'evento di pioggia comincia. Assumendo $w > K_h(\theta_0)$ l'acqua entrerà in questo strato più velocemente di quanto ne esca e si accumulerà aumentando il contenuto d'acqua θ del terreno stesso. L'aumento di θ provoca un aumento della conduttività idraulica così da far aumentare anche il flusso in uscita dallo strato di terreno.

Tuttavia finchè il contenuto d'acqua nel terreno è minore del contenuto d'acqua θ_w per cui $w = K_{hsat}$, esso continuerà ad aumentare. Per $\theta = \theta_w$ la conduttività idraulica è $K_h(\theta_w) = w$, il flusso in uscita è uguale al flusso in entrata e il contenuto d'acqua assume un valore costante fino alla fine dell'evento. Tale processo ha luogo successivamente in ognuno degli strati componenti il terreno generando una serie di profili di contenuto d'acqua e un grafico di infiltrazione in funzione del tempo riportati in Figura B-24.

2. $w > K_{hsat}$: In questo caso il processo appena descritto avviene nelle prime fasi dell'infiltrazione poichè il contenuto d'acqua e la conduttività idraulica non possono eccedere il valore alla saturazione, rispettivamente ϕ e K_{hsat} . Non appena la superficie raggiunge lo stato di saturazione, la parte di precipitazione che non si infiltra si accumula su di essa formando un battente idraulico che, in presenza di una qualche pendenza, dà luogo a deflusso superficiale. In questa situazione l'andamento del profilo di θ è rappresentato



(a)



(b)

Figura B-24: a) Profili del contenuto d'acqua ad istanti successivi e b) velocità di infiltrazione in funzione del tempo per $w < K_{hsat}$.

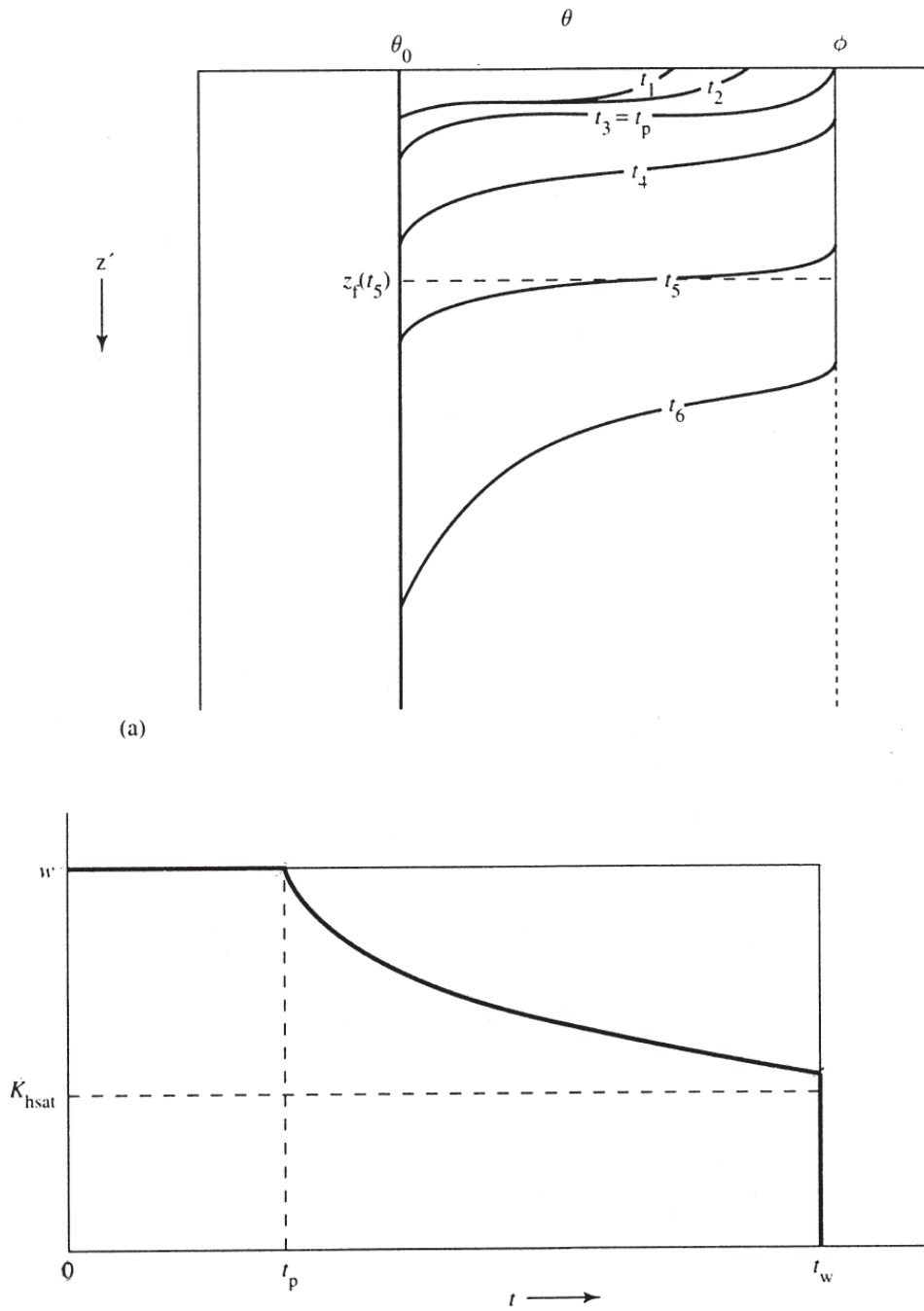


Figura B-25: a) Profili del contenuto d'acqua ad istanti successivi e b) velocità di infiltrazione in funzione del tempo per $w > K_{hsat}$.

in Figura B-25. L'istante in cui lo strato superficiale del terreno diventa saturo è chiamato time of ponding ed è indicato con t_p . Per calcolare il valore di t_p si assume che il fronte bagnato abbia forma perfettamente orizzontale e si indica con $z_f(t_p)$ la profondità di tale fronte per $t = t_p$. Per $t < t_p$ tutta la pioggia caduta si è infiltrata. Indicando con $F(t_p)$ la quantità d'acqua infiltrata risulterà:

$$F(t_p) = w \cdot t_p. \quad (27)$$

Quest'acqua occupa una porzione di terreno compresa tra la superficie e la quota $z_f(t_p)$ come si può vedere in Figura B-25. Per l'equazione di continuità:

$$F(t_p) = z_f(t_p) \cdot (\phi - \theta_0). \quad (28)$$

Combinando la (27) con la (28) si ottiene una prima espressione per il time of ponding:

$$t_p = \frac{z_f(t_p) \cdot (\phi - \theta_0)}{w}. \quad (29)$$

Al fine di poter utilizzare la (29) si rende necessario determinare $z_f(t_p)$ applicando la legge di Darcy (17) alle differenze finite tra la superficie e la profondità $z_f(t_p)$:

$$v_{z'}(0, t_p) = f(t_p) = w = K_{hsat} - K_{hsat} \frac{\psi_f - 0}{z_f(t_p)}, \quad (30)$$

dove ψ_f è la tensione effettiva in corrispondenza del fronte bagnato. Il valore 0 nella (30) corrisponde alle tensione effettiva alla superficie per $t = t_p$, istante in cui, avendosi saturazione, la conduttività idraulica è uguale a K_{hsat} . Tenendo presente che $\psi_f < 0$ è possibile risolvere la (30) per $z_f(t_p)$:

$$z_f(t_p) = \frac{K_{hsat} |\psi_f|}{w - K_{hsat}}. \quad (31)$$

Sostituendo la (31) nella (29) si trova l'equazione finale per il time of ponding:

$$t_p = \frac{K_{hsat} |\psi_f| (\phi - \theta_0)}{w(w - K_{hsat})}. \quad (32)$$

Se l'evento continua per $t > t_p$ l'infiltrazione continua ma ad una velocità inferiore come si può notare in Figura (B-25). Applicando ulteriormente l'approccio alle differenze finite è possibile modellare anche questa fase dell'infiltrazione. Indicando con $z_f(t)$ la profondità del fronte bagnato al tempo t , con $t_p < t < t_w$, la (31) diventa:

$$f(t) = K_{hsat} \left[1 + \frac{|\psi_f| + y(t)}{z_f(t)} \right], \quad (33)$$

dove con $y(t)$ si è indicato il battente idraulico sopra la superficie del terreno. Ora, poichè in generale $y(t)$ è una funzione complicata che dipende dall'entità dell'infiltrazione al tempo t e dalla pendenza e copertura della superficie e poichè sono stati ottenuti risultati soddisfacenti considerando $y(t)$ trascurabile, nella successiva analisi si porrà $y(t) = 0$. Risolvendo l'equazione di continuità:

$$F(t) = z_f(t)(\phi - \theta_0), \quad (34)$$

per $z_f(t)$ e sostituendo nella (33) si ottiene:

$$f(t) = K_{hsat} \left[1 + \frac{|\psi_f| (\phi - \theta_0)}{F(t)} \right], \quad t_p \leq t_w; \quad (35)$$

Questa equazione permette di determinare la velocità di infiltrazione in funzione dell'infiltrazione totale e va risolta per tentativi tenendo presente che

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}. \quad (36)$$

B.2.5 Stima delle proprietà idrauliche dei terreni

La conduttività idraulica K_{hsat} e la tensione effettiva ψ_f giocano un ruolo importante nel modello di Green-Ampt e molti studi sono stati fatti per determinare valori appropriati di tali parametri. Si può ritenere che la conduttività idraulica satura effettiva da usare nel modello dovrebbe essere più bassa rispetto ai valori nominali a causa del flusso di aria verso l'alto che avviene durante il processo

di infiltrazione e che occupa parte dei vuoti rendendoli indisponibili al passaggio dell'acqua. Alcuni studi (Freyberg e altri, 1980) suggeriscono un valore pari a $\frac{1}{2}K_{hsat}$; tuttavia Mein e Larson (1973) e altri studi hanno ottenuto buoni risultati utilizzando i valori nominali. Il modello adottato segue la seconda strada nella convinzione che questa scelta non influisca sull'ordine di grandezza del processo fisico. Per quanto riguarda ψ_f si utilizza un approccio semplificato che sembra essere giustificato per molti scopi idrologici (Brakensiek (1977), Freyberg e altri (1980)) secondo cui:

$$|\psi_f| = 0,76 |\psi_s|. \quad (37)$$

B.2.6 Approccio di Green-Ampt per piccoli spessori di suolo

Nella sezione precedente si è trattato il caso di un suolo omogeneo di profondità indefinita. Si può usare lo stesso approccio per trattare l'infiltrazione in terreni in cui ad una certa profondità sia interposto uno strato impermeabile che può essere costituito da roccia o, con il medesimo effetto, dalla superficie di una falda. Si consideri un terreno permeabile orizzontale avente proprietà idrauliche costanti tra la superficie ad uno strato orizzontale impermeabile posto a profondità ΔZ ; tale strato verrà d'ora in avanti denominato strato collaborante.

Il valore iniziale del contenuto d'acqua sia θ_0 e l'intensità di precipitazione sia $w(t)$. Il volume d'acqua presente all'interno del terreno all'inizio dell'evento di pioggia per $t = 0$, dà luogo ad un valore del contenuto d'acqua pari a θ_0 uniforme all'interno del terreno (Figura B-26). Indicando con $z_f(t)$ la profondità equivalente del fronte bagnato al variare del tempo, come nel paragrafo precedente, l'equazione (38) fornisce l'espressione per $z_f(t)$ in funzione di $F(t)$, ϕ e θ_0 :

$$z_f(t) = \frac{F(t)}{\phi - \theta_0}. \quad (38)$$

Durante l'evento di precipitazione possono presentarsi due casi:

1. $z_f(t) < \Delta Z$: Il fronte bagnato avanza verso lo strato impermeabile come

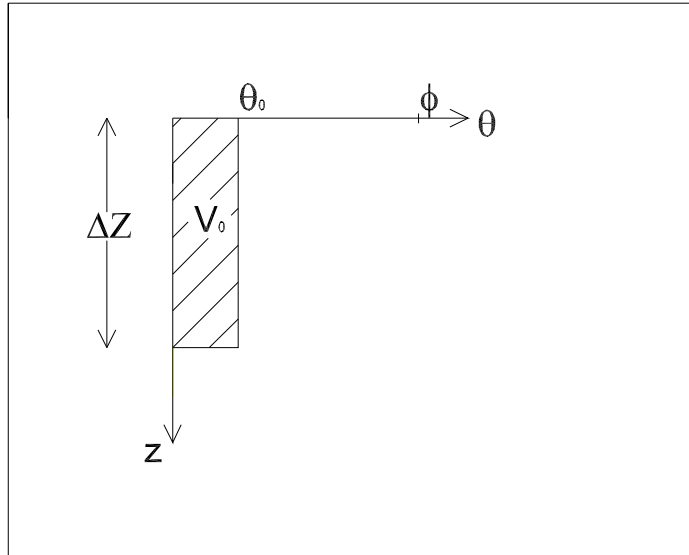


Figura B-26: *Contenuto d'acqua in funzione della profondità per $t = 0$.*

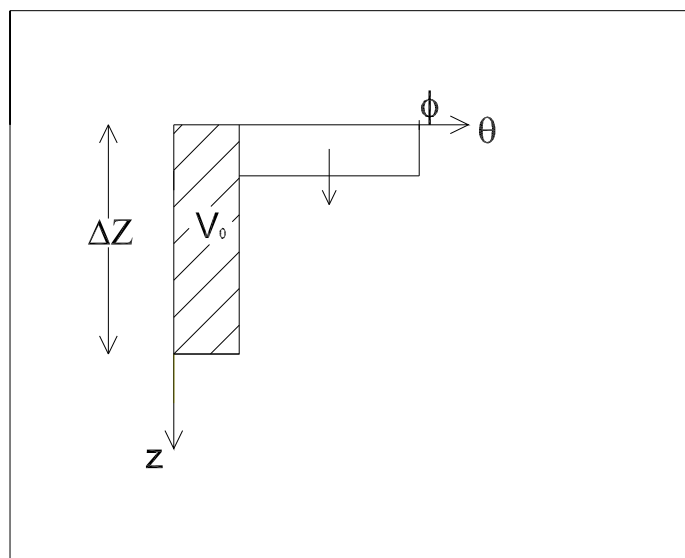


Figura B-27: *Contenuto d'acqua in funzione della profondità per $t \neq 0$.*

riportato in Figura (B-27) e il terreno non ha ancora raggiunto lo stato di saturazione. La trattazione è analoga a quella vista per terreni profondi. Si distinguono due casi:

- (a) $w(t) < K_{hsat}$: In questo caso tutta la precipitazione si infiltra e $f(t) = w(t)$;
- (b) $w > K_{hsat}$: In questo caso si rende necessario confrontare l'intensità di precipitazione $w(t)$ con la capacità di infiltrazione del terreno $f(t)$ riportata nell'equazione (35):
 - $w(t) < f(t)$: tutta la pioggia si infiltra e quindi $f(t) = w(t)$;
 - $w(t) > f(t)$: la frazione $f(t)$ di pioggia si infiltra mentre la rimanente parte $w - f(t)$ va a costituire deflusso superficiale. In questo caso la velocità di infiltrazione $f(t)$ viene calcolata mediante l'equazione (35) risolta per tentativi in funzione del volume d'acqua per unità di superficie infiltrato al tempo t , $F(t)$.

Si noti come questa trattazione risulti semplificata rispetto a quella descritta nel paragrafo precedente in quanto nel caso in cui l'intensità di precipitazione sia maggiore della conduttività idraulica satura essa non considera il time of ponding. Si assume che il tempo richiesto per saturare lo strato superficiale del terreno t_p sia trascurabile, sovrastimando dunque la porzione di precipitazione che defluisce superficialmente di una quantità pari a $w \cdot t_p$.

2. $z_f(t) \geq \Delta Z$: In questo caso lo strato collaborante del terreno è già saturo e quindi tutta la precipitazione che cade è efficace in termini di deflusso superficiale.

Il volume di acqua che si infiltra nel suolo, in parte concorre a formare il deflusso sub-superficiale ed in parte contribuisce a ricaricare la falda (vedi Figura B-20). Il modello implementato considera il vuotamento gravitativo dello strato collaborante ipotizzando non nulla la sola componente verticale di velocità dell'acqua nel mezzo insaturo. Tale ipotesi, alla luce di recenti studi [12] [13],

appare lecita sia in terreni tipicamente pianeggianti sia in zone montuose se si considera quale strato collaborante di terreno la sola zona insatura presente al di sopra dello strato roccioso profondo.

Su terreni ad elevata permeabilità è inoltre possibile considerare uniforme il contenuto d'acqua del suolo all'interno dello strato più superficiale di terreno[14]; la velocità di filtrazione risulterà pertanto governata dalla legge di Darcy (Eq. 17) con gradiente unitario :

$$v = K_h(\theta) \quad (39)$$

La percolazione dell'acqua verso gli strati più profondi di terreno è stata pertanto così valutata stimando la permeabilità del terreno in condizioni non sature secondo la relazione proposta da Clapp e Hornberger[11] :

$$K_h(\theta) = K_{hsat} \left(\frac{\theta}{\phi} \right)^c. \quad (40)$$

dove $c \cong 2b+3$ ed il parametro b è funzione delle caratteristiche granulometriche del suolo.

La descrizione dei meccanismi che governano il trasferimento dell'acqua infiltrata alle locali reti di drenaggio (naturali o artificiali) rappresenta un elemento di notevole incertezza in campo modellistico, data la notevole complessità dei meccanismi fisici in atto [12] fortemente influenzati dalle caratteristiche geopedologiche e topografiche delle aree analizzate. La differente conformazione dei suoli che contraddistingue le zone montane dalle aree di pianura si traduce in una eterogeneità delle modalità di risposta dei versanti in termini di deflusso sub-superficiale.

Il modello implementato ipotizza che solamente una porzione dei volumi percolati negli strati più profondi di terreno venga trasferita alle adiacenti reti di drenaggio. Tale frazione viene considerata uniforme su ciascuna macroarea e invariante nel tempo.

La trattazione modellistica proposta appare certamente limitativa tendendo a descrivere in maniera analoga processi fisici distinti e non stazionari. D'altro

canto ci si è basati sull'esperienza acquisita nell'applicazione di analoghi modelli per la descrizione della risposta idrologica di bacini idrografici montani e di pianura [15] [16] [18] [17] nei quali si è evidenziata comunque l'affidabilità e la robustezza del modello sviluppato.

Le ipotesi effettuate, certamente limitative e fortemente semplificatrici, non appaiono tuttavia, in prima istanza, irragionevoli al fine di ottenere una preliminare analisi di alcuni scenari quale obiettivo della presente tesi.

La procedura implementata può pertanto essere riassunta mediante il seguente schema:

1. $z_f(t) < \Delta Z$:

(a) $w(t) < K_{hsat}$:

$$\begin{aligned} - \theta(t) \leq \theta_{FC}: & \quad h_{pr} = 0; \\ - \theta(t) > \theta_{FC}: & \quad h_{pr} = \eta \cdot w(t). \end{aligned}$$

(b) $w(t) \geq K_{hsat}$:

i. $w(t) < f(t)$:

$$\begin{aligned} - \theta(t) \leq \theta_{FC}: & \quad h_{pr} = 0; \\ - \theta(t) > \theta_{FC}: & \quad h_{pr} = \eta \cdot w(t). \end{aligned}$$

ii. $w(t) \geq f(t)$:

$$\begin{aligned} - \theta(t) \leq \theta_{FC}: & \quad h_{pr} = 0; \\ - \theta(t) > \theta_{FC}: & \quad h_{pr} = \eta \cdot f(t). \end{aligned}$$

2. $z_f(t) \geq \Delta Z$:

$$h_{pr} = 0.$$

L'approccio di Green-Ampt è alla base del modello numerico che valuta la separazione dei deflussi nella zona di interesse. I parametri da stimare, richiesti in ingresso da tale codice, sono la conduttività idraulica satura K_{hsat} , lo spessore dello strato collaborante ΔZ e il contenuto d'acqua iniziale θ_0 . Si descrive nel seguito il modello idrologico sviluppato per il calcolo del termine di evapotraspirazione e le modalità con cui tali parametri sono stimati.

B.3.7 L'evapotraspirazione: il modello FAO

L'evaporazione è il processo attraverso il quale l'acqua superficiale viene evaporata e quindi trasferita all'atmosfera. Se l'evaporazione avviene da una superficie d'acqua o direttamente dal suolo il processo è propriamente detto evaporazione. Se invece l'evaporazione avviene attraverso gli 'stoma', minuscole aperture sulla superficie delle foglie, il processo è chiamato traspirazione. Tre importanti condizioni sono necessarie affinché l'evapo-traspirazione (il processo combinato di evaporazione e traspirazione) possa avvenire:

1. vi deve essere disponibilità d'acqua alla superficie;
2. vi deve essere disponibilità di energia sufficiente a permettere il cambiamento di fase liquido-aeriforme.
3. vi deve essere un meccanismo di trasporto che garantisca l'allontanamento dell'evaporato dalla zona considerata. In mancanza di questo si raggiunge progressivamente una condizione di saturazione dell'atmosfera che impedisce una ulteriore evaporazione.

Fattori meteorologici che influenzano la evapotraspirazione

I fattori meteorologici che determinano la evapotraspirazione sono i flussi radiativi che forniscono l'energia per la vaporizzazione ed i meccanismi di trasporto atmosferico che rimuovono il vapore acqueo dalla superficie di evaporazione.

Radiazione solare I processi di evapotraspirazione sono determinati dalla quantità di energia disponibile; la radiazione solare rappresenta la principale fonte energetica capace di convertire grandi quantità di acqua dallo stato liquido in vapore.

Tale energia, determinata dalla posizione geografica e dal periodo dell'anno, è inoltre dipendente dalla torbidità dell'atmosfera e dalla presenza di nubi che riflettono e assorbono la maggior parte della radiazione.

Temperatura La radiazione solare assorbita dall'atmosfera e il calore emesso dalla terra incrementano la temperatura dell'aria. Il calore sensibile dell'aria trasferisce energia alla superficie ed esercita un controllo sulla evapotraspirazione.

Umidità La differenza tra la pressione del vapore acqueo sulla superficie in cui ha luogo l'evaporazione e l'aria sovrastante è il fattore determinante per la rimozione del vapore. Campi ben irrigati in regioni calde e aride, ad esempio, consumano una grande quantità di acqua a causa di una elevata richiesta atmosferica di evaporazione. Nelle umide regioni tropicali, nonostante l'elevato apporto energetico, l'elevata umidità dell'aria riduce notevolmente l'evapotraspirazione.

Velocità del vento I processi di rimozione del vapore dipendono dal vento e dalle fluttuazioni di velocità turbolente nello strato superficiale d'atmosfera. Se l'aria nello strato prossimo alla superficie non viene continuamente ricambiata, questa tende a raggiungere condizioni di saturazione con una conseguente diminuzione dell'evapotraspirazione.

Evapotraspirazione per la coltura di riferimento

La coltura di riferimento è definita dalla FAO come: *un'ipotetica coltura con un'altezza di 0.12 m, una resistenza fissata $r_{sv} = 70 s m^{-1}$ ed un albedo pari a 0.23*, il cui comportamento è influenzato dai soli parametri climatici. L'evapotraspirazione riferita a tale coltura è indicata con ET_0 .

Equazione di Penman-Monteith

Nel 1948 Penman combinò il bilancio di energia con il metodo di trasferimento di massa ottenendo una equazione per calcolare l'evaporazione da una superficie d'acqua in condizioni standardizzate di illuminazione, temperatura, umidità e velocità del vento. Successivi sviluppi hanno permesso di determinare formulazioni per estendere il calcolo a superfici coltivate.

La combinazione più nota è l'equazione di Penman-Monteith:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{\rho c_p}{r_a} [e^* - e_a]}{\gamma(1 + \frac{r_{sv}}{r_a}) + \Delta} \quad (41)$$

dove R_n è la radiazione netta, G il flusso di calore del terreno, $(e_s - e_a)$ rappresenta il deficit di pressione di vapore nell'aria rispetto alla saturazione, ρ è la densità media dell'aria a pressione costante, c_p è il calore specifico dell'aria, Δ rappresenta la pendenza della curva della pressione di vapore in funzione della temperatura, γ è la costante psicometrica ed r_s e r_a sono rispettivamente la resistenza della superficie ed aerodinamica.

Resistenza atmosferica e superficiale Il trasferimento di calore dalla superficie di evaporazione all'atmosfera è determinata dalla resistenza aerodinamica:

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{z_v - d}{z_{om}} \right] \ln \left[\frac{z_h - d}{z_{oh}} \right]}{k^2 \bar{v}(z_v)} \quad (42)$$

dove z_v , è l'altezza alla quale viene misurata la velocità del vento, z_{om} è la lunghezza d'attrito per il trasporto di quantità di moto, z_h è l'altezza alla quale è misurata l'umidità, z_{oh} la lunghezza d'attrito per il trasporto di vapore e $\bar{v}(z_v)$ è la velocità del vento misurata.

La resistenza dovuta al suolo e alla traspirazione può essere espressa come:

$$r_s = \frac{r_l}{LAI_a} \quad (43)$$

dove LAI_a è il Leaf Area Index attivo, indice dell'area delle foglie che effettivamente contribuisce allo scambio superficiale di calore e di vapore, generalmente

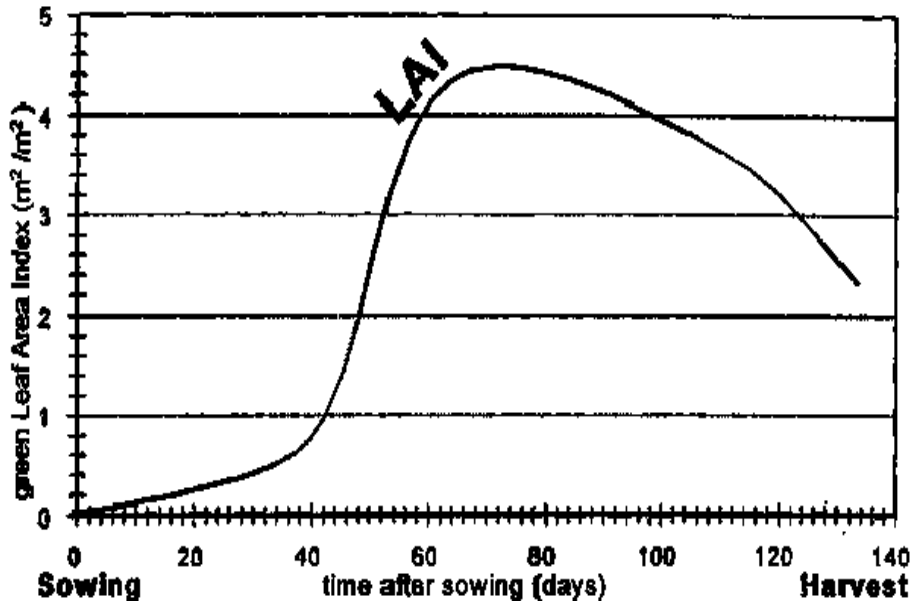


Figura B-28: *Variazione tipica del LAI attivo durante il periodo di crescita del mais.*

calcolato rispetto alla porzione superiore della superficie vegetale illuminata dal sole. Tale parametro, definito dal rapporto tra l'area delle foglie (con riferimento al solo lato superiore) per unità di area del suolo sottostante (LAI), dipende dal tipo di coltura e dallo stadio di maturazione raggiungendo il valore massimo in prossimità del periodo di fioritura. Un'espressione generale per LAI_a è:

$$LAI_a = 0.5 LAI \quad (44)$$

che assume che solo la metà superiore della coltura contribuisca attivamente allo scambio di calore e vapore.

Radiazione La radiazione netta incidente è data dalla somma tra la radiazione solare netta e la radiazione termica atmosferica incidente cui si sottrae la radiazione termica emessa dalla superficie:

$$R_n = (1 - \alpha)R_s + R_l - R_{nl}$$

Il modello FAO

Dall'originale equazione di Penman-Monteith e dalle equazioni della resistenza aerodinamica e colturale è stata ricavata l'equazione FAO Penman-Monteith :

$$\lambda ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{\epsilon\lambda}{208R_d} \frac{\gamma u_2}{T} [e^* - e_a]}{\gamma(1 + 0.34 u_2) + \Delta} \quad (45)$$

Procedura di calcolo

Pressione atmosferica

$$P = 101300 \left(\frac{293 - 0.0065 z}{293} \right)^{5.26}$$

fornisce valori in Pascal in funzione della quota z rispetto al livello del mare.

Calore latente di vaporizzazione

Esprime l'energia richiesta per trasformare una unità di massa d'acqua dallo stato liquido in vapore a temperatura e pressione costante: $\lambda = 2.45 \cdot 10^6 J kg^{-1}$

Costante psicometrica

La costante psicometrica è data da:

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda}$$

dove $c_p = 1.013 \cdot 10^3 J kg^{-1} \cdot K^{-1}$ e $\epsilon = 0.622$.

Pressione parziale di vapore alla saturazione

$$e^0(T) = 0.6108 \exp\left[\frac{17.27T}{T + 237.3}\right] \quad (46)$$

dove $e^0(T)$ rappresenta la pressione di vapore dell'aria alla temperatura T[kPa].

La pressione di vapore media giornaliera può essere calcolata come media tra i valori assunti in corrispondenza alla temperatura minima e massima.

$$e^* = \frac{e^*(T_{max}) + e^*(T_{min})}{2}$$

Pendenza della curva della pressione di vapore alla saturazione

$$\Delta = \frac{4098[0.6108 \exp(\frac{17.27T}{T+237.3})]}{(T + 237.3)^2} \quad (47)$$

dove Δ è la pendenza della curva della pressione di vapore alla saturazione alla temperatura T [$kPa^\circ C^{-1}$], T temperatura dell'aria [$^\circ C$].

Pressione parziale di vapore

Se non sono disponibili misure di e_a , questa può essere stimata sulla base delle misure di umidità relativa minima e massima:

$$e_a = \frac{e^*(T_{max})RH_{min}/100 + e^*(T_{min})RH_{max}/100}{2}$$

Radiazione extraterrestre

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (48)$$

dove

R_a radiazione extraterrestre rappresenta la quantità di energia che giunge su di una ipotetica superficie esterna all'atmosfera [$MJm^{-2}day^{-1}$], G_{sc} costante solare = $0.0820 MJm^{-2}min^{-1}$, d_r inverso della distanza relativa sole-terra, φ latitudine [rad].

$$d_r = 1 + 0.033 \cos(\frac{2\pi J}{365}) \quad (49)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}[-tg(\phi)tg(\delta)] \quad (50)$$

$$\delta = 0.409 \sin(\frac{2\pi}{365}D - 1.39) \quad (51)$$

Radiazione netta solare

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_s \quad (52)$$

dove R_s è la radiazione solare misurata [$MJm^{-2}day^{-1}$] e α l'albedo.

Radiazione netta di onda lunga

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{max}^4 + T_{min}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{s0}} - 0.35 \right) \quad (53)$$

dove $\sigma = 5.5576 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{K}^{-4}$ e:

$$R_{s0} = (0.75 + 2 \cdot 10^{-5} z) R_a \quad (54)$$

Radiazione netta totale

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (55)$$

Flusso di calore terrestre

Esistono modelli complessi per descrivere il flusso di calore terrestre. Dato che questo flusso è particolarmente piccolo se confrontato con la radiazione netta, soprattutto quando la superficie è coperta dalla vegetazione, si può ragionevolmente assumere per passi temporali giornalieri $G = 0$.

Evapotraspirazione per le diverse colture

Gli effetti della variazione delle condizioni climatiche sull'evapo-traspirazione sono messi in conto nel calcolo di ET_0 ; gli effetti delle diverse caratteristiche che distinguono le colture sono integrati nel coefficiente colturale.

L'evapotraspirazione è generalmente calcolata come:

$$ET_c = k_c \cdot ET_0 \quad (56)$$

La FAO propone due differenti approcci a seconda del numero di coefficienti colturali utilizzati nel calcolo di k_c e quindi di ET. Il presente utilizza il metodo a due coefficienti colturali al fine di considerare i due differenti contributi di evaporazione e di traspirazione. Si ha quindi:

$$k_c = k_{cb} + k_e \quad (57)$$

dove k_{cb} è un coefficiente riferito alla coltura mentre k_e è un coefficiente di evaporazione dal suolo.

Si noti come la somma dei due non possa mai eccedere un valore massimo determinato dall'energia disponibile e come il calcolo del coefficiente k_e richieda un bilancio giornaliero di volume per la determinazione del contenuto d'acqua nello strato collaborante del terreno. Si ottiene quindi:

$$ET_c = (k_{cb} + k_e)ET_0 \quad (58)$$

Componente di traspirazione

Il coefficiente colturale integra gli effetti delle caratteristiche che distinguono una coltura da quella di riferimento.

A causa delle differenze di albedo, altezza della pianta, resistenza aerodinamica, proprietà degli stomata e delle foglie, la traspirazione da una coltura che ricopre interamente il suolo differisce da quella di riferimento. Anche le diverse caratteristiche vegetative delle piante durante il ciclo di vita influenzano la risposta evaporativa delle stesse, così che nei diversi periodi dell'anno l'influenza colturale risulta differente.

Mediante degli abachi è possibile ricavare i valori del coefficiente k_{cb} durante le varie fasi di crescita e la durata delle stesse mediante le quali si giunge alla costruzione della curva del K_{cb} come esemplificato in figura B-29. Da questa, in relazione al giorno corrente si determina facilmente il coefficiente ad esso corrispondente.

I valori di k_{cbmid} e k_{cbend} , nel caso in cui l'umidità relativa giornaliera differisca da 45% o la velocità del vento sia diversa da $2m/s$, devono essere corretti mediante la:

$$k_{cb} = k_{cb(tab)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)]\left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (59)$$

Componente di evaporazione

Dove la superficie è secca k_e tende a zero e non rimane acqua sulla superficie disponibile per la evaporazione. Quando la parte superficiale del terreno è bagnata, in seguito ad una pioggia o ad irrigazione, k_e è massimo, non potendo tuttavia

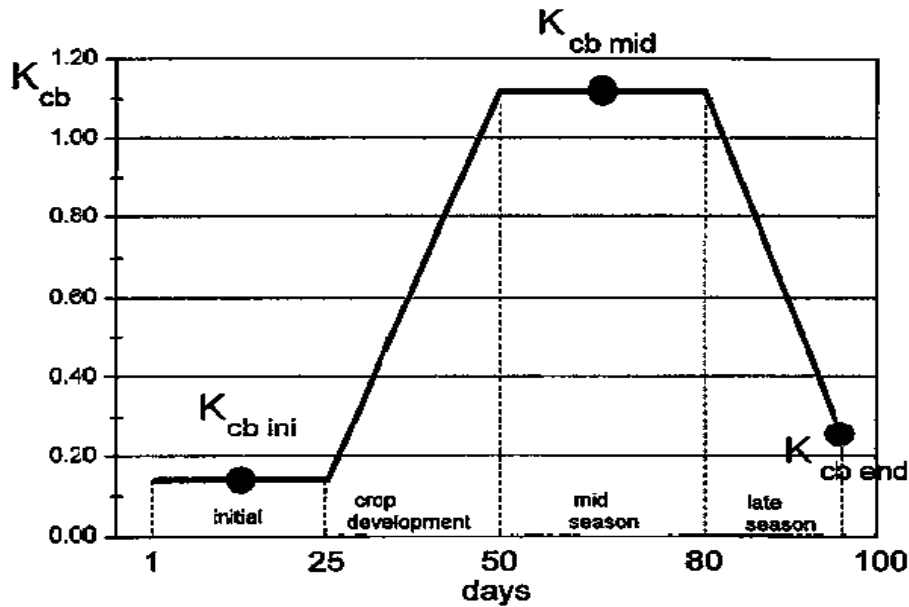


Figura B-29: Costruzione della curva del coefficiente k_{cb} per la soia utilizzando lunghezze delle fasi di crescita di 25, 25, 30 e 20 giorni.

superare il valore massimo determinato dall'energia disponibile. Quando la parte superficiale si secca meno acqua è disponibile per l'evaporazione e questa si riduce in proporzione alla quantità d'acqua rimanente nello strato collaborante:

$$k_e = k_r(k_{cmax} - k_{cb}) \leq (f_{ew}k_{cmax}) \quad (60)$$

dove k_e coefficiente di evaporazione del suolo, k_{cb} coefficiente colturale, k_{cmax} massimo valore di k_c in seguito ad una pioggia o ad irrigazione, k_r coefficiente adimensionale di riduzione dell'evaporazione dipendente dalla profondità nel suolo dell'acqua che evapora, f_{ew} frazione di suolo che è esposta e bagnata.

$$k_{cmax} = \max(\{1.2 + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)](\frac{h}{3})^{0.3}\}, \{k_{cb} + 0.05\}) \quad (61)$$

dove h rappresenta la massima altezza della pianta durante il periodo considerato.

Quando la quantità d'acqua nello strato superficiale di terreno diviene limitante k_r decresce fino a zero quando il suolo è stato svuotato.

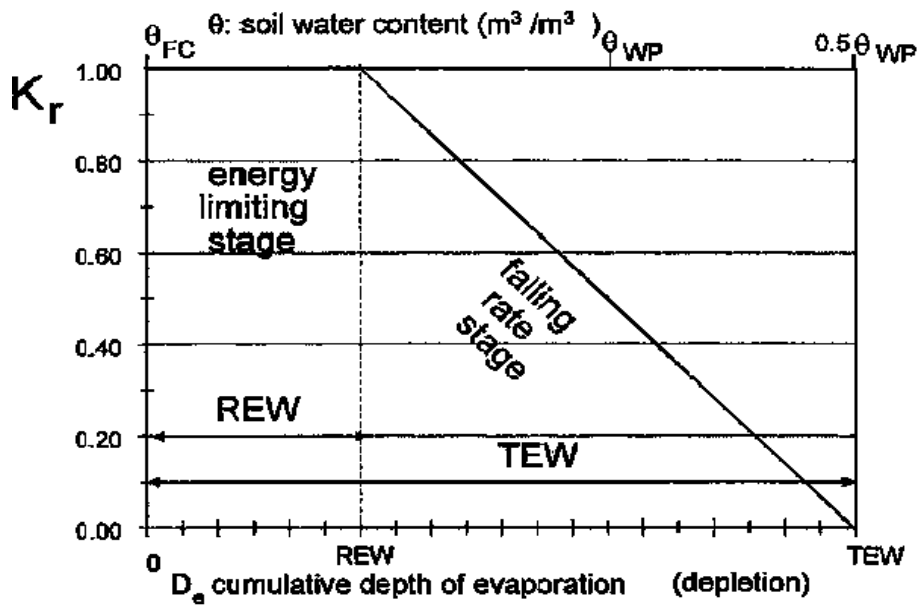


Figura B-30: Diagramma per la determinazione del coefficiente k_r .

La quantità d'acqua che può essere allontanata per evaporazione può essere stimata mediante:

$$TEW = 1000(\theta_{FC} - 0.5\theta_{WP})Z_e \quad (62)$$

dove θ_{FC} contenuto d'acqua oltre il quale questa non può più essere allontanata per gravità, θ_{WP} contenuto d'acqua al punto di appassimento delle piante, Z_e profondità dello strato di suolo che è soggetta ai processi evaporativi.

Infine la frazione di suolo esposta all'evaporazione è data da:

$$f_{ew} = 1 - f_c \quad (63)$$

dove f_c è la porzione di territorio coperta dalla vegetazione.

Traspirazione in condizioni di stress idrico

Le forze che agiscono sul suolo decrescono il suo potenziale di energia e diminuiscono la capacità di estrazione dell'acqua da parte delle piante. Quando il

suolo è bagnato l'acqua ha un alto potenziale di energia, è relativamente libera di muoversi ed è facilmente catturabile dalle radici delle piante. In suoli secchi l'acqua ha un basso potenziale di energia ed è fortemente vincolata alla matrice solida essendo quindi meno facilmente estraibile.

Quando l'energia potenziale dell'acqua nel suolo scende al di sotto di un determinato valore la coltura entra in condizioni di stress idrico. Gli effetti possono essere descritti moltiplicando il coefficiente k_{cb} per un coefficiente di stress k_s .

TAW La disponibilità d'acqua del suolo si riferisce alla capacità di quest'ultimo di trattenere l'acqua e renderla disponibile per le piante. La capacità di campo indica la quantità di acqua che il suolo trattiene contro le forze di gravità. In assenza di un ulteriore apporto, dopo il superamento di tale limite, l'acqua rimanente nello strato collaborante viene ridotta per effetto della suzione imputabile alle piante. Mano a mano che questa diminuzione procede l'acqua viene legata alle particelle di terreno sempre più fortemente rendendosi disponibile alla vegetazione in minor quantità e con un maggior dispendio energetico. L'estrazione si arresta quando la vegetazione raggiunge il punto di appassimento, nella fase precedente a questo le piante riducono progressivamente la loro attività fotosintetica chiudendo gli stomi e adottando in sostanza un meccanismo di auto-sopravvivenza mediante la conservazione delle loro risorse energetiche. La quantità d'acqua disponibile alle colture ('Total Available Water', TAW) è dunque:

$$TAW = 1000(\theta_{FC} - \theta_{WP})Z_e \quad (64)$$

Coefficiente di stress idrico Gli effetti della scarsità d'acqua per la coltura vengono descritti mediante una riduzione del valore del coefficiente colturale considerando una costante moltiplicativa di stress k_s che può essere determinata come mostrato in figura B-31.

$$\theta_T = \theta_{FC} - (\theta_{FC} - 0.5\theta_{WP})\frac{RAW}{TEW} \quad (65)$$

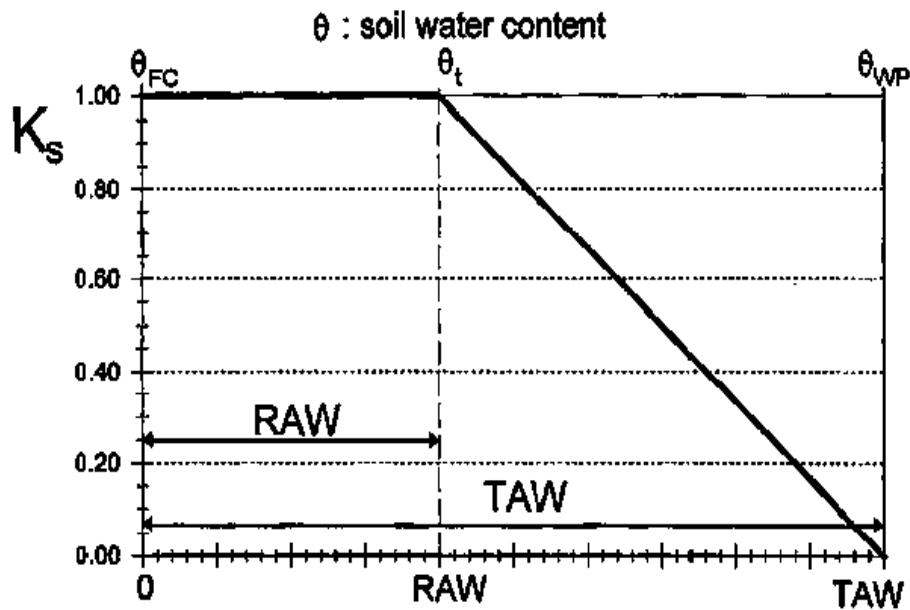


Figura B-31: Diagramma per la determinazione del coefficiente k_s .

RAW Rappresenta la profondità massima alla quale l'acqua può essere estratta dal sottosuolo senza subire restrizioni eccetto che per l'energia disponibile.

B.2.8 Accoppiamento del modello di evapotraspirazione con il modulo di Green-Ampt per la separazione dei deflussi

Ai fini della formulazione di un modello di infiltrazione è necessario l'accoppiamento del modello di separazione dei deflussi (approccio di Green-Ampt) con un modulo di calcolo della evapotraspirazione per l'aggiornamento del contenuto d'acqua nel terreno e per la valutazione dei volumi d'acqua che vengono sottratti al deflusso profondo. Si procede, innanzi tutto, all'implementazione numerica del modello FAO Penman- Monteith: tale modello fornisce, in funzione dei dati climatologici, l'evapotraspirazione giornaliera.

Si distingue poi tra giorni piovosi e giorni non piovosi: tale distinzione serve per discriminare l'esecuzione di due distinte procedure: una che mediante il meto-

do di Green-Ampt, separa le precipitazione ripartendola in deflusso superficiale e ipodermico; la seconda invece considera solamente l'azione dell'evaporazione nell'aggiornare il contenuto d'acqua del suolo per riprodurre correttamente le condizioni iniziali di un successivo evento.

Modulo di Green-Ampt Il modello di produzione del deflusso é nel dettaglio illustrato nel paragrafo 5.2.3. Per quanto concerne la pioggia infiltrata si deve tener conto dei volumi sottratti per evaporazione che non partecipano più a questo processo. Per ottemperare a tale esigenza si procede a decrementare il volume defluito in ciascun istante mediante il seguente schema:

$$1. \theta(t) \geq \theta_{FC}:$$

$$(a) V_{evapo} \leq fp: \quad h_{pr1} = -V_{evapo};$$

$$(b) V_{evapo} > fp: \quad h_{pr1} = -fp;$$

$$2. \theta(t) < \theta_{FC}: \quad h_{pr1} = 0.$$

dove

- V_{evapo} rappresenta il volume di acqua che abbandona il terreno in un secondo per effetto della evapotraspirazione [mm/s];

- $\theta(t)$ contenuto d'acqua nel terreno all'istante attuale;

- θ_{FC} capacità di campo;

- fp volume di acqua che abbandona il terreno in un secondo per effetto dello svuotamento gravitativo [mm/s];

- h_{pr1} volume d'acqua che nell'unità di tempo viene sottratto al deflusso profondo [mm/s].

La grandezza fp viene calcolata ad ogni passo temporale come convoluzione di tutti i termini di precipitazione infiltratisi negli istanti precedenti. Questo viene fatto nell'ipotesi di una modellazione dello svuotamento del terreno come serbatoio lineare.

Il contenuto d'acqua nel terreno viene quindi aggiornato ad ogni passo temporale mediante il termine di infiltrazione, quello di deflusso profondo ed infine quello evaporativo:

$$fa(t) = fa(t - 1) + I(t) * dt - fp * dt - V_{evapo} * dt \quad (66)$$

$$\theta(t) = \frac{fa(t) + fa_{in}}{Z} \quad (67)$$

dove

- $fa(t)$ volume d'acqua invasato nel terreno all'istante attuale [mm];
- fa_{in} volume d'acqua invasato nel terreno all'inizio della giornata [mm];
- $I(t)$ termine di infiltrazione nel terreno determinato come descritto alla sezione precedente [mm/s];
- dt passo temporale di calcolo [s];
- Z spessore dello strato collaborante [mm].

Il contenuto d'acqua nel terreno a fine giornata costituisce il termine di scambio tra i due moduli, in base a questo viene calcolata la evapotraspirazione nel giorno successivo ipotizzando che questa abbia un valore costante durante le 24 ore.

Modulo di evapotraspirazione Lo schema adottato è esattamente identico a quello precedentemente descritto con l'unica differenza nell'aggiornamento del contenuto d'acqua nel quale non compare il termine di infiltrazione essendo nulla la precipitazione.

Una volta realizzata la separazione dei deflussi vengono forniti in input al modello i termini di precipitazione efficace e profonda essendo quest'ultima definita come:

$$prof = h_{pr} + h_{pr1} \quad (68)$$

essendo h_{pr} e h_{pr1} determinati come descritto rispettivamente alle sezioni 5.2.3

e 5.2.3, in questo modo si sottrae al deflusso profondo il volume che evaporando non può più defluire.

La ripartizione in due distinte procedure è stata effettuata anche per valutare l'influenza della evapotraspirazione nei giorni di pioggia.

Appendice C: Schede monografiche delle cave idonee alla ricarica della falda

	COMUNE	LOCALITÀ	DITTA
1	Marano Vicentino	Vegri	Comune Marano
2	Marano Vicentino	Brogiane	Vaccari S.p.A.
3	Marano Vicentino	Vianelle	EGI Zanotto
4	Zanè	Colombara-Bai	Betonrossi S.p.A.
5	Sarcedo	Giberte	Adige Bitumi S.p.A.
6	Thiene	Ranzolin-Rozzampia	SIG S.p.A.
7	Thiene	Ranzolin	Calcestruzzi S.p.A.
8	Sarcedo	Casoni	Girardini S.p.A.
9	Sarcedo	Quartieri	SIG S.p.A.
10	Montecchio Precalcino	Igna-Levà-Ferraro	Carta Isnardo
11	Montecchio Precalcino	Campassi-Palugara	F.Ili Rigon
12	Montecchio Precalcino	Campassi-Cavedagnona	Seganfredo
13	Montecchio Precalcino	S. Francesco	Guarda
14	Montecchio Precalcino	Vignole	Martini S.p.A.
15	Montecchio Precalcino	Vegre	Girardini S.p.A.

1. CAVA VEGRI



DATI GENERALI

COMUNE: Marano Vicentino

DITTA: Sindaco Pro Tempore

PROVVEDIMENTI AUTORIZZATIVI

N° PRIMA AUTORIZZAZIONE: 5884

DATA: 18/11/1980

N° ULTIMO DECRETO: 3610

DATA: 12/11/2004

TIPOLOGIA: ampliamento in
profondità e revoca
DGR 5884/90

TERMINI

SCADENZA ESTRAZIONE: 31/12/2007

SCADENZA SISTEMAZIONE: 31/12/2007

STATO ATTUALE

STATO CAVA: parzialmente dismessa

STATO ATTIVITA': parzialmente estinta

CARATTERISTICHE

AREA: 97832 m²

QUOTA PIANO CAMPAGNA: 164.83 m s.l.m.m.

PROFONDITA' DELLO SCAVO: 20 m

FONDO CAVA: in parte discarica

DISCARICA: in parte

PROFONDITA' DELLA FALDA DAL FONDO CAVA: 55 m

PROFONDITA' MAX FALDA: 113.36 m s.l.m.m. **PROFONDITA' MIN FALDA:** 103.83 m s.l.m.m.

VINCOLI: no

2. CAVA BROGIANE



DATI GENERALI

COMUNE: Marano Vicentino **DITTA:** Vaccari S.p.A.

PROVVEDIMENTI AUTORIZZATIVI

N° PRIMA AUTORIZZAZIONE: 5344 **DATA:** 01/01/1983
N° ULTIMO DECRETO: 286 **DATA:** 03/10/1985 **TIPOLOGIA:** proroga, integrazione
e modifica DGR
3670/98

TERMINI

SCADENZA ESTRAZIONE: 31/12/2008 **SCADENZA SISTEMAZIONE:** 31/12/2008

STATO ATTUALE

STATO CAVA: attiva **STATO ATTIVITA':** in coltivazione

CARATTERISTICHE

AREA: 143231 m²

QUOTA PIANO CAMPAGNA: 156.61 m s.l.m.m.

PROFONDITA' DELLO SCAVO: 20 m **FONDO CAVA:** cumuli materiale

DISCARICA: no

PROFONDITA' DELLA FALDA DAL FONDO CAVA: 65 m

PROFONDITA' MAX FALDA: 101.24 m s.l.m.m. **PROFONDITA' MIN FALDA:** 86.34 m s.l.m.m.

VINCOLI: no

3. CAVA VIANELLE



DATI GENERALI

COMUNE: Marano-Thiene

DITTA: EGI Zanotto

PROVVEDIMENTI AUTORIZZATIVI

N° PRIMA AUTORIZZAZIONE: 1607 **DATA:** 01/01/1985

N° ULTIMO DECRETO: 292 **DATA:** 01/01/2001 **TIPOLOGIA:** estinzione parziale

TERMINI

SCADENZA ESTRAZIONE: 31/12/2006 **SCADENZA SISTEMAZIONE:** 31/12/2006

STATO ATTUALE

STATO CAVA: parzialmente dismessa **STATO ATTIVITA':** parzialmente estinta

CARATTERISTICHE

AREA: 232790 m²

QUOTA PIANO CAMPAGNA: 144.43 m s.l.m.m.

PROFONDITA' DELLO SCAVO: 25 m **FONDO CAVA:** in parte disc. inerti

DISCARICA: discarica inerti in sito

PROFONDITA' DELLA FALDA DAL FONDO CAVA: 50 m

PROFONDITA' MAX FALDA: 79.69 m s.l.m.m. **PROFONDITA' MIN FALDA:** 65.37 m s.l.m.m.

VINCOLI: no

4. CAVA COLOMBARA (BAI)



DATI GENERALI

COMUNE: Zanè

DITTA: Betonrossi S.p.A.

PROVVEDIMENTI AUTORIZZATIVI

N° PRIMA AUTORIZZAZIONE: 4545 **DATA:** 01/01/1981

N° ULTIMO DECRETO: 404 **DATA:** 27/10/2004 **TIPOLOGIA:** proroga

TERMINI

SCADENZA ESTRAZIONE: 31/12/2006 **SCADENZA SISTEMAZIONE:** 31/12/2006

STATO ATTUALE

STATO CAVA: attiva

STATO ATTIVITA': in coltivazione

CARATTERISTICHE

AREA: 123051 m²

QUOTA PIANO CAMPAGNA: 191.53 m s.l.m.m.

PROFONDITA' DELLO SCAVO: 20 m **FONDO CAVA:** sgombro

DISCARICA: no

PROFONDITA' DELLA FALDA DAL FONDO CAVA: 100 m

PROFONDITA' MAX FALDA: 109.7 m s.l.m.m. **PROFONDITA' MIN FALDA:** 102.02 m s.l.m.m.

VINCOLI: no

5. CAVA GIBERTE



DATI GENERALI

COMUNE: Sarcedo

DITTA: Adige Bitumi S.p.A.

PROVVEDIMENTI AUTORIZZATIVI

N° PRIMA AUTORIZZAZIONE: 5208 **DATA:** 01/01/1979

N° ULTIMO DECRETO: 11 **DATA:** 26/01/2004 **TIPOLOGIA:** proroga

TERMINI

SCADENZA ESTRAZIONE: 31/12/2006 **SCADENZA SISTEMAZIONE:** 31/12/2006

STATO ATTUALE

STATO CAVA: attiva

STATO ATTIVITA': in coltivazione

CARATTERISTICHE

AREA: 102361 m²

QUOTA PIANO CAMPAGNA: 124.75 m s.l.m.m.

PROFONDITA' DELLO SCAVO: 30 m **FONDO CAVA:** parte W a uso agricolo

DISCARICA: no

PROFONDITA' DELLA FALDA DAL FONDO CAVA: 30 m

PROFONDITA' MAX FALDA: 82.83 m s.l.m.m. **PROFONDITA' MIN FALDA:** 78.35 m s.l.m.m.

VINCOLI: no

6. CAVA RANZOLIN (ROZZAMPIA)



DATI GENERALI

COMUNE: Thiene

DITTA: S.I.G. S.p.A.

PROVVEDIMENTI AUTORIZZATIVI

N° PRIMA AUTORIZZAZIONE:

DATA:

N° ULTIMO DECRETO:

DATA:

TIPOLOGIA:

TERMINI

SCADENZA ESTRAZIONE:

SCADENZA SISTEMAZIONE:

STATO ATTUALE

STATO CAVA:

STATO ATTIVITA':

CARATTERISTICHE

AREA: 163156 m²

QUOTA PIANO CAMPAGNA: 110.26 m s.l.m.m.

PROFONDITA' DELLO SCAVO: 30 m

FONDO CAVA: cumuli materiale

DISCARICA: no

PROFONDITA' DELLA FALDA DAL FONDO CAVA: 30 m

PROFONDITA' MAX FALDA: 66.64 m s.l.m.m. **PROFONDITA' MIN FALDA:** 68.95 m s.l.m.m.

VINCOLI:

7. CAVA RANZOLIN



DATI GENERALI

COMUNE: Thiene

DITTA: Calcestruzzi S.p.A.

PROVVEDIMENTI AUTORIZZATIVI

N° PRIMA AUTORIZZAZIONE: 2652 **DATA:** 01/01/1978

N° ULTIMO DECRETO: 375 **DATA:** 07/10/2004 **TIPOLOGIA:** estinzione

TERMINI

SCADENZA ESTRAZIONE: 31/12/1988 **SCADENZA SISTEMAZIONE:** 31/12/1988

STATO ATTUALE

STATO CAVA: esaurita

STATO ATTIVITA': estinta

CARATTERISTICHE

AREA: 103119 m²

QUOTA PIANO CAMPAGNA: 107.54 m s.l.m.m.

PROFONDITA' DELLO SCAVO: 30 m **FONDO CAVA:** uso agricolo

DISCARICA: no

PROFONDITA' DELLA FALDA DAL FONDO CAVA: 30 m

PROFONDITA' MAX FALDA: 67.16 m s.l.m.m. **PROFONDITA' MIN FALDA:** 69.94 m s.l.m.m.

VINCOLI: no

8. CAVA CASONI



DATI GENERALI

COMUNE: Sarcedo

DITTA: Girardini S.p.A.

PROVVEDIMENTI AUTORIZZATIVI

N° PRIMA AUTORIZZAZIONE: 1730 **DATA:** 03/04/1979

N° ULTIMO DECRETO: 146 **DATA:** 18/04/2000 **TIPOLOGIA:** proroga

TERMINI

SCADENZA ESTRAZIONE: 31/12/2005 **SCADENZA SISTEMAZIONE:** 31/12/2005

STATO ATTUALE

STATO CAVA: attiva

STATO ATTIVITA': in coltivazione

CARATTERISTICHE

AREA: 153438 m²

QUOTA PIANO CAMPAGNA: 108.76 m s.l.m.m.

PROFONDITA' DELLO SCAVO: 21 m **FONDO CAVA:** cumuli materiale

DISCARICA: no

PROFONDITA' DELLA FALDA DAL FONDO CAVA: 7 m

PROFONDITA' MAX FALDA: 85.5 m s.l.m.m. **PROFONDITA' MIN FALDA:** 83.96 m s.l.m.m.

VINCOLI: paesaggistico ex Galasso

9. CAVA QUARTIERI



DATI GENERALI

COMUNE: Sarcedo

DITTA: S.I.G. S.p.A.

PROVVEDIMENTI AUTORIZZATIVI

N° PRIMA AUTORIZZAZIONE: 1729 **DATA:** 03/04/1979

N° ULTIMO DECRETO: 120 **DATA:** 10/04/2000 **TIPOLOGIA:** proroga

TERMINI

SCADENZA ESTRAZIONE: 31/12/2004 **SCADENZA SISTEMAZIONE:** 31/12/2004

STATO ATTUALE

STATO CAVA: attiva

STATO ATTIVITA': in coltivazione

CARATTERISTICHE

AREA: 121626 m²

QUOTA PIANO CAMPAGNA: 102.93 m s.l.m.m.

PROFONDITA' DELLO SCAVO: 25 m

FONDO CAVA: in parte disc. RSAU
Comunale

DISCARICA: sì

PROFONDITA' DELLA FALDA DAL FONDO CAVA: 10 m

PROFONDITA' MAX FALDA: 74.35 m s.l.m.m. **PROFONDITA' MIN FALDA:** 72.43 m s.l.m.m.

VINCOLI: paesaggistico ex Galasso

10. CAVA LEVA' (FERRARO)



DATI GENERALI

COMUNE: Montecchio Precalcino **DITTA:** Carta Isnardo

PROVVEDIMENTI AUTORIZZATIVI

N° PRIMA AUTORIZZAZIONE: **DATA:**
N° ULTIMO DECRETO: **DATA:** **TIPOLOGIA:**

TERMINI

SCADENZA ESTRAZIONE: **SCADENZA SISTEMAZIONE:**

STATO ATTUALE

STATO CAVA: **STATO ATTIVITA':**

CARATTERISTICHE

AREA: 31484 m²

QUOTA PIANO CAMPAGNA: 83.1 m s.l.m.m.

PROFONDITA' DELLO SCAVO: 8 m **FONDO CAVA:** allagato

DISCARICA: no

PROFONDITA' DELLA FALDA DAL FONDO CAVA: 18 m

PROFONDITA' MAX FALDA: 64.64 m s.l.m.m. **PROFONDITA' MIN FALDA:** 62.45 m s.l.m.m.

VINCOLI:

11. CAVA CAMPASSI (PALUGARA)



DATI GENERALI

COMUNE: Montecchio Precalcino **DITTA:** F.lli Rigon

PROVVEDIMENTI AUTORIZZATIVI

N° PRIMA AUTORIZZAZIONE: 6374 **DATA:** 01/01/1983

N° ULTIMO DECRETO: 9111 **DATA:** 01/01/1988 **TIPOLOGIA:** estinzione

TERMINI

SCADENZA ESTRAZIONE: 31/12/1988 **SCADENZA SISTEMAZIONE:** 31/12/1989

STATO ATTUALE

STATO CAVA: dismessa

STATO ATTIVITA': estinta

CARATTERISTICHE

AREA: 19145 m²

QUOTA PIANO CAMPAGNA: 91.08 m s.l.m.m.

PROFONDITA' DELLO SCAVO: 20 m **FONDO CAVA:** cumuli materiale

DISCARICA: no

PROFONDITA' DELLA FALDA DAL FONDO CAVA: 4 m

PROFONDITA' MAX FALDA: 67.72 m s.l.m.m. **PROFONDITA' MIN FALDA:** 63.22 m s.l.m.m.

VINCOLI: no

12. CAVA CAMPASSI (CAVEDAGNONA)



DATI GENERALI

COMUNE: Montecchio Precalcino **DITTA:** Seganfredo

PROVVEDIMENTI AUTORIZZATIVI

N° PRIMA AUTORIZZAZIONE: 4046 **DATA:** 01/01/1982

N° ULTIMO DECRETO: 66 **DATA:** 01/01/2002 **TIPOLOGIA:** proroga

TERMINI

SCADENZA ESTRAZIONE: 31/12/2004 **SCADENZA SISTEMAZIONE:** 31/12/2004

STATO ATTUALE

STATO CAVA: dismessa

STATO ATTIVITA': da sistemare

CARATTERISTICHE

AREA: 83388 m²

QUOTA PIANO CAMPAGNA: 89.1 m s.l.m.m.

PROFONDITA' DELLO SCAVO: 20 m **FONDO CAVA:** cumuli materiale

DISCARICA: no

PROFONDITA' DELLA FALDA DAL FONDO CAVA: 4 m

PROFONDITA' MAX FALDA: 66.56 m s.l.m.m. **PROFONDITA' MIN FALDA:** 62.98 m s.l.m.m.

VINCOLI: idrogeologico

13. CAVA S. FRANCESCO



DATI GENERALI

COMUNE: Montecchio Precalcino **DITTA:** Guarda

PROVVEDIMENTI AUTORIZZATIVI

N° PRIMA AUTORIZZAZIONE: 4041 **DATA:** 03/08/1982

N° ULTIMO DECRETO: 63 **DATA:** 22/02/2005 **TIPOLOGIA:** nuova intestazione

TERMINI

SCADENZA ESTRAZIONE: 31/12/2006 **SCADENZA SISTEMAZIONE:** 31/12/2006

STATO ATTUALE

STATO CAVA: attiva

STATO ATTIVITA': in coltivazione

CARATTERISTICHE

AREA: 41767 m²

QUOTA PIANO CAMPAGNA: 91.76 m s.l.m.m.

PROFONDITA' DELLO SCAVO: 20 m **FONDO CAVA:** in escavazione

DISCARICA: no

PROFONDITA' DELLA FALDA DAL FONDO CAVA: 12 m

PROFONDITA' MAX FALDA: 66.94 m s.l.m.m. **PROFONDITA' MIN FALDA:** 64.1 m s.l.m.m.

VINCOLI: no

14. CAVA VIGNOLE



DATI GENERALI

COMUNE: Montecchio Precalcino **DITTA:** Martini S.p.A.

PROVVEDIMENTI AUTORIZZATIVI

N° PRIMA AUTORIZZAZIONE: 2775 **DATA:** 21/06/1977
N° ULTIMO DECRETO: 79 **DATA:** 15/03/2004 **TIPOLOGIA:** proroga

TERMINI

SCADENZA ESTRAZIONE: 31/12/2004 **SCADENZA SISTEMAZIONE:** 31/12/2004

STATO ATTUALE

STATO CAVA: attiva **STATO ATTIVITA':** in coltivazione

CARATTERISTICHE

AREA: 136135 m²

QUOTA PIANO CAMPAGNA: 91.76 m s.l.m.m.

PROFONDITA' DELLO SCAVO: 20 m **FONDO CAVA:** uso agricolo

DISCARICA: no

PROFONDITA' DELLA FALDA DAL FONDO CAVA: 10 m

PROFONDITA' MAX FALDA: 66.94 m s.l.m.m. **PROFONDITA' MIN FALDA:** 64.1 m s.l.m.m.

VINCOLI: no

15. CAVA VEGRE



DATI GENERALI

COMUNE: Montecchio Precalcino **DITTA:** Girardini S.p.A.

PROVVEDIMENTI AUTORIZZATIVI

N° PRIMA AUTORIZZAZIONE: 4046 **DATA:** 01/01/1982

N° ULTIMO DECRETO: 4614 **DATA:** 01/01/1982 **TIPOLOGIA:** estinzione

TERMINI

SCADENZA ESTRAZIONE: 31/12/1981 **SCADENZA SISTEMAZIONE:** 09/12/1983

STATO ATTUALE

STATO CAVA: dismessa

STATO ATTIVITA': estinta

CARATTERISTICHE

AREA: 34189 m²

QUOTA PIANO CAMPAGNA: 88.64 m s.l.m.m.

PROFONDITA' DELLO SCAVO: 20 m **FONDO CAVA:** ricomposto ad uso agricolo

DISCARICA: no

PROFONDITA' DELLA FALDA DAL FONDO CAVA: 3 m

PROFONDITA' MAX FALDA: 66.21 m s.l.m.m. **PROFONDITA' MIN FALDA:** 63.21 m s.l.m.m.

VINCOLI:

TAVOLA 1 SITI ESTRATTIVI DELL'ALTO VICENTINO

0 1000 2000 3000 4000 Meters

NUMERO	COMUNE	LOCALITA'	DITTA	DISCARICA
1	Santorso	Colombare	Pierantoni Spa	
2	Santorso	Colombare	Pierantoni Spa	
3	Schio	Macchiavella	Ruaro-Dal Santo	D
4	Marano Vic.no	Vegni	Comune Marano	D
5	Marano Vic.no	Brogiane	Vaccari Spa	
6	Marano-Thiene	Vianelle	EGI Zanotto	D
7	Marano Vic.no	Villaraspa	Dal Santo F.lli	D
8	Zanè	Colombara (Bai)	Betonrossi Spa	
9	S. Vito Leguzzano	Proe	Grotto Sergio	
10	Malo	Rivalta	Grotto Adriano	
11	Malo	Sorano	Grotto Adriano	
12	Malo	Sorano	Grotto Adriano	
13	Malo	Casette Pisa	Comune Malo	D
14	Malo	Ca' Crosara		
15	Sarcedo	Giberte	Adige Bitumi Spa	
16	Thiene	Ca' Orecchiona	EGI Zanotto	D
17	Thiene	Ranzolin	S.I.G. Spa	
18	Thiene	Ranzolin	Calcestruzzi Spa	
19	Zugliano	Molini	Selgea+Calcestr.	
20	Fara Vicentino	Isola	Selgea+Calcestr.	
21	Sarcedo	Casoni	Girardini Spa	
22	Sarcedo	Quartieri	S.I.G. Spa	D
23	Montecchio Prec.	Levè (Ferraro)	Carta Isnardo	
24	Montecchio Prec.	Campassi	F.lli Rigon	
25	Montecchio Prec.	Campassi	Seganfredo	
26	Montecchio Prec.	S. Francesco	Guarda	
27	Montecchio Prec.	Vignole	Martini Spa	
28	Montecchio Prec.	Vegre	Girardini Spa	
29	Montecchio Prec.			D
30	Montecchio Prec.	Preara	Vaccari Spa	
31	Montecchio Prec.	Levè	Carta Isnardo	D
31	Montecchio Prec.	Levè	Carta Isnardo	D
32	Montecchio Prec.	Campassi	Thiene Giacomo	
33	Montecchio Prec.	Terraglioni	EGI Zanotto	
34	Montecchio Prec.	Terraglioni	EGI Zanotto	D
35	Montecchio Prec.	Terraglioni	EGI Zanotto	D
36	Montecchio Prec.	Terraglioni	EGI Zanotto	
37	Montecchio Prec.	Selgaroni	Amn.ne Prov.le	
38	Montecchio Prec.	Selgaroni	Amn.ne Prov.le	
39	Montecchio Prec.	Selgaroni	Amn.ne Prov.le	
40	Montecchio Prec.	Selgaroni	Amn.ne Prv.le	
41	Montecchio-Dueville	Grumello	Panozzo	
42	Montecchio Prec.	Ca' Fusato	Doppiieri	
43	Montecchio-Dueville	Astichello	Gallo+Cooperativ	
44	Dueville	Astichello	Gallo+Cooperativ	
45	Montecchio Prec.	Bentivoglio	SIG Spa	
46	Montecchio Prec.	Bentivoglio	SIG Spa	
47	Dueville-Sandrigo	Giaroni	SIG Spa	
48	Sandrigo-Breganze	Mirabella	Girardini Spa	
49	Sandrigo	Termini	S.I.G. Spa	
50	Breganze	Mirabella	Vaccari Spa	
51	Breganze	Mirabella	Girardini Spa	

idonei per la ricarica della falda
 idonei per la laminazione delle piene

Legenda

- Cave con presenza di discarica
- Cave idonee per la laminazione
- Cave idonee per la ricarica

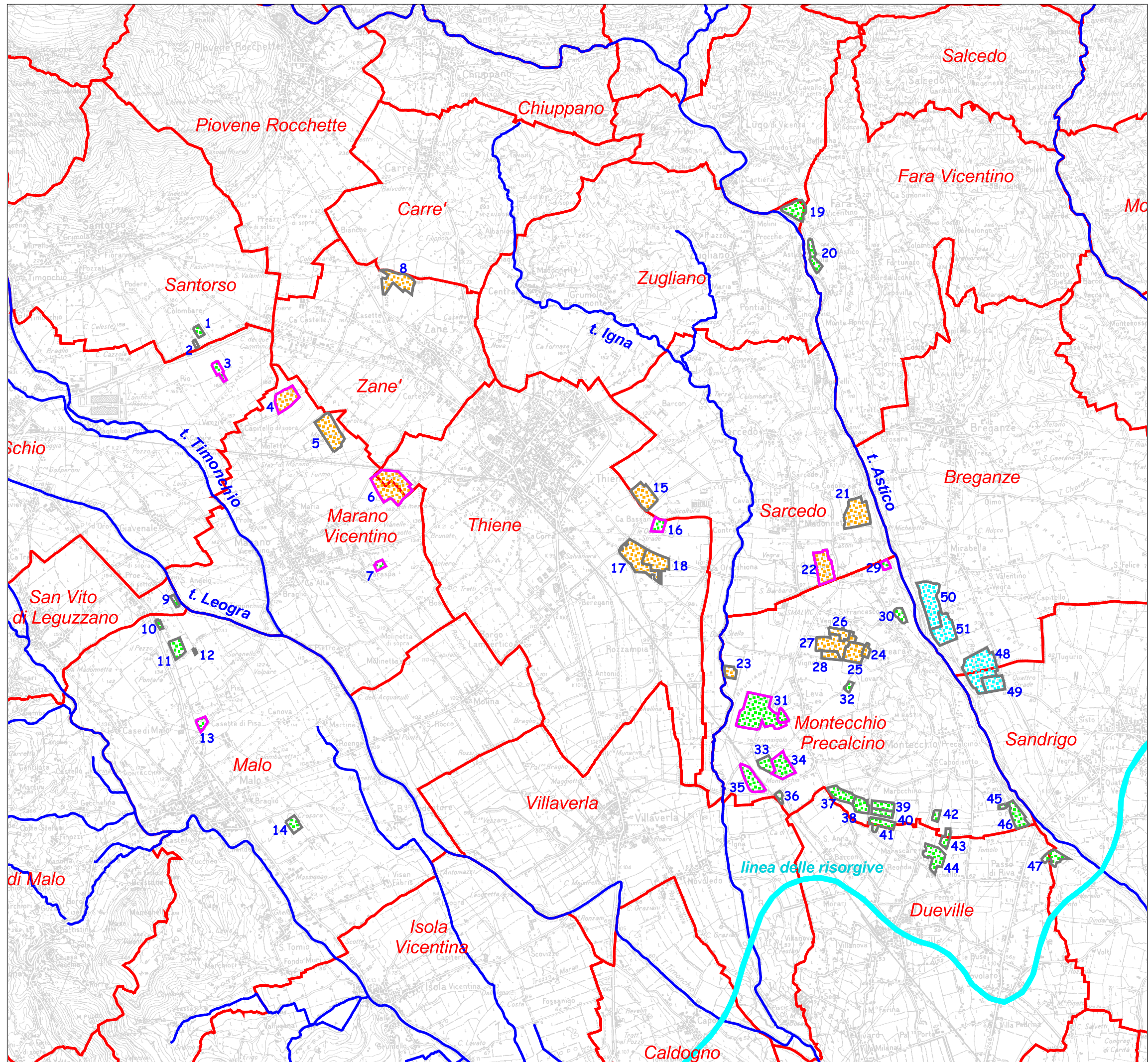
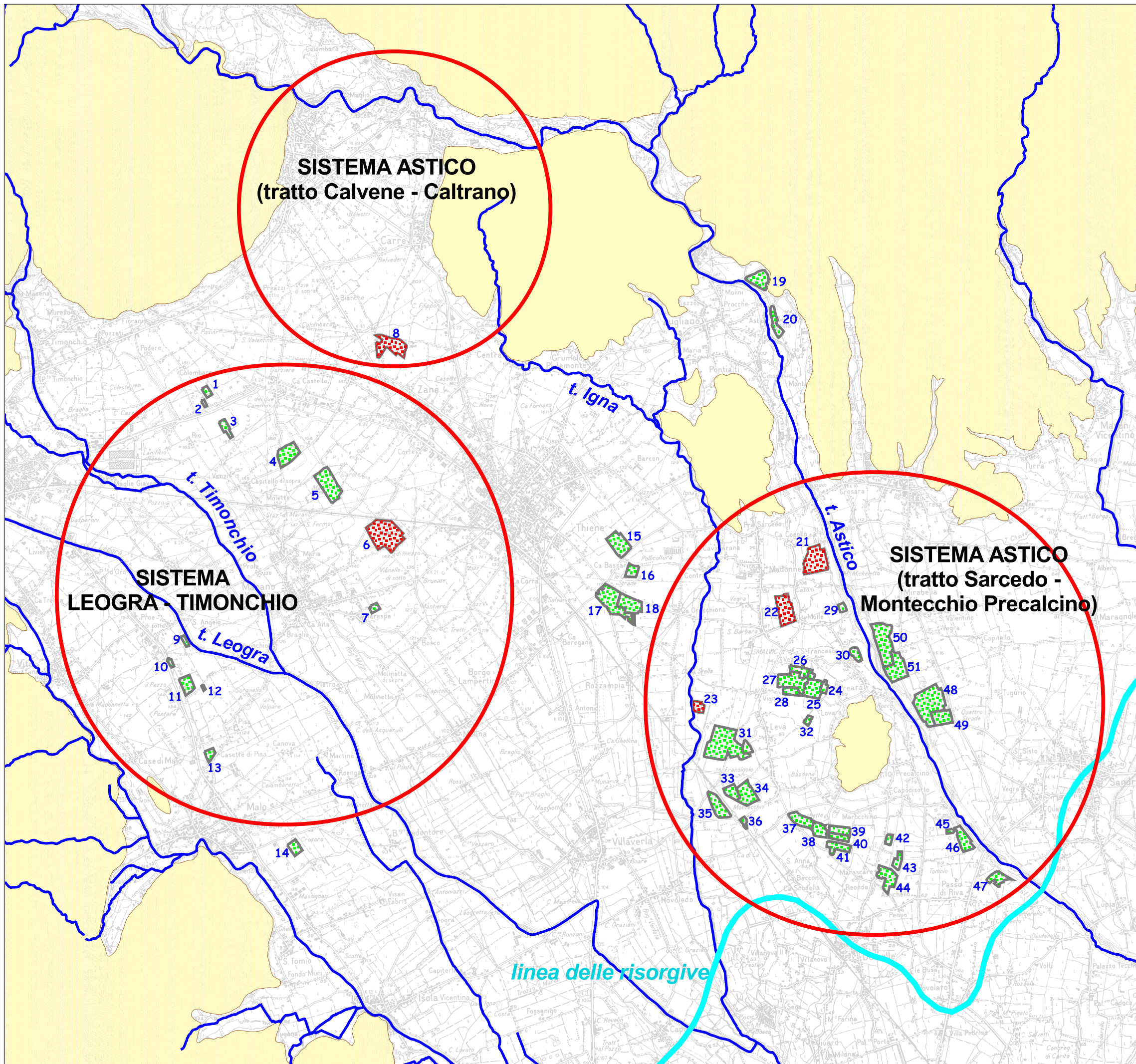
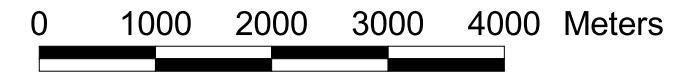


TAVOLA 2
SITI CANDIDATI ALLA RICARICA
DELLA FALDA
DELL'ALTO VICENTINO



NUMERO	COMUNE	LOCALITA'	DITTA	DISCARICA
1	Santorso	Colombare	Pierantoni Spa	
2	Santorso	Colombare	Pierantoni Spa	
3	Schio	Macchiavella	Ruaro-Dal Santo	D
4	Marano Vic.no	Vegli	Comune Marano	D
5	Marano Vic.no	Brogiane	Vaccari Spa	
6	Marano-Thiene	Vianelle	EGI Zanotto	D
7	Marano Vic.no	Villarasp	Dal Santo F.Ili	D
8	Zanè	Colombara (Bai)	Betonrossi Spa	
9	S. Vito Leguzzano	Proe	Grotto Sergio	
10	Malo	Rivalta	Grotto Adriano	
11	Malo	Sorano	Grotto Adriano	
12	Malo	Sorano		
13	Malo	Casette Pisa	Comune Malo	D
14	Malo	Ca' Crosara		
15	Sarcedo	Giberte	Adige Bitumi Spa	
16	Thiene	Ca' Orecchiona	EGI Zanotto	D
17	Thiene	Ranzolin	S.I.G. Spa	
18	Thiene	Ranzolin	Calcestruzzi Spa	
19	Zugliano	Molini	Selgea+Calcestr.	
20	Fara Vicentino	Isola	Selgea+Calcestr.	
21	Sarcedo	Casoni	Girardini Spa	
22	Sarcedo	Quartieri	S.I.G. Spa	D
23	Montecchio Prec.	Levà (Ferraro)	Carta Isnardo	
24	Montecchio Prec.	Campassi	F.Ili Rigon	
25	Montecchio Prec.	Campassi	Seganfreddo	
26	Montecchio Prec.	S. Francesco	Guarda	
27	Montecchio Prec.	Vignole	Martini Spa	
28	Montecchio Prec.	Vegre	Girardini Spa	
29	Montecchio Prec.			D
30	Montecchio Prec.	Preara	Vaccari Spa	
31	Montecchio Prec.	Levà	Carta Isnardo	D
31	Montecchio Prec.	Levà	Carta Isnardo	D
32	Montecchio Prec.	Campassi	Thiene Giacomo	
33	Montecchio Prec.	Terragioni	EGI Zanotto	
34	Montecchio Prec.	Terragioni	EGI Zanotto	D
35	Montecchio Prec.	Terragioni	EGI Zanotto	D
36	Montecchio Prec.	Terragioni	EGI Zanotto	
37	Montecchio Prec.	Selgaroni	Amm.ne Prov.le	
38	Montecchio Prec.	Selgaroni	Amm.ne Prov.le	
39	Montecchio Prec.	Selgaroni	Amm.ne Prov.le	
40	Montecchio Prec.	Selgaroni	Amm.ne Prv.le	
41	Montecchio-Dueville	Grumello	Panozzo	
42	Montecchio Prec.	Ca' Fusato	Doppieri	
43	Montecchio-Dueville	Astichello		
44	Dueville	Astichello	Gallo+Cooperativ	
45	Montecchio Prec.	Bentivoglio	SIG Spa	
46	Montecchio Prec.	Bentivoglio	SIG Spa	
47	Dueville-Sandrig	Giaroni	SIG Spa	
48	Sandrig-Breganze	Mirabella	Girardini Spa	
49	Sandrig	Termini	S.I.G. Spa	
50	Breganze	Mirabella	Vaccari Spa	
51	Breganze	Mirabella	Girardini Spa	

Bibliografia

- [1] Sottani, N., Pretto, L., Viero, C. e Marcolongo, B., *Gli acquiferi nella pianura a nord di Vicenza*. Tipolitografica Sociale Artegrafica Cittadella di Padova, 1982
- [2] Altissimo, L., Dal Prà, A., Scaltriti, G., *Relazione conclusiva*. Osservatorio interprovinciale per la tutela delle falde acquifere. Vicenza, 1999
- [3] Altissimo, L., *Livello piezometrico nel pozzo di Caldogno (1971-2007)*. Comunicazione personale
- [4] AA.VV., *Dati freaticometrici di 147 pozzi nell'alta pianura vicentina (1975-1981)*. Centro Idrico di Novoledo, 1981
- [5] Altissimo, L., Andreoli, E., *Censimento dei pozzi di attingimento idrico autonomo*. Centro Idrico Novoledo, 1998
- [6] Sottani, A., *Studio idrogeologico dell'area di attingimento dell'Acquedotto di Padova nell'alta pianura alluvionale vicentina*. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Padova - Dip. Geologia, Paleontologia e Geofisica, 1983
- [7] Dal Prà, A., *Carta Idrogeologica dell'Alta Pianura Veneta*. Consiglio Nazionale delle Ricerche - Ministero della Pubblica Istruzione, 1983
- [8] De Marsily, G., *Quantitative Hydrogeology - Groundwater Hydrology for Engineers*. Academic Press. Inc., London, 1986

- [9] Mather Paul, M., *Computer Processing of Remotely sensed Images*. John Wiley & sons, 1999.
- [10] Passadore, G., *Sulle fluttuazioni delle quote piezometriche di una falda acquifera del Veneto centrale*. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Padova - Dip. IMAGE, 2003
- [11] Clapp, R. G., and Hornberger, G. M., *Empirical equations for some soil hydraulic properties*. Water Resources Research 14:601-604, 1978.
- [12] Anderson, S. P., et al., *Subsurface flow paths in a step, unchanneled catchment*. Water Resources Research, VOL. 33, NO. 12, 2637-2653, 1997.
- [13] Torres, R., et al., *Unsaturated zone processes and the hydrologic response of a step, unchanneled catchment*. Water Resources Research, VOL. 34 , NO 8, 1865-1879, 1998.
- [14] Dingman, S. L., *Physical Hydrology*. Macmillan Publishing Company, 1999.
- [15] Rinaldo, A., et al., *Studio idrologico generale e modello continuo del sistema idraulico Dese-Zero*. Relazione finale, 2003
- [16] Rinaldo, A., et al., *Modello matematico della risposta idrologica del fiume Tanaro*. Relazione, Rapporto intermedio, 2004.
- [17] Rinaldo, A., et al., *Modellazione matematica del bacino idrografico del fiume Piave*. RIMOF, Rischio Idraulico e Morfodinamica Fluviale, Relazione finale, 2005.
- [18] Marani, M., et al., *Modello idrologico generale del bacino scolante nella Laguna di Venezia: sistema Lusore-Menegon*. Rapporto intermedio, 2004.
- [19] Rinaldo, A., Altissimo, L., Marani, M., Passadore, G., Sartori, M., *Bacino del Bacchiglione: studi e ricerche idrologiche, finalizzati alla messa a punto*

- di modelli matematici per la tutela e la gestione delle risorse idriche sotterranee*. Relazione finale (1° stralcio) - Centro Internazionale di Idrologia Dino Tonini - Università degli Studi di Padova, Maggio 2004
- [20] Rinaldo, A., Altissimo, L., Marani, M., Putti, M., Passadore, G., Sartori, M., Monego, M., Donato, M., Sottani, A., *Bacino del Bacchiglione: studi e ricerche idrologiche finalizzati alla messa a punto di modelli matematici per la tutela e la gestione delle risorse idriche sotterranee*. Prima relazione intermedia (2° stralcio) - Centro Internazionale di Idrologia Dino Tonini - Università degli Studi di Padova, Giugno 2005
- [21] Rinaldo, A., Altissimo, L., Sottani, A., Putti, M., Marani, M., Passadore, G., Sartori, M., Monego, M., Artuso, N., Gobbo, I., *Bacino del Bacchiglione: studi e ricerche idrologiche finalizzati alla messa a punto di modelli matematici per la tutela e la gestione delle risorse idriche sotterranee* Seconda relazione tecnica intermedia (2° stralcio) - Centro Internazionale di Idrologia Dino Tonini - Università degli Studi di Padova, Maggio 2006
- [22] Rinaldo, A., Altissimo, L., Sottani, A., Putti, M., Marani, M., Passadore, G., Sartori, M., Monego, M., Talpo, S., *Bacino del Bacchiglione: interventi per la ricarica delle falde e l'individuazione di aree per nuovi prelievi sostenibili*. Relazione tecnica intermedia - Centro Internazionale di Idrologia Dino Tonini - Università degli Studi di Padova, Luglio 2006
- [23] Rinaldo, A., Altissimo, L., Putti, M., Passadore, G., Monego, M., Sartori, M., *Bacino del Bacchiglione: studi e ricerche idrologiche, finalizzati alla messa a punto di modelli matematici per la tutela e la gestione delle risorse idriche sotterranee*. Relazione Finale (2° stralcio) - Centro Internazionale di Idrologia Dino Tonini - Università degli Studi di Padova, Marzo 2007
- [24] Rinaldo, A., Altissimo, L., Putti, M., Passadore, G., Monego, M., Sartori, M., *Bacino del Bacchiglione: studi e ricerche idrologiche, finalizzati alla messa a punto di modelli matematici per la tutela e la gestione delle*

- risorse idriche sotterranee*. Relazione Conclusiva (2° stralcio) - Centro Internazionale di Idrologia Dino Tonini - Università degli Studi di Padova, Luglio 2007
- [25] Chiesa, G., *Ricarica artificiale delle falde*. A.N.I.P.A., Milano, 1981
- [26] Huisman, L., Olsthoorn, T. N., *Artificial Groundwater Recharge*. Pitman Advanced Publishing Program, London, 1983
- [27] Cossu, R., *Fenomeni di inquinamento delle acque*. Dipartimento IMAGE, Università degli Studi di Padova, Padova, 2002
- [28] Tobaldo, M., *Fattibilità di interventi di ricarica artificiale delle falde nell'alta pianura vicentina*. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Padova, Padova, 2001
- [29] Dal Prà, A., *La ricarica artificiale delle falde nell'alta Pianura Trevigiana in destra Piave*. Consorzio di Bonifica Destra Piave - Università di Padova, Dip. Geologia, Treviso, 1989
- [30] Regione del Veneto, *Piano di Tutela delle Acque*. 2004
- [31] I.R.S.E.V. - Regione del Veneto, *Studio geologico dell'inquinamento della falda acquifera nei comuni di Montebelluna M., Creazzo, Sovizzo e Altavilla V. - Carta piezometrica*. Aprile 1979 e Aprile 1979
- [32] Molon, F., *I nostri fiumi (Astico, Bacchigione, Retrone, Brenta)*. Edizioni Drucker-Tedeschi - Verona, 1883
- [33] Calvino, F., *Idrogeologia delle falde artesiane a Nord di Vicenza*. Estratto dagli Atti del Convegno Attualità e nuovi orizzonti nel reperimento e nell'uso di acque nelle venezie - Padova, 1966
- [34] Argus Interware, Inc., *Argus ONE - User's Guide (Version 4.0)*. 1994-1997
- [35] Los Alamos National Laboratory, *Lagrit Manual*. 2006, <http://lagrit.lanl.gov>

- [36] Golden Software, Inc., *Surfer 8 - User's Guide*. Colorado, 2002
- [37] Enviromental Systems Research Institute, *Arcview GIS 3.2 - User's Guide*. 1992-1999
- [38] Teatini, P., Gambolati, G. *Simulazioni pregresse del sistema acquifero veneziano con un modello quasi tridimensionale agli elementi finiti. Rapporti tecnici* DMMSA, Università di Padova - Padova, Dicembre 1993
- [39] Teatini, P., Gambolati, G. *A numerical analysis of quasi-3D models for linear multiaquifer systems. Technical report* DMMSA, Università di Padova - Padova, Dicembre 1993
- [40] Gambolati, G., Sartoretto, F. *A numerical analysis of quasi-3D models for linear multiaquifer systems. Technical report* DMMSA, Università di Padova - Padova, Dicembre 1993
- [41] Gambolati, G., *Lezioni di Metodi Numerici*. Libreria Internazionale Cortina Padova, 2003
- [42] Gambolati, G., *Lezioni di Metodi Numerici 2*. Appunti del corso
- [43] Gambolati, G., *Studio per l'impostazione e l'eleaborazione di un modello 3D agli elementi finiti per l'intrusione del cuneo salino in acquiferi costieri*. Padova, 1991

Al termine di questo lavoro, desidero ringraziare tutte le persone che hanno camminato con me in questi ultimi 5 anni dedicati alle falde del Vicentino. Ognuno di voi ha contribuito in una maniera o nell'altra a realizzare questo progetto.

Grazie alla mia mamma: mi hai insegnato ad affrontare "una cosa alla volta" e a vivere serenamente, nonostante tutto.

Grazie a Davide, per essere chiaro, schematico ed organizzato ("non c'è tempo, non c'è spazio"), ma capace di grandi sogni proprio come me (e se sono qui è merito tuo, io pensavo di fare matematica!).

Grazie a Martina, per avermi supportato e sopportato come capogita e per non essere ancora scappata; mi ha fatto davvero piacere lavorare con te.

Grazie a Michele, per i passi fatti assieme all'inizio di questo "progetto falde", per i sopralluoghi più divertenti ed entusiasmanti.

Grazie ad Andrea Rinaldo, per la fiducia che mi hai sempre dimostrato, per avermi incoraggiato (e a volte spinto) verso traguardi per me una volta impossibili. Grazie per le tue frasi celebri: "non so niente, ma posso imparare tutto" e "l'università non è una bottega".

Grazie a Lorenzo Altissimo, per l'entusiasmo e la passione che metti nel tuo lavoro, per tutto quello che mi hai insegnato e che ancora mi insegnerai.

Grazie a Mario Putti, per avermi iniziato alla programmazione e agli elementi finiti, come se fosse la cosa più semplice del mondo e per la chiarezza e concretezza dimostrata in certi momenti di sconforto.

Grazie ad Andrea Sottani, per la disponibilità illimitata a perdere tempo con il progetto falde e per l'amicizia instaurata.

Grazie ai dottorandi del XX ciclo: Elisa, Enrico, Paolo, Giacomo, Luca, Cristina, Matteo, Carlo, Chiara, Gp. Grazie per il sostegno, le risate e per l'amicizia che ci lega.

Un grazie a Alberto Bellin, Andrea Lupato, Marco Selmo, Marco Donato,

Irene Gobbo, Sara Talpo, Nicoletta Artuso, Luca Bettega, Vanni Carraro, lo studio Sinergeo, Paolo Pellizzari e Alberto Ceola di AVS; Giovanni Cappellari di AIM Vicenza Spa; Danillo Calao e Maria Maddalena Ronchi di ACEGAS-APS, Alessio Schiavo di LTS, Francesco Rech di ARPAV, Imerio Borriero, Leonardo Carta e Massimo Cesaron della Carta Isnardo S.p.a.: questo lavoro è anche merito vostro.

Infine un grazie alle persone che hanno collaborato a questo progetto donandomi il loro affetto: Alessandra Feola, gli amici dell'A.A.T.O. Bacchiglione: zio Dario, Corrado, Francesco, Enrico, Eva, Stefano, Ignazio, Paola; tutti gli amici dell'università, i frati cappuccini, gli amici di Thiene, i giovani di Adria, Irene, Gianpa, Alessandra, Cristiano, Glenda, Giulia, Chiara, Mauro.