

**POLITECNICO DI MILANO**  
**Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale**  
**Corso di Laurea in Ingegneria Civile Idraulica**



# **Modellazione del flusso sotterraneo nel sistema acquifero del complesso aeroportuale di Milano Malpensa**

Relatore: Prof. Monica RIVA  
Correlatore: Dott.ssa Laura LUONI

Tesi di Laurea di:  
Matteo VALSECCHI  
Matr. 823810

Anno Accademico 2015 / 2016



*Ad Antonio e Augusto*





*Alla Professoressa Monica Riva per l'opportunità offerta e il sostegno indispensabile nel realizzarla*





## Indice

Indice Figure .....	III
Indice Tabelle .....	IX
Sommario .....	1
Introduzione .....	3
1 Caratteristiche del territorio .....	5
1.1 Inquadramento aeroporto di Milano Malpensa .....	5
1.2 Inquadramento idrografico.....	9
1.2.1 Inquadramento idrografico superficiale .....	9
1.2.2 Inquadramento idrografico sotterraneo .....	13
1.3 Inquadramento geologico e litologico.....	17
2 Analisi dati.....	19
2.1 Analisi dati pluviometrici.....	19
2.2 Analisi fiume Ticino .....	26
2.3 Analisi falda sotterranea: prelievi e dati piezometrici.....	32
2.3.1 Portate emunte .....	33
2.3.2 Andamento freaticometrico.....	43
2.3.3 Direzione di flusso e ricostruzioni isofreatiemtriche.....	50
3 Dominio .....	59
3.1 Definizione del dominio di calcolo .....	59
3.2 Ricostruzione della base dell'acquifero .....	61
3.3 Ricostruzione litostratigrafica .....	67
3.3.1 Modello a mezzo composito.....	67
3.3.2 Modello a continui multipli.....	68
3.3.3 Analisi geostatistica delle categorie .....	69
3.3.4 Confronto delle ricostruzioni litostratigrafiche .....	76
4 Modello numerico di flusso .....	83
4.1 Griglia di calcolo.....	84
4.2 Distribuzione della conduttività idraulica .....	84
4.3 Termini di ricarica e prelievo.....	85
4.4 Simulazioni di flusso con mezzo omogeneo ed isotropo .....	85
4.4.1 Simulazione 1 .....	85
4.4.2 Simulazioni 2.....	89

5	Conclusioni .....	93
	Appendici .....	95
I.	Appendice I: Analisi in moto uniforme del fiume Ticino .....	95
II.	Appendice II: Andamento dei pozzi di emungimento .....	99
III.	Appendice III: Confronto andamenti freaticometrici .....	103
IV.	Appendice IV: Analisi freaticometriche .....	107
V.	Appendice V: Cenni di Geostatistica .....	113
	V.1 Fondamenti teorici .....	113
	V.2 Calcolo dei variogrammi sperimentali .....	114
	V.3 Interpretazione dei variogrammi sperimentali .....	116
	V.4 Algoritmo di Ordinary Kriging .....	117
	V.5 Kriging ad indicatori .....	119
VI.	Appendice VI: Codice MATLAB per la ricostruzione della superficie di separazione .....	121
VII.	Appendice VII: Criteri di selezione di un modello in un'analisi multi-modello .....	125
	VII.1 Crossvalidazione .....	125
	VII.2 Model Validation Criteria (KIC, BIC, AIC, AICC) .....	126
VIII.	Appendice IX: Il codice numerico MODFLOW .....	131
	VIII.1 Discretizzazione spaziale .....	131
	VIII.2 Discretizzazione temporale .....	131
	VIII.3 Risoluzione dell'equazione del flusso .....	131
	VIII.3 Metodo di risoluzione .....	133
IX.	Appendice IX: Stima della Permeabilità .....	135
	IX.1 Parameter Estimation Model: PEST .....	139
	IX.2 Osservazioni e funzione obiettivo .....	139
	IX.3 L'algoritmo di stima dei parametri .....	139
	IX.4 Stima dei parametri di un modello lineare .....	140
	IX.5 Stima di parametri non lineari .....	142
	Allegati .....	145
A.	Allegato A .....	145
B.	Allegato B .....	159
C.	Allegato C .....	163
	Bibliografia .....	167
	Sitografia .....	171

## Indice Figure

Figura 1-1: Visione satellitare dell'aeroporto di Malpensa .....	6
Figura 1-2: Visione satellitare dell'aeroporto di Malpensa e relativi confini comunali .....	6
Figura 1-3: Macro aree aeroportuali.....	7
Figura 1-4: Aree aeroportuali permeabili e impermeabili.....	8
Figura 1-5: Stato delle acque superficiali della provincia di Varese.....	10
Figura 1-6: Fiume Ticino, canali artificiali e sbarramenti.....	11
Figura 1-7: Fiume Ticino e centrali idroelettriche in sponda lombarda.....	12
Figura 1-8: Settori idrografici sotterranei della provincia di Varese.....	13
Figura 1-9: Schema dei rapporti stratigrafici tra Gruppi Acquiferi (da:Geologia degli Acquiferi Padani della Regione Lombardia – Relazione tecnica. Regione Lombardia e Eni-Divisione Agip, 2002).....	16
Figura 2-1: Stazioni pluviometriche ARPA Varese .....	19
Figura 2-2: Altezze medie annue nelle stazioni pluviometriche nel periodo 2005-2015.....	21
Figura 2-3: Precipitazione cumulate annue mediate tra le stazioni pluviometriche analizzate.....	21
Figura 2-4: Distribuzione di probabilità $p(x)$ e $P(x)$ di precipitazione della stazione pluviometrica 555	22
Figura 2-5: Distribuzione di probabilità $p(x)$ e $P(x)$ di precipitazione della stazione pluviometrica 557	22
Figura 2-6: Distribuzione di probabilità $p(x)$ e $P(x)$ di precipitazione della stazione pluviometrica 558	23
Figura 2-7: Distribuzione di probabilità $p(x)$ e $P(x)$ di precipitazione della stazione pluviometrica 559	23
Figura 2-8: Distribuzione di probabilità $p(x)$ e $P(x)$ di precipitazione della stazione pluviometrica 687	23
Figura 2-9: Distribuzione di probabilità $p(x)$ e $P(x)$ di precipitazione della stazione pluviometrica 863	24
Figura 2-10: Distribuzione di probabilità $p(x)$ e $P(x)$ di precipitazione della stazione pluviometrica 897	24
.....	24
Figura 2-11: Distribuzione di probabilità $p(x)$ e $P(x)$ di precipitazione della stazione pluviometrica 1206	24
.....	24
Figura 2-12: Distribuzione di probabilità $p(x)$ e $P(x)$ di precipitazione della stazione pluviometrica 1211	25
.....	25
Figura 2-13: Distribuzione di probabilità $p(x)$ e $P(x)$ di precipitazione della stazione pluviometrica 1375	25
.....	25
Figura 2-14: Distribuzione di probabilità $p(x)$ e $P(x)$ di precipitazione della stazione pluviometrica MXP	25
.....	25
Figura 2-15: Stazioni idrometriche lungo il fiume Ticino .....	27
Figura 2-16: Sezioni PAI sul fiume Ticino .....	29
Figura 2-17: Sezioni PAI e AIPo .....	30
Figura 2-18: Profili di moto permanente in condizioni di flusso medie ed eccezionale .....	31
Figura 2-19: Area d'indagine.....	32
Figura 2-20: Posizione dei pozzi di emungimento dei comuni di Lonate Pozzolo, Vizzola Ticino, Somma lombardo, Casorate Sempione, Cardano al Campo, Samarate, Ferno. ....	33
Figura 2-21: Volumi totali emunti dai sette comuni nel periodo 2005-2015 .....	34
Figura 2-22: Portate emunte annualmente dal comune di Cardano al Campo nel periodo 2005-2015....	35
Figura 2-23: Portate emunte annualmente dal comune di Casorate Sempione nel periodo 2005-2015...	35
Figura 2-24: Portate emunte annualmente dal comune di Ferno nel periodo 2005-2015 .....	35

Figura 2-25: Portate emunte annualmente dal comune di Lonate Pozzolo nel periodo 2005-2015.....	36
Figura 2-26: Portate emunte annualmente dal comune di Samarate nel periodo 2005-2015.....	36
Figura 2-27: Portate emunte annualmente dal comune di Somma Lombardo nel periodo 2005-2015....	36
Figura 2-28: Portate emunte annualmente dal comune di Vizzola Ticino nel periodo 2005-2015.....	37
Figura 2-29: Pozzi aeroportuali.....	38
Figura 2-30: Confronto tra i volumi emunti dal pozzo aeroportuale A e il comune di Casorate Sempione .....	39
Figura 2-31: Confronto tra i volumi emunti dal pozzo aeroportuale H e il comune di Ferno.....	39
Figura 2-32: Confronto tra i volumi emunti dai pozzi aeroportuale B, C, D, E, F, G e il comune di Somma Lombardo.....	40
Figura 2-33: Confronto tra i volumi emunti dai pozzi aeroportuale I ,L, 1exCP, 2exCP e il comune di Lonate Pozzolo.....	40
Figura 2-34: Portate emunte dai pozzi aeroportuali nel periodo 2005-2015.....	41
Figura 2-35: Volumi totali emunti ad uso potabile, industriale e antincendio dell'aeroporto nel periodo 2005-2015.....	42
Figura 2-36: Portate totali emunte nelle tre macro aree aeroportuali nel periodo 2005-2015 .....	42
Figura 2-37: Inquadramento database piezometri superficiali .....	43
Figura 2-38: Piezometri captanti la falda superficiale nell'intorno dell'aeroporto di Malpensa .....	44
Figura 2-39: Andamento freaticometrico falda superficiale nell'intorno dell'aeroporto di Malpensa .....	44
Figura 2-40: Piezometri profondi nell'intorno dell'aeroporto di Malpensa.....	45
Figura 2-41: Andamento freaticometrico falda profonda, (PO012090NU2009* - piezometro in falda A). 45	
Figura 2-42: Andamento freaticometrico piezometro PO012118U0005 e precipitazione cumulata mensile (pluviometro 557).....	46
Figura 2-43: Andamento freaticometrico piezometro ARPA PO012118U0005 e volume emunto nel comune di Samarate [m <sup>3</sup> /anno].....	47
Figura 2-44: Piezometri PO012090NU2009 (VA), PII29 (NO) e stazione idrometrica 8121 di Oleggio.....	48
Figura 2-45: Andamento piezometri PO012090NU2009 (VA) e PII29 (NO).....	48
Figura 2-46: Variazione idrometrica del fiume Ticino nella stazione 8121 di Oleggio.....	49
Figura 2-47: Ponte SS494 Oleggio (NO).....	49
Figura 2-48: Gruppi di stazioni piezometriche.....	50
Figura 2-49: Andamenti piezometrici gruppo n°1 .....	50
Figura 2-50: Andamenti piezometrici gruppo n°2 .....	51
Figura 2-51: Andamenti piezometrici gruppo n°3 .....	51
Figura 2-52: Andamenti piezometrici gruppo n°4 .....	51
Figura 2-53: Andamenti piezometrici gruppo n°5 .....	52
Figura 2-54 - Ricostruzione della superficie piezometrica media annua 2005 e 2006 .....	54
Figura 2-55 - Ricostruzione della superficie piezometrica media annua 2007 e 2008 .....	54
Figura 2-56: Ricostruzione della superficie piezometrica media annua 2009 e 2010.....	55
Figura 2-57: Ricostruzione della superficie piezometrica media annua 2011 e 2012.....	55
Figura 2-58: Ricostruzione della superficie piezometrica media annua 2013 e 2014.....	56
Figura 2-59: Ricostruzione della superficie piezometrica media annua 2015 .....	56
Figura 2-60: Piezometria di falda superficiale della provincia di Novara.....	57
Figura 3-1: Area di definizione del modello numerico e relative condizioni al contorno .....	60
Figura 3-2: Confine Ovest (a) e (b) del modello matematico .....	61

---

Figura 3-3: Semivariogrammi direzionali della base dell'acquifero .....	62
Figura 3-4: Semivariogramma sperimentale e modello esponenziale per la ricostruzione della base dell'acquifero .....	63
Figura 3-5: Tetto acquitardo - Cross validazione tra il valore stimato e misurato (a) e Cross validazione tra il valore misurato e l'errore stimato (b) .....	64
Figura 3-6: Tetto acquitardo - Cross validazione tra il valore misurato e l'errore standardizzato (a) e Distribuzione di probabilità degli errori di stima (b) .....	64
Figura 3-7: Tetto acquitardo - Cross validazione tra il valore stimato normalizzato e l'errore standardizzato .....	64
Figura 3-8: Tetto dell'acquitardo [m.s.l.m], campo di deviazione standard e relativi punti di condizionamento .....	65
Figura 3-9: Tetto dell'acquitardo [m] e relativi punti di condizionamento .....	66
Figura 3-10: Spessore dell'acquitardo, deviazione standard e relativi punti di condizionamento .....	66
Figura 3-11: Quota piano campagna del dominio di modellazione e relativa deviazione standard .....	67
Figura 3-12: Variogramma sperimentale verticale e relativi modelli – Categoria 1 .....	70
Figura 3-13: Variogramma sperimentale orizzontale e relativi modelli – Categoria 1 .....	71
Figura 3-14: Variogramma sperimentale verticale e relativi modelli – Categoria 2 .....	71
Figura 3-15: Variogramma sperimentale orizzontale e relativi modelli – Categoria 2 .....	72
Figura 3-16: Variogramma sperimentale verticale e relativi modelli – Categoria 3 .....	72
Figura 3-17: Variogramma sperimentale orizzontale e relativi modelli – Categoria 3 .....	73
Figura 3-18: Variogramma sperimentale verticale e relativi modelli – Categoria 4 .....	73
Figura 3-19: Variogramma sperimentale orizzontale e relativi modelli – Categoria 4 .....	74
Figura 3-20: Sezioni stratigrafiche del dominio .....	76
Figura 3-21: Probabilità che sia presente la categoria 1 (argilla-limo) sezione A-A' (a) e B-B' (b) .....	77
Figura 3-22: Probabilità che sia presente la categoria 2 (ghiaia) sezione A-A' (a) e B-B' (b) .....	77
Figura 3-23: Probabilità che sia presente la categoria 3 (sabbia) sezione A-A' (a) e B-B' (b) .....	78
Figura 3-24: Probabilità che sia presente la categoria 4 (terreno) sezione A-A' (a) e B-B' (b) .....	78
Figura 3-25: Ricostruzione litostratigrafica a mezzo composito sezione A-A' (a) e B-B' (b) Categoria 2 (verde), Categoria 1 (blu), Categoria 3 (Arancione), Categoria 4 (Marrone). .....	79
Figura 3-26: Ricostruzione litostratigrafica a mezzo composito sezione A-A' (a) e B-B' (b) e relativo ordine di assegnazione – Categoria 1 (blu), Categoria 2 (verde), Categoria 3 (Arancione), Categoria 4 (Marrone). .....	80
Figura 3-27: Sezioni stratigrafiche SEA.spa .....	80
Figura 3-28: Sezione stratigrafica C-C' - SEA.spa .....	81
Figura 3-29: Sezione stratigrafica D-D' - SEA.spa .....	81
Figura 4-1: Griglia di calcolo del modello di flusso .....	84
Figura 4-2: Localizzazione pozzi di emungimento implementati in MODFLOW .....	85
Figura 4-3: Andamento freaticometrico nelle tre configurazioni di carico del fiume Ticino (profilo di fondo alveo, A e B) .....	86
Figura 4-4: Andamento freaticometrico nelle tre configurazioni di carico del fiume Ticino nella sezione A-A' (a) e B-B' (b) .....	86
Figura 4-5: Diagramma di calibrazione di MODFLOW .....	87

---



Figura 4-6: Andamenti freaticometrici di modello (profilo A) a confronto con le ricostruzioni effettuate al Paragrafo 2.2.3 .....	88
Figura 4-7: Bilancio di massa del modello di flusso (Profilo A) .....	88
Figura 4-8: Andamenti freaticometrici di modello a confronto con i differenti valori di ricarica .....	89
Figura 4-9: Andamento freaticometrico nelle quattro condizioni di ricarica del fiume Ticino nella sezione A-A' (a) e B-B' (b).....	90
Figura 4-10: Andamenti freaticometrici di simulazione 1 (Profilo A) e 2 (-15000 mm/anno).....	90
Figura 4-11: Andamenti freaticometrici di simulazione 1 (Profilo A) e 2 (-15000mm/anno) nelle sezioni A-A'(a) e B-B'(b).....	91
Figura 4-12: Confronto tra i bilanci di massa della Simulazione 1 (Profilo A) e Simulazione 2 (-150000 mm/anno) .....	92
Figura I-1: Sezioni AIPo n°82 e n°69 .....	96
Figura I-2: Sezioni AIPo n°68 e n°60 .....	96
Figura I-3: Sezione AIPo n°57 .....	96
Figura II-1: Portate emunte annualmente dal comune di Albaizzate nel periodo 2005-2015.....	99
Figura II-2: Portate emunte annualmente dal comune di Arsago Seprio nel periodo 2005-2015.....	99
Figura II-3: Portate emunte annualmente dal comune di Besnate nel periodo 2005-2015 .....	100
Figura II-4: Portate emunte annualmente dal comune di Cassano Magnago nel periodo 2005-2015....	100
Figura II-5: Portate emunte annualmente dal comune di Castronno nel periodo 2005-2015 .....	100
Figura II-6: Portate emunte annualmente dal comune di Gallarate nel periodo 2005-2015 .....	101
Figura II-7: Portate emunte annualmente dal comune di Mornago nel periodo 2005-2015 .....	101
Figura II-8: Portate emunte annualmente dal comune di Cavaria con Premezzo nel periodo 2005-2015 .....	101
Figura III-1: Piezometri ARPA della provincia di NOVARA .....	103
Figura III-2: Andamento piezometrico superficiale monitorato dalle stazioni ARPA (NO) .....	103
Figura III-3: Piezometri ARPA Varese in falda A .....	104
Figura III-4: Andamento piezometrico in falda A monitorato dalle stazioni ARPA Varese .....	104
Figura III-5: Piezometri SIA Città Metropolitana di Milano .....	104
Figura III-6: Andamento piezometrico in falda A monitorato dalle stazioni SIA Città metropolitana milanese.....	105
Figura IV-1: Andamento freaticometrico piezometro PO012070NU1007 e precipitazione cumulata mensile (pluviometro 1206) .....	107
Figura IV-2: Andamento freaticometrico piezometro ARPA PO012070NU1007 e volume emunto nel comune di Gallarate [m <sup>3</sup> /anno].....	107
Figura IV-3: Andamento freaticometrico piezometro PO12090NU2009 e precipitazione cumulata mensile (pluviometro 557).....	108
Figura IV-4: Andamento freaticometrico piezometro ARPA PO12090NU2009 e volume emunto nel comune di Lonate Pozzolo [m <sup>3</sup> /anno] .....	108
Figura IV-5: Andamento freaticometrico piezometro PO012026NU3021 e precipitazione cumulata mensile (pluviometro 558) .....	108
Figura IV-6: Andamento freaticometrico piezometro ARPA PO012026NU3021 e volume emunto nel comune di Busto Arsizio [m <sup>3</sup> /anno] .....	109
Figura IV-7: Andamento freaticometrico piezometro PO012002NU0008 e precipitazione cumulata mensile (pluviometro 1211) .....	109

---

Figura IV-8: Andamento freaticometrico piezometro ARPA PO012002NU0008 e volume emunto nel comune di Albaizzate [m <sup>3</sup> /anno] .....	109
Figura IV-9: Andamento freaticometrico piezometro PO012106NU0015 e precipitazione cumulata mensile (pluviometro 1206) .....	110
Figura IV-10: Andamento freaticometrico piezometro ARPA PO012106NU0015 e volume emunto nel comune di Mornago [m <sup>3</sup> /anno].....	110
Figura IV-11: Andamento freaticometrico piezometro PO012136NUZ0011 e precipitazione cumulata mensile (pluviometro 1211) .....	110
Figura IV-12: Andamento freaticometrico piezometro ARPA PO012136NUZ0011 e volume emunto nel comune di Venegano Inferiore [m <sup>3</sup> /anno].....	111
Figura IV-13: Andamento freaticometrico piezometro PO012036NU0003 e precipitazione cumulata mensile (pluviometro 1211) .....	111
Figura IV-14: Andamento freaticometrico piezometro ARPA PO012036NU0003 e volume emunto nel comune di Casale Lite [m <sup>3</sup> /anno] .....	111
Figura V-1: Esempio di semivariogramma sperimentale e fitting di un modello di semivariogramma	115
Figura V-2: Elementi che intervengono nel calcolo di un semivariogramma sperimentale .....	115
Figura VII-1: Validazione del variogramma di Y nel caso di sistema “unica facies” .....	125
Figura C-1: Sezione stratigrafica A-A’ - SEA.spa .....	163
Figura C-2: Sezione stratigrafica B-B’ - SEA.spa .....	163
Figura C-3: Sezione stratigrafica E-E’ - SEA.spa.....	164
Figura C-4: Sezione stratigrafica F-F’ - SEA.spa .....	164
Figura C-5: Sezione stratigrafica G-G’ - SEA.spa .....	164
Figura C-6: Sezione stratigrafica H-H’ - SEA.spa .....	165
Figura C-7: Sezione stratigrafica I-I’ - SEA.spa .....	165



## Indice Tabelle

Tabella 1-1: Superfici delle macro aree aeroportuali .....	7
Tabella 1-2: Superfici aeroportuali permeabili e impermeabili .....	8
Tabella 2-1: Stazioni pluviometriche ARPA Varese .....	20
Tabella 2-2: Precipitazioni cumulate annue [mm/anno] delle stazioni pluviometriche nel periodo 2005-2015 .....	20
Tabella 2-3: Precipitazioni medie mensili e deviazioni standard .....	26
Tabella 2-4: Stazioni idrometriche del fiume Ticino .....	27
Tabella 2-5: Stazioni di misurazione della portata del fiume Ticino .....	27
Tabella 2-6: Livelli idrometrici [m] delle stazioni lungo il fiume Ticino riferiti allo zero idrometrico ..	28
Tabella 2-7: Sezioni PAI del fiume Ticino .....	28
Tabella 2-8: Carichi medi annui stimati lungo il fiume Ticino .....	29
Tabella 2-9: Sezioni AIPo .....	31
Tabella 2-10: numero dei pozzi di emungimento attivi nei sette comuni .....	34
Tabella 2-11: Volumi annui emunti dai sette comuni [m <sup>3</sup> /anno] .....	34
Tabella 2-12: Pozzi aeroportuali .....	38
Tabella 2-13: Portate emunte dai pozzi aeroportuali nel periodo 2005-2015 [m <sup>3</sup> /anno] .....	41
Tabella 2-14: Portata media di concessione m <sup>3</sup> /s dei pozzi aeroportuali .....	41
Tabella 2-15: Volumi totali m <sup>3</sup> /anno emunti ad uso potabile, industriale e antincendio dell'aeroporto nel periodo 2005-2015 .....	42
Tabella 2-16: Portate totali emunte m <sup>3</sup> /anno nelle tre macro aree aeroportuali nel periodo 2005-2015..	43
Tabella 3-1: Parametri di interpolazione della superficie di separazione e relativo intervallo di confidenza .....	62
Tabella 3-2: Parametri adottati per la costruzione del semivariogramma sperimentale .....	62
Tabella 3-3: Parametri dei modelli implementanti .....	63
Tabella 3-4: Valori di AIC e BIC per i modelli di interpretazione del semivariogramma sperimentale del tetto dell'acquitaro .....	63
Tabella 3-5: Tetto dell'acquitaro – Cross validazione del modello di semivariogramma esponenziale	65
Tabella 3-6: Parametri statistici tetto e spessore dell'acquitaro .....	67
Tabella 3-7: Percentuali volumetriche delle 4 categorie di litotipi prese in esame .....	70
Tabella 3-8: Parametri adottati per la costruzione dei semivariogrammi sperimentali .....	70
Tabella 3-9: Parametri dei modelli di variogramma verticale – Categoria 1 .....	71
Tabella 3-10: Parametri dei modelli di variogramma orizzontale – Categoria 1 .....	71
Tabella 3-11: Parametri dei modelli di semivariogramma verticale – Categoria 2 .....	72
Tabella 3-12: Parametri dei modelli di semivariogramma orizzontale – Categoria 2 .....	72
Tabella 3-13: Parametri dei modelli di semivariogramma verticale – Categoria 3 .....	73
Tabella 3-14: Parametri dei modelli di semivariogramma orizzontale – Categoria 3 .....	73
Tabella 3-15: Parametri dei modelli di semivariogramma verticale – Categoria 4 .....	74
Tabella 3-16: Parametri dei modelli di semivariogramma orizzontale – Categoria 4 .....	74
Tabella 3-17: Valori dei Model Validation Criteria – Categoria 1 .....	74
Tabella 3-18: Valori di Model Validation Criteria – Categoria 2 .....	75
Tabella 3-19: Valori di Model Validation Criteria – Categoria 3 .....	75
Tabella 3-20: Valori di Model Validation Criteria – Categoria 4 .....	76

Tabella 3-21: Parametri dei modelli di semivariogramma adottati .....	76
Tabella 3-22: Probabilità che siano presenti le categorie 2-3-4 (ghiaia, sabbia e terreno) sezione A-A' (a) e B-B' (b) .....	78
Tabella 3-23: Quota tetto acquitardo con ricostruzione litostratigrafica a mezzo composito .....	80
Tabella 4-1: Risultati di calibrazione .....	87
Tabella 4-2: Conduttività idraulica del mezzo omogeneo.....	87
Tabella 4-3: Bilancio di massa del modello di flusso (Profilo di fondo alveo).....	88
Tabella 4-4: Bilancio di massa del modello di flusso (Profilo A).....	89
Tabella 4-5: Bilancio di massa del modello di flusso (Profilo B) .....	89
Tabella 4-6: Risultati di calibrazione per una ricarica del Ticino di -15000 mm/anno.....	91
Tabella 4-7: Bilancio di massa con ricarica -15000 mm/anno .....	91
Tabella I-1: Coefficienti di Manning.....	95
Tabella I-2: Coefficienti di Manning.....	97
Tabella I-3: Regimi di portate imposte per il profilo A (a) e B (b).....	97
Tabella I-4: Profili A e B di pelo libero del fiume Ticino.....	98
Tabella VIII-1: Parametri di ingresso relativi al metodo risolutivo WHS .....	133
Tabella A-1: Pozzi del comune di Casorate Sempione (VA).....	145
Tabella A-2: Pozzi del comune di Cardano al Campo (VA).....	146
Tabella A-3: Pozzi del comune di Ferno (VA) .....	146
Tabella A-4: Pozzi del comune di Lonate Pozzolo (VA).....	148
Tabella A-5: Pozzi del comune di Samarate (VA).....	149
Tabella A-6: Pozzi del comune di Somma Lombardo (VA).....	150
Tabella A-7: Pozzi del comune Vizzola Ticino (VA) .....	151
Tabella A-8: Pozzi del comune di Castronno (VA) .....	151
Tabella A-9: Pozzi del comune di Albaizzate (VA).....	152
Tabella A-10: Pozzi del comune di Gallarate (VA) .....	155
Tabella A-11: Pozzi del comune di Mornago (VA) .....	156
Tabella A-12: Pozzi del comune di Vergiate Besnate (VA) .....	157
Tabella A-13: Pozzi del comune di Arsago Seprio (VA).....	157
Tabella A-14: Pozzi del comune di Cavaria con Premezzo (VA).....	158
Tabella A-15: Pozzi del comune di Cassano Magnago (VA) .....	158
Tabella B-1: Piezometri ARPA (VA) in falda A .....	159
Tabella B-2: Piezometri ARPA (VA) in falda B.....	160
Tabella B-3: Piezometri in falda A della provincia di Novara.....	160
Tabella B-4: Piezometri in falda A della provincia di Milano (SIA-Città metropolitana).....	160
Tabella B-5: Piezometri Cada Ticino (S.Anna) (VA).....	161
Tabella B-6: Piezometri Cave Riunite (Frutteto) (VA).....	161
Tabella B-7: Piezometri Cava Calderona (VA) .....	161





## Sommarior

La problematica del flusso in acquiferi naturali e dell'interazione tra falda acquifera e infrastrutture è di notevole rilevanza e di grande attualità nell'ambito dell'Ingegneria idraulica, in relazione alla crescente attenzione che viene posta alla sostenibilità nell'utilizzo della risorsa idrica.

In quest'ambito, nel presente lavoro di tesi si è affrontato il problema della caratterizzazione e modellazione della falda acquifera in una zona fortemente urbanizzata. L'acquifero oggetto dello studio si colloca nell'area dell'aeroporto di Milano Malpensa. Questa zona è dal punto di vista socio-economico, altamente strategica per l'Italia ed il Sud Europa. L'obbiettivo di questo studio consiste nel valutare come diverse concettualizzazioni del sito influiscano sui risultati forniti dalla modellazione del flusso idrico sotterraneo.

La falda idrica nel bacino idrogeologico di interesse è soggetta ad una variabilità temporale e spaziale sostanzialmente governata dalle condizioni al contorno e dai termini forzanti. Per poterne individuare le caratteristiche salienti e modellarne il comportamento si sono analizzati gli afflussi meteorici, le caratteristiche litologiche e stratigrafiche, i termini di prelievo, le idrauliche superficiali e i dati piezometrici disponibili presso diversi enti presenti nel territorio.

Le analisi effettuate, unitamente al modello di flusso, agli algoritmi e procedure sviluppate ed implementate sono risultate efficaci nella modellazione del flusso idrico storico in base ai dati disponibili. Il modello implementato costituisce la base per la previsione di scenari futuri in un'ottica di ottimizzazione della risorsa idrica sotterranea e sviluppo sostenibile delle infrastrutture.





## Introduzione

La caratterizzazione di acquiferi non è mai una cosa semplice, inoltre risulta impossibile caratterizzare con un unico modello un acquifero in tutti i suoi aspetti. Generalmente ci si concentra nel caratterizzare, attraverso modelli matematici, solo alcuni aspetti che sono più importanti per le previsioni di interesse (eg. la risposta dell'acquifero in termini di flusso).

La finalità dell'elaborato proposto è quella di realizzare un modello matematico delle acque sotterranee della zona circostante il sedime aeroportuale di Malpensa per affinare la gestione dei prelievi per l'approvvigionamento idrico; tale modello di flusso è stato realizzato utilizzando codici di calcolo tra i più diffusi ed affidabili a livello mondiale.

Il modello rappresenta unicamente il cosiddetto "acquifero tradizionale" in quanto le informazioni sui corpi più profondi sono scarse e poco distribuite, non permettendone una corretta rappresentazione; inoltre, i pozzi aeroportuali, e numerosi pozzi circostanti, interessano unicamente questa falda.

Il modello è impostato sulla base dei dati bibliografici disponibili presso SEA.spa, ARPA Varese, ARPA Novara, Provincia di Varese, Piano cave Varese, SIA Milano, Regione Lombardia e Regione Piemonte.

Nel dettaglio, le finalità della modellazione sono quelle di caratterizzare il comportamento di flusso della falda sottostante l'aeroporto, valutando l'effetto di scenari di emungimento differenti dall'attuale in funzione di un regime pluviometrici e condizioni al contorno variabili.

La tesi si articola nei seguenti capitoli:

Nel *Capitolo 1* si riporta un inquadramento dal punto di vista geologico, idrogeologico e idraulico di tipo superficiale e sotterraneo del caso di studio, nonché una breve introduzione di tipo tecnico relativa l'aeroporto di Malpensa.

Nel *Capitolo 2* sono analizzati i dati pluviometrici dell'area circostante l'aerostazione; i livelli piezometrici del fiume Ticino e il suo regime di flusso a valle delle principali opere di derivazione. In seguito si è passati all'analisi dei dati freaticometrici e di prelievo relativi la falda sotterranea superficiale, valutandone il trend e ricercando eventuali dipendenze con i principali termini forzanti del sistema. Infine si analizzeranno le direzioni di flusso della falda superficiale e si ricostruiranno gli andamenti isopiezometriche impiegati nel successivo capitolo per la definizione del dominio di modellazione numerica.

Nel *Capitolo 3* si è definita la geometria del modello concettuale e numerico, con particolare attenzione alla ricostruzione della base della falda superficiale. Successivamente, attraverso i dati stratigrafici disponibili si è ricostruita la distribuzione dei geo-materiali utilizzando due diverse concettualizzazioni del mezzo poroso (mezzo composito e un modello a continui multipli).

Nel *Capitolo 4* si analizzeranno i risultati derivanti dalla calibrazione del modello di flusso numerico tridimensionale. A partire da tali configurazioni di conduttività idraulica sono state effettuate analisi di sensitività relative l'influenza del fiume Ticino modellizzato sia come condizione di carico imposto sia come flusso assegnato (corrispondenti a differenti regimi idrici del fiume Ticino).

# 1 Caratteristiche del territorio

## 1.1 Inquadramento aeroporto di Milano Malpensa

### *Stato attuale*

L'Aeroporto di Milano-Malpensa è il secondo aeroporto italiano per traffico passeggeri dopo l'Aeroporto di Roma-Fiumicino. Nel 2015 sono transitati da Malpensa più di 18,5 milioni di passeggeri e 510,000 tonnellate di merci.

La gestione dello scalo, unitamente all'aeroporto di Linate è esercitata dalla Società Esercizi Aeroportuali SEA.spa.

### *Storia*

L'origine del sistema aeroportuale di Milano risale all'inizio dell'aviazione in Italia.

Nel 1909 gli industriali Giovanni Agusta e Gianni Caproni avevano creato presso la cascina Malpensa un campo d'aviazione per far volare i propri prototipi; con l'aggiunta di alcune strutture militari il campo crebbe e divenne anche campo scuola di pilotaggio.

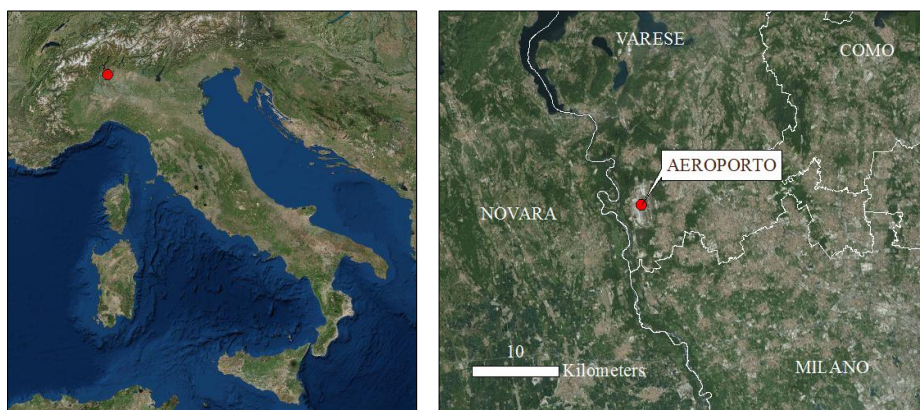
Nel periodo tra le due guerre, ed in modo particolare durante la seconda guerra mondiale, l'utilizzo degli aeroporti era prevalentemente di tipo militare, mentre, nell'immediato dopoguerra, l'aumento del traffico aereo a livello mondiale generò la necessità di avere aeroporti di uso civile.

La riconversione dell'aeroporto a civile fu effettuata nel 1948; negli anni 60 e 70 si ebbero continui ampliamenti ed arricchimenti di strutture e servizi.

L'idea di una nuova aerostazione a Malpensa dove poter concentrare il traffico di Milano divenne concreta nel 1966, quando l'allora Ministro dei Trasporti espresse le sue determinazioni in ordine al sistema aeroportuale milanese affermando che "l'aeroporto sul quale dovranno gravitare, intorno al 1970, i traffici aerei internazionali è quello della Malpensa", specificando inoltre che "i trasporti aerei internazionali di massima faranno capo all'aeroporto della Malpensa, mentre i trasporti aerei interni di massima faranno capo all'aeroporto di Linate".

### *Inquadramento amministrativo*

L'aeroporto di Malpensa è situato nel settore Sud-Ovest della Provincia di Varese interessando i territori comunali di Somma Lombardo, Casorate Sempione, Gallarate, Cardano al Campo, Samarate, Ferno, Lonate Pozzolo e Vizzola Ticino (vd *Figura 1-1* e *Figura 1-2*).



*Figura 1-1: Visione satellitare dell'aeroporto di Malpensa*



*Figura 1-2: Visione satellitare dell'aeroporto di Malpensa e relativi confini comunali*

La zona è attraversata da importanti vie di comunicazione: la Strada Statale n° 33 del Sempione, la Strada Statale n° 336 della Malpensa, la Strada Statale n° 527 del Barbarossa, l'autostrada A8 Milano - Varese, con il raccordo A8/26 dell'autostrada Alessandria - Gravellona Toce e numerose tratte ferroviarie, le principali delle quali collegano Milano alla Svizzera passando per Gallarate e Domodossola.

#### *Caratteristiche tecniche*

Il sistema di infrastrutture costituenti l'aeroporto è suddivisibile in diverse macro aree evidenziate in *Figura 1-3* e dettagliate in seguito. L'estensione di ciascuna macro-area è riportata in *Tabella 1-1*.

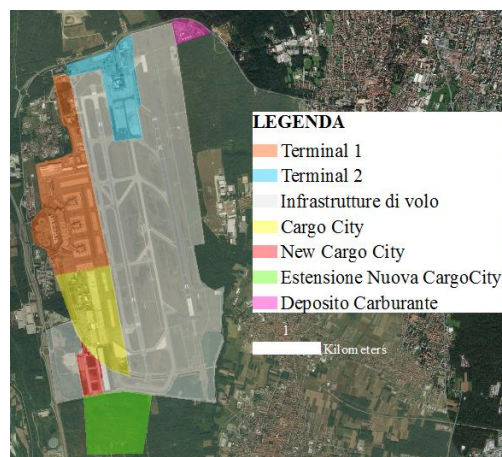


Figura 1-3: Macro aree aeroportuali

- Terminal 1 (T1): operativa dal 25 ottobre 1998 è diviso in tre parti (Stellite A, Satellite B, Satellite C). Rappresenta il principale nucleo operativo dello scalo e comprende il piazzale di sosta aeromobili, l'aerostazione passeggeri e varie strutture complementari di supporto. Serve attualmente tutto il traffico passeggeri di linea e charter che fa capo all'aeroporto di Malpensa;
- Terminal 2 (T2): destinato principalmente i voli della compagnia low-cost easyJet, di cui Malpensa è la base maggiore in Italia e la seconda più importante d'Europa; L'aerostazione si compone di due aree ben distinte ("arrivi" e "partenze");
- Area merci (Cargo City): il terminal merci è costituito da due edifici adiacenti destinati allo stoccaggio e al carico-scarico materiali;
- Nuova cargo city e relativa Estensione: Sono le nuove e future estensioni della già presenti area merci;
- Depositi carburanti: stoccaggi di combustibili per riscaldamento e/o autotrazione e stoccaggi di prodotti chimici (fondamentalmente de-icing/desnowing) e rete HRS (Hydrant Refuelling System).
- Infrastrutture di volo: Il sistema delle infrastrutture è caratterizzato da due piste parallele che presentano un interasse di 808 m e sono entrambe lunghe 3,920 m e larghe 60 m collegate da rete particolarmente estesa di vie di rullaggio (quasi 20 km).

	<i>Terminal 1</i>	<i>Terminal 2</i>	<i>Cargo City</i>	<i>Depositi carburanti</i>	<i>Nuovo Carco City</i>	<i>Estensione Nuova Cargo City</i>	<i>Infrastrutture di volo</i>
Area [m <sup>2</sup> ]	1,837,991.26	747,452.05	1,115,442.73	128,944.66	202,362.23	854,111.40	8,188,107.54
Percentuale	14.6 %	6%	8 %	0.9 %	1.5%	6%	63 %

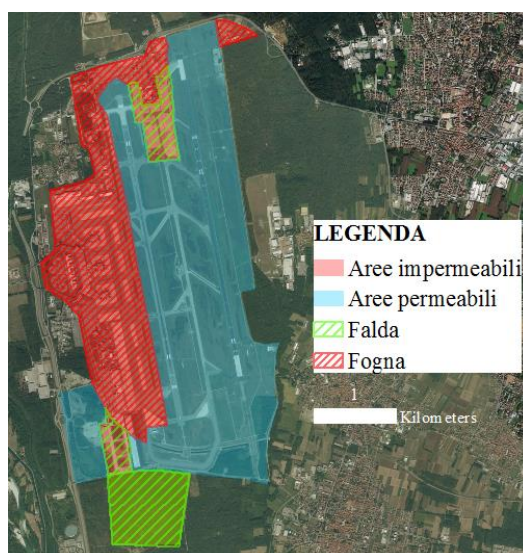
Tabella 1-1: Superfici delle macro aree aeroportuali

Nell'assetto attuale, l'aeroporto si sviluppa su una superficie complessiva di circa 13 km<sup>2</sup> di cui circa il 33 % è coperto e/o asfaltato e la restante parte è destinata a verde (vd *Figura 1-4*).

Le acque meteoriche ricadenti sulle aree impermeabili del Terminal 1e Cargo City vengono raccolte in vasche di prima pioggia trattate (dissabbiatura - disoleatura) e reindirizzate in fognatura.

Le acque meteoriche ricadenti sulle aree impermeabili del Terminal2 e Nuovo Cargo City ed estensione vengono drenate in pozzetti e lasciate percolare in falda, previo passaggio attraverso filtri a coalescenza.

Nella *Figura 1-4* e *Tabella 1-2* vengono riportate le superfici permeabili ed impermeabili dell'aeroporto. In particolare per le superfici impermeabili viene dettagliata la differente gestione delle acque meteoriche (i.e., se immesse direttamente nella falda o in fogna).



*Figura 1-4: Aree aeroportuali permeabili e impermeabili*

	<b><i>Aree impermeabili</i></b>	<b><i>Aree permeabili</i></b>	<b><i>Falda</i></b>	<b><i>Fogna</i></b>
Area [m <sup>2</sup> ]	4,886,303.86	8,188,107.54	1,433,184.20	3,453,119.66

*Tabella 1-2: Superfici aeroportuali permeabili e impermeabili*

Nell'assetto attuale l'intera infrastruttura, conta all'incirca 2,500 dipendenti per il regolare funzionamento della struttura. Secondo lo Studio di Impatto Ambientale dell'Aeroporto di Malpensa (SIA - 2010), il flusso giornaliero stimato si aggira all'incirca sui 24,500 passeggeri.

L'intero sistema di approvvigionamento idrico ed energetico dell'aeroporto è autonomo, consentendo all'aerostazione di non dipendere dalle reti di servizio dei vicini centri abitati.



La presenza di 12 stazioni di pompaggio consente di estrarre mediamente circa 60 l/s. Le portate emunte vengono convogliate in unica rete, con finalità idrico potabili, industriali ed antincendio.

Per poter sopperire alle proprie necessità energetiche l'aeroporto è provvisto di una stazione di cogenerazione gestita dalla società SEA-ENERGIA.spa.

Tale stazione, realizzata alla fine degli anni 90' è stata in seguito riammodernata in termini tecnologici, al fine di soddisfare le necessità energetiche dell'aeroporto e, in parte dei comuni limitrofi.

La produzione giornaliera si aggira mediamente sui 20 MW/h, di cui solo 16 MW/h sono utilizzati all'interno dell'aerostazione.

## 1.2 Inquadramento idrografico

### 1.2.1 Inquadramento idrografico superficiale

Il reticolo fluviale, insieme al sistema lacuale, rappresenta uno degli elementi naturali più significativi della provincia di Varese.

Il sistema idrografico della provincia di Varese ricade all'interno di quattro aree idrografiche di riferimento:

- Lago Maggiore (settore Nord-Ovest);
- Lago di Lugano (settore Nord-Est);
- Ticino Sublacuale (settore Sud-Ovest);
- Olona-Lambro meridionale (settore Sud-Est)

I bacini idrografici principali sono quelli del Ticino-Verbano, con direzione dei flussi idrici in direzione Nord-Ovest, del Ticino sublacuale, diretto verso sud e dell'Olona-Lambro, con reticolo idrico diretto verso Sud-Est.

Nel territorio sono presenti il Lago Maggiore, il Lago di Varese, il Lago di Comabbio, il Lago di Monate, tutti di origine glaciale e facenti parte di un unico bacino idrografico, ovvero quello del Fiume Ticino.



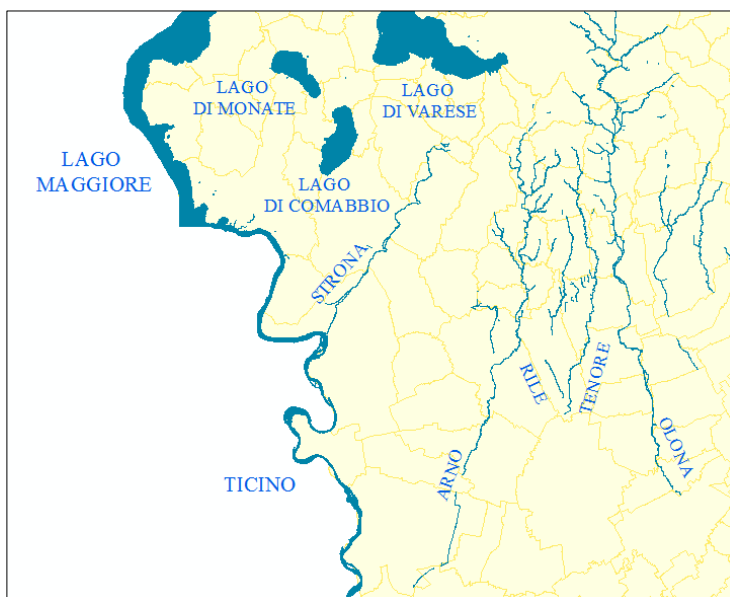


Figura 1-5: Stato delle acque superficiali della provincia di Varese

Data la notevole estensione e complessità della rete idrica superficiale (vd *Figura 1-5*), nell'elaborato presentato ci concentreremo principalmente sul fiume Ticino e il suo bacino idrografico.

Tale fiume, data la stretta vicinanza all'aeroporto, risulta essere una delle principali variabili influenzanti il comportamento del sistema di acquiferi nella zona in analisi.

#### *Fiume Ticino*

Il Ticino è un fiume della Svizzera meridionale e dell'Italia settentrionale, è il principale fiume della Provincia di Varese e la attraversa da nord a sud. Lungo 262.04 km, il Ticino nasce al Passo della Novena, al confine tra i cantoni svizzeri del Vallese e del Canton Ticino, da cui ne prende il nome, attraversa la Val Bedretto, la Val Leventina, la Val Riviera, il Piano di Magadino per immettersi nel Lago Maggiore.

All'uscita dal lago percorre la Pianura Padana e, dopo aver attraversato Pavia, confluisce nel Po. Bagna, oltre al territorio Elvetico, le Province di Varese, di Milano e di Pavia. La portata media a valle del lago Maggiore è circa pari a 300 m<sup>3</sup>/sec. E' classificato come fiume di 2° ordine rispetto all'affluenza nel Fiume Po.

I principali tributari del Fiume Ticino, che hanno sbocco nel Lago Maggiore, sono, da nord a sud, il torrente Giona, il fiume Tresa, il torrente Margorabbia, il torrente Boesio e il fiume Bardello; il Ticino riceve un solo affluente degno di nota, il torrente Strona, che nasce a sud del Lago di Varese e si getta nel Ticino nei pressi di Somma Lombardo.

Il bacino idrografico del Ticino ha una superficie complessiva di circa 6,033 km<sup>2</sup>.

Una parte significativa del suo territorio, il 53%, si trova in territorio svizzero, sicché solo 2,822 km<sup>2</sup> appartengono al territorio italiano (4% della superficie complessiva del bacino del Po). Complessivamente il bacino si trova per il 79% in ambito montano e per il 21% in pianura. La parte italiana del bacino si trova in ambito montano per il 49%.

### *Sbarramenti e canali artificiali*

A partire da Sesto Calende, in uscita dal Lago Maggiore, il fiume Ticino è caratterizzato da diversi sbarramenti al fine di redistribuire la portata del corso d'acqua naturale (300 m<sup>3</sup>/s) in diversi canali artificiali con finalità agricole industriali.

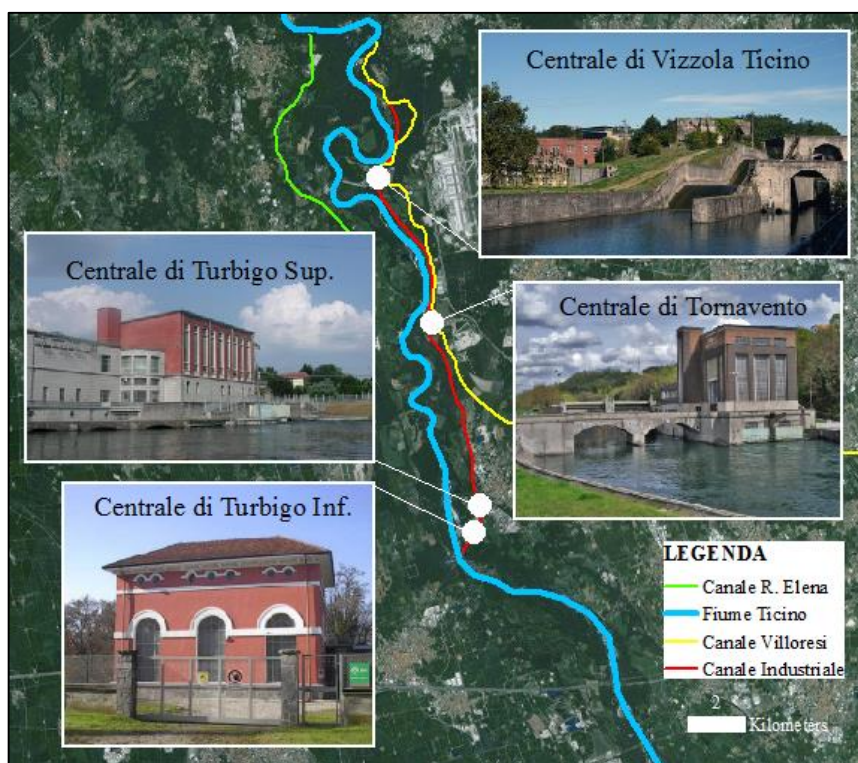
Il primo sbarramento che il fiume incontra sul suo percorso risulta essere la Diga di Miorina, situata in località Golasecca (VA). La struttura, ultimo grande tassello, in ordine di tempo, nel sistema di gestione delle acque del Ticino utilizza il lago Maggiore come bacino d'accumulo regolando l'alimentazione dei canali artificiali in sponda lombarda e piemontese.



*Figura 1-6: Fiume Ticino, canali artificiali e sbarramenti*

Il canale Regina Elena è derivato in sponda destra di Ticino a Nord-Ovest dell'abitato di Varallo Pombia, a monte della centrale di porto Torre e pertanto risulta essere la prima derivazione, in base alla progressiva chilometrica, dal Ticino sublacuale. Nel Canale Regina Elena vengono convogliati fino a 70 m<sup>3</sup>/s. A valle della sua derivazione, nell'invaso fluviale creato dallo sbarramento di Porto Torre, il Ticino non presenta problemi di carenza idrica e registra portate sempre superiori a 100 m<sup>3</sup>/s (fonte: Consorzio Ticino).

La centrale idroelettrica di Porto della Torre (vd *Figura 1-6*), la prima a valle del lago Maggiore, ha una concessione di portata massima pari a  $180 \text{ m}^3/\text{s}$  e media di  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  per produrre sul salto statico medio di 6.65 m la potenza nominale media di 9782 kW. L'acqua turbinata e restituita immediatamente al piede dello sbarramento senza alcuna interazione con altre concessioni o prelievi fino alla Diga del Panperduto.



*Figura 1-7: Fiume Ticino e centrali idroelettriche in sponda lombarda*

Dalla presa del “Panperduto” in località Maddalena (Somma Lombardo) al comune di Nosate, parallelamente al fiume Ticino scorrono due canali: il Canale Villoresi (un canale d’acqua artificiale realizzato per scopi irrigui tra il 1884 ed il 1888) ed il Canale Industriale Vittorio Emanuele III. Le portate nel Canale Villoresi variano mediamente tra  $70 \text{ m}^3/\text{s}$  (in estate) e  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  (in inverno) con punte massime di  $90 \text{ m}^3/\text{s}$  e periodi di condizioni idriche nulle (alla fine di Aprile e dalla fine di Settembre ai primi di Novembre). Le portate del canale industriale variano tra  $80\text{-}120 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Il Canale Industriale, fiancheggia il corso del fiume Ticino turbinando in successione l’acqua nelle centrali idroelettriche ENEL di Vizzola Ticino (VA), Tornavento (VA) e Turbigo Superiore, la quale redistribuisce parte della concessione industriale sopracitata nel Naviglio Grande, parte in un canale che alimenta il Naviglio Langosco, parte nel Ticino con un canale da cui viene alimentata la centrale ENEL di Turbigo Inferiore (vd *Figura 1-7*). Lungo la sponda piemontese sono presenti due centrali idroelettriche in località Naviglio Langosco-Treccione e Vigevano (PV).

Subito a valle dello Diga del Panperduto lungo la sponda destra sono presenti antiche utenze idriche (Roggia Clerici, Simonetta e Molinara in sponda destra e Roggia Visconti e Roggia Molinara in valle Ticino in sponda sinistra) per una concessione massima totale di 13 m<sup>3</sup>/s. Le portate del fiume Ticino a valle delle derivazioni risultano pertanto comprese tra i 40 m<sup>3</sup>/s e il DMV di 27 m<sup>3</sup>/s.

La complessa rete di canali presente su entrambe le sponde del fiume Ticino, eserciterà una funzione di parziale ricarica dell'acquifero. Non si è tenuto conto di tale afflusso all'interno del modello matematico della falda riportato nel Capitolo 4 in quanto trascurabile rispetto alle altre forzanti del sistema. (fonte: Est Villorresi).

### 1.2.2 Inquadramento idrografico sotterraneo

Dal punto di vista idrogeologico il territorio provinciale si presenta diversificato e, in prima analisi, può essere diviso in tre settori (Stato delle acque sotterranee Aree idrogeologica Ticino-Adda 2014): Settore Montano, Settore Pedemontano (collinare) e Settore di Pianura (vd *Figura 1-8*).

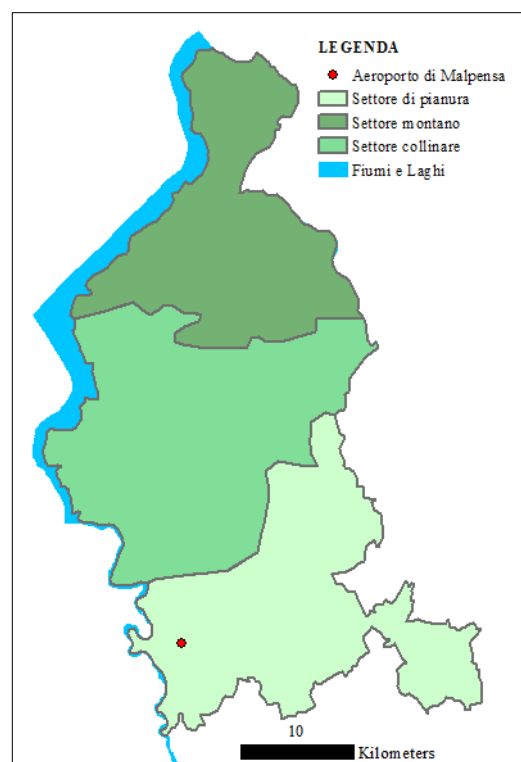


Figura 1-8: Settori idrografici sotterranei della provincia di Varese

- Il Settore montano è caratterizzato da falde acquifere locali e limitati arealmente, contenute nel substrato lapideo carbonatico o cristallino variamente carsificato o fratturato e nei depositi incoerenti di fondovalle (Val Veddasca, Valcuvia, Valtravaglia e Valceresio-Valbevera). Questo settore è caratterizzato da impatto antropico modesto che si concentra sui fondovalle e sul medio versante;
- Il Settore pedemontano o collinare è caratterizzato da acquiferi localizzati in parte nel substrato lapideo carbonatico e in parte nelle frazioni più permeabili dei depositi morenici, delle valli fluviali e dei bacini lacustri. Si tratta generalmente di acquiferi locali misti, di dimensioni limitate con medio/basso grado di protezione. L'impatto antropico è medio/alto;
- Il Settore di pianura, che costituisce l'oggetto di questo studio è caratterizzato da un importante acquifero superficiale e da una serie di acquiferi più profondi compresi tra l'asta drenate dei Fiumi Ticino ed Olona e riferibili all'alta pianura lombarda.

I caratteri idrogeologici del settore meridionale della Provincia di Varese sono riconducibili essenzialmente ad acquiferi diversamente sviluppati nei depositi fluvioglaciali Plio-leistocenici, con alimentazione principalmente per infiltrazione delle acque meteoriche.

Il sistema idrogeologico è caratterizzato da una successione di quattro gruppi di acquiferi sedimentari così distinti (Geologia degli Acquiferi Padani della Regione Lombardia Regione Lombardia e Eni-Divisione Agip, 2001):

- Gruppo acquifero A (Olocene-Pleistocene medio): è rappresentato da depositi in facies sedimentaria continentale, caratterizzati in prevalenza da ghiaie eterometriche, sabbie e ciottoli, con subordinate intercalazioni di conglomerati (nel settore orientale), argille e limi sabbiosi privi di continuità laterale.

Negli strati più superficiali si riscontrano localmente livelli di argille rossastre con ghiaie e ghiaie limosoargillose con spessori estremamente variabili (0÷20 m) in funzione del grado di erosione complessivo dell'area. L'unità presenta uno spessore complessivo di 80÷100 m a partire dal piano campagna ed è sede dell'acquifero superiore di tipo libero o localmente semiconfinato con soggiacenza media di circa 30÷35 m dal p.c..

Si presenta discretamente omogeneo su tutta la zona meridionale del territorio provinciale con direzione del flusso idrico verso Nord-Sud ed un grado di protezione da basso a molto basso in funzione dello spessore dello strato di argilla superficiale. Tale acquifero, captato dai numerosi pozzi ad uso industriale del territorio.

- Gruppo acquifero B (Pleistocene medio): è rappresentato da depositi in facies sedimentaria continentale e transizionale caratterizzati da ghiaie e sabbie con livelli arealmente continui

di argille e limi argillosi; sono presenti in profondità intercalazioni con arenarie, conglomerati e livelli con torba e fossili. Gli strati acquiferi presentano uno spessore complessivo medio stimato di circa 40 m con limite inferiore posto ad una profondità dal piano campagna variabili tra i 120 e 140 m;

L'unità è sede di falde idriche intermedie e profonde di tipo confinato e semiconfinato, generalmente riservate all'uso potabile e captate dai pozzi profondi. Gli acquiferi dell'unità presentano un basso grado di vulnerabilità intrinseca, essendo confinati da geomateriali caratterizzati da bassa permeabilità.

Il confinamento dell'acquifero B è generalmente confermato dalle buone caratteristiche qualitative delle acque captate ad uso idropotabile;

- Gruppo acquifero C (Pleistocene inferiore): è rappresentato da depositi in facies transizionale e marina caratterizzati da argille fossilifere, limi sabbiosi e torbe, omogeneamente riscontrate in tutta l'area ad una profondità di circa 170 - 240 m da p.c. con spessori variabili tra i 50 - 100 m.

L'unità, delimitata a tetto da superfici erosionali irregolari, può essere sede di rari acquiferi profondi di tipo confinato contenuti in livelli ghiaioso-sabbiosi di limitato spessore; le caratteristiche idrodinamiche sono buone per quanto concerne porosità e permeabilità.

- Gruppo Acquifero D: Il Gruppo Acquifero D è composto da una sequenza di argilla siltosa e limo con intercalazioni di sabbia fine e finissima in strati sottili alla base, sabbia grigia fine e media bioturbata nella parte intermedia e ghiaia poligenica grigia alternata a sabbia nella parte alta.

L'unità si sviluppa a distanze comprese tra i 220 e 940 da p.c con spessori minimi di 50 m e massimi dell'ordine dei 700 m.



## Caratteristiche del territorio

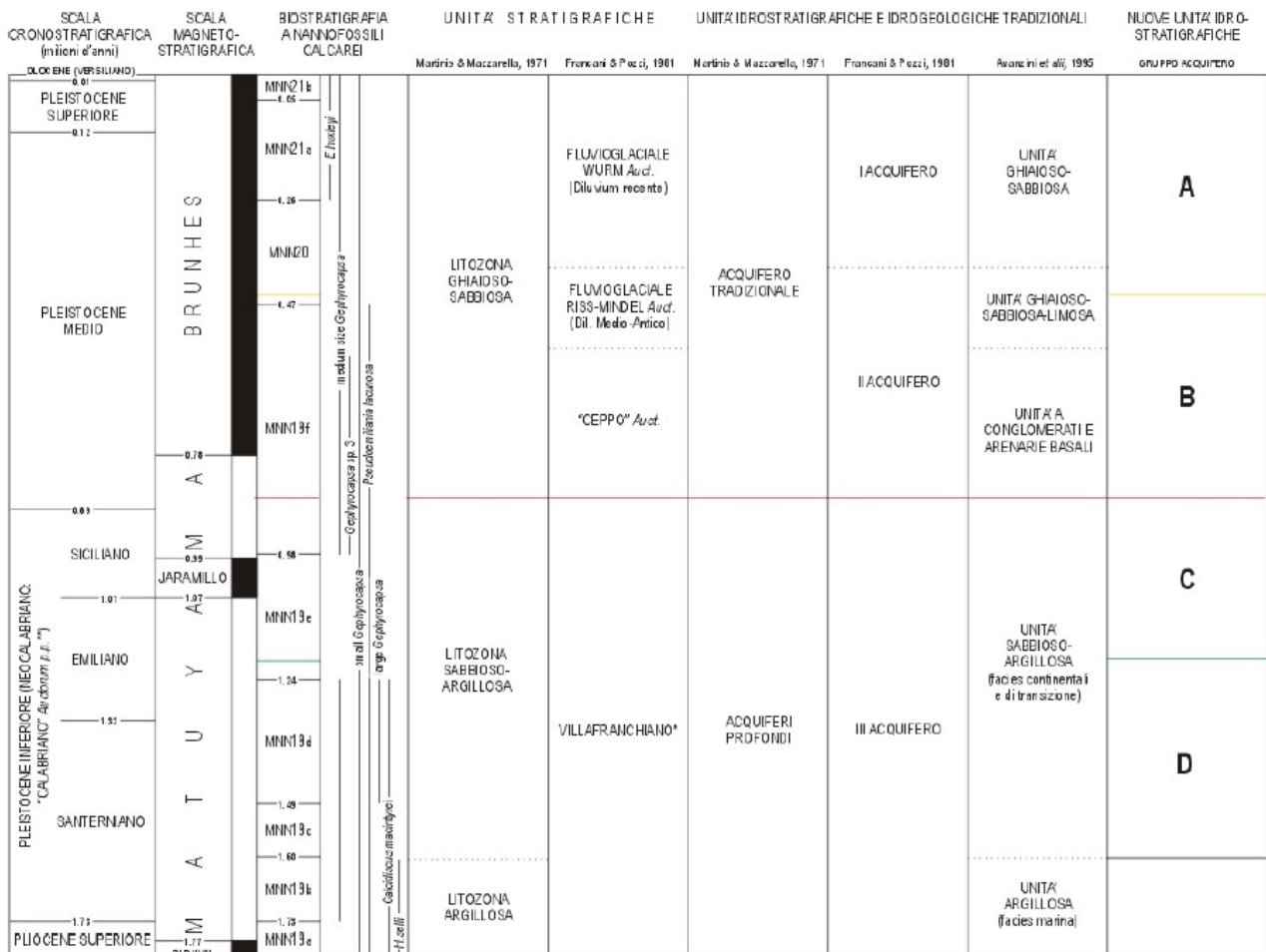


Figura 1-9: Schema dei rapporti stratigrafici tra Gruppi Acquiferi (da: *Geologia degli Acquiferi Padani della Regione Lombardia – Relazione tecnica. Regione Lombardia e Eni-Divisione Agip, 2002*)

Con riferimento alla *Figura 1-9*, nel presente progetto di tesi saranno dettagliatamente indagate le unità A e B corrispondenti all'acquifero tradizionale.

### 1.3 Inquadramento geologico e litologico

L'aeroporto di Malpensa 2000 si sviluppa a quota 205-230 m s.l.m. ed occupa la superficie di un antico ed elevato terrazzo morfologico fluvioglaciale (di età pleistocenica superiore) del fiume Ticino. L'area fa parte dell'alta pianura lombarda e degrada con lieve pendenza verso Ovest, cioè verso la valle del fiume Ticino su cui si affaccia con una serie di terrazzamenti.

Dal punto di vista litologico, i depositi che caratterizzano l'area in esame sono costituiti da alluvioni ciottolose e ghiaioso-sabbiose. Si tratta di una formazione litologicamente omogenea, pur con variazioni locali, poco alterata in superficie (al massimo nei primi 2 m) che mostra una certa continuità oltre che lateralmente anche nello spessore (100-120 m).

L'area di interesse è principalmente formata da ghiaie e sabbie del Diluvium Recente, alla cui base si trovano i conglomerati del ceppo e/o i depositi fluvioglaciali antichi del Ferretto. Lo spessore del deposito ghiaioso del Diluvium viene valutato in circa 90-100 m. Al di sotto di questo deposito permeabile vi è uno strato impermeabile omogeneo di spessore variabile tra i 20 e 100 m; ciò impedisce la comunicazione tra la falda freatica e gli acquiferi più profondi.

Guardando in maggior dettaglio la porzione più superficiale del deposito ghiaioso, esso appare formato da ghiaie sabbiose contenenti pochi ciottoli che raramente superano i 150 mm di diametro caratteristico.

La frazione sabbiosa rappresenta circa un terzo dell'intero volume. Entro la compagine alluvionale si rinvencono, con disposizione casuale, lenti esclusivamente sabbiose di limitato spessore e di limitato sviluppo areale. I fenomeni di cementazione sono rari. Dal punto di vista strutturale, il complesso del Diluvium Recente può considerarsi uniforme anche se sono frequenti i fenomeni di stratificazione incrociata e le strutture gradate.

Più nel dettaglio, la successione sedimentologica dei primi metri del terreno nell'area di interesse si può descrivere come segue:

- Uno spessore di circa 0.6 m (dal piano campagna) è formato da terreno vegetale. Tale spessore può assottigliarsi fino ad un minimo di 0.2 m e raggiungere localmente un massimo di 1.5 m.
- Uno spessore di circa 0.6 m è formato da ghiaie sabbiose e, localmente, da sabbie con un certo contenuto di fine e un certo livello di alterazione, indotti entrambi dalla vicinanza della superficie.
- Oltre la profondità media di 1.2 m, si incontrano principalmente ghiaie sabbiose inalterate e relativamente uniformi, con occasionale presenza di sabbia.

L'analisi di dettaglio dei geomateriali presenti nell'area di studio è svolta nel *Capitolo 3*.





## 2 Analisi dati

### 2.1 Analisi dati pluviometrici

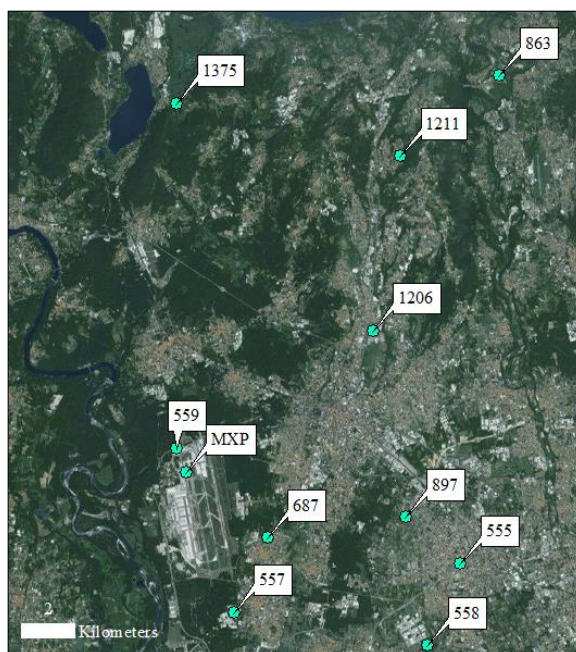
#### *Introduzione*

In questo lavoro sono state analizzate le precipitazioni registrate nelle stazioni pluviometriche del bacino idrografico in esame e in quelle ad esso limitrofe (vd. *Figura 2-1*).

Si sono esaminate le precipitazioni giornaliere rilevate da ARPA Varese reperibili dal Geoportale ARPA della Regione Lombardia (Sito: <http://idro.arpalombardia.it/pmapper-4.0/map.phtml>).

Nel complesso sono state prese in esame i dati rilevati da 10 stazioni pluviometriche ARPA nel periodo 2005-2015.

Si sono inoltre analizzati i dati di una stazione pluviometria ubicata nell'aeroporto di Milano Malpensa forniti dal Servizio Meteorologico dall'Aeronautica Militare e dall'ENEL (Fonte: SEA) a partire dagli inizi del 2000 fino al 01/01/2014.



*Figura 2-1: Stazioni pluviometriche ARPA Varese*

Si riportano in *Tabella 2-1* i dati caratteristici delle stazioni analizzate.

Tipo di stazione	Codice	Quota [m s.l.m.]	Comune	Provincia	Località	Inizio pubblicazioni	Fine pubblicazioni	Utm X	Utm Y
Pluviometrica	555	222	Busto Arsizio	VA	Via Magenta	25/05/1991	oggi	5050810	488313
Pluviometro	557	204	Lonate Pozzolo	VA	v.Veneto	05/12/1996	ad oggi	5048975	479783
Pluviometrica	558	206	Busto Arsizio	VA	Accademia	05/12/1998	oggi	5047718	487088
Pluviometro	559	210	Somma Lombarda	VA	-	20/03/2000	ad oggi	5055150	477613
pluviometro	687	215	Ferno	VA	-	13/08/2007	ad oggi	5051773	481053
IdroNivoMeteo	863	276	Lozza	VA	Ponte vedano	24/07/1998	26/03/2013	5069163	489791
Idronivometeo	897	242	Busto Arsizio	VA	Via Rossini	26/03/2003	oggi	5052553	486271
Idronivometeo	1206	274	Cavaria con Premezzo	VA	Via Cantalupa	01/01/2004	oggi	5059567	485026
IdroNivoMeteo	1211	379	Castronno	VA	-	01/01/2004	oggi	5066146	486058
IdroNivoMeteo	1375	241	Varano Borghi	VA	-	27/03/2013	oggi	5068133	477631
IdroNivoMeteo	MXP	226	Somma Lombarda	VA	Aeroporto di Malpensa	01/01/2000	01/01/2014	5054255	477978

*Tabella 2-1: Stazioni pluviometriche ARPA Varese*

Data la lentezza della risposta della falda, non risulta significativa l'analisi delle piogge di breve durata, ma piuttosto i totali annui registrati nei diversi pluviometri e riportati in *Tabella 2-2*. In tabella viene inoltre riportata (a) la pioggia cumulata mensile media nel periodo considerato (media stazione) ed il relativo coefficiente di varianza (CV1); la pioggia cumulata mensile media per tutte le stazioni (media annua) ed il relativo coefficiente di varianza (CV2).

Stazioni pluviometriche	555	557	558	559	687	863	897	1206	1211	1375	MXP	Media annua	CV2
2005	636.80	684.80	626.60	863.60	-	743.80	645.80	355.10	-	-	598.00	644.31	22%
2006	847.40	761.20	869.20	517.40	-	992.00	943.20	891.30	541.80	-	844.90	800.93	21%
2007	677.20	827.00	898.60	489.80	482.60	1,045.20	834.80	730.50	715.60	-	790.30	749.16	23%
2008	1,280.20	1,544.20	1,372.80	1,278.60	1,501.20	1,936.20	1,616.20	1,253.80	1,134.40	-	1,557.20	1,447.48	16%
2009	945.40	1,218.20	1,260.80	1,242.40	1,275.00	1,531.80	1,438.00	1,504.50	1,448.50	-	1,301.80	1,316.64	13%
2010	1,441.20	1,324.40	1,167.60	1,529.40	1,606.00	1,094.00	1,511.40	1,625.50	1,359.80	-	1,607.80	1,426.71	13%
2011	744.60	782.80	931.60	929.60	858.60	-	934.00	990.60	923.00	-	853.50	883.14	9%
2012	909.40	1,067.60	553.60	1,033.80	1,060.20	-	1,090.60	1,185.80	1,271.70	-	875.80	1,005.39	21%
2013	952.00	1,086.80	1,141.00	1,077.00	1,185.00	-	1,157.40	1,292.20	1,491.80	1,395.00	772.60	1,155.08	18%
2014	1,886.60	1,266.20	1,584.20	1,459.40	1,229.60	-	1,867.60	2,063.60	2,401.80	2,396.60	-	1,795.07	25%
2015	991.20	936.40	993.40	849.40	1,027.80	-	1,048.60	1,249.40	1,174.40	1,310.80	-	1,064.60	14%
<b>Media stazione</b>	1,028.36	1,045.42	1,036.31	1,024.58	1,136.22	1,223.83	1,189.78	1,194.75	1,246.28	1,700.80	1,022.43		
<b>CV1</b>	36%	26%	30%	33%	30%	35%	31%	38%	41%	36%	36%		

*Tabella 2-2: Precipitazioni cumulate annue [mm/anno] delle stazioni pluviometriche nel periodo 2005-2015*

In *Figura 2-2* sono diagrammati i valori annui mediati sull'intero periodo disponibile, per le stazioni pluviometriche considerate, mentre in *Figura 2-3* si riportano gli andamenti di

precipitazione mediata tra le stazioni per ogni anno dal 2005 al 2015. Si evidenzia che nelle tre stazioni in prossimità della zona aeroportuale (557, 559, 687) la precipitazione media annua è molto simile (massima differenza percentuale inferiore al 10%). Anche la variabilità temporale della precipitazione cumulata annua nelle tre stazioni è paragonabile, con un coefficiente di varianza pari a circa 30%.

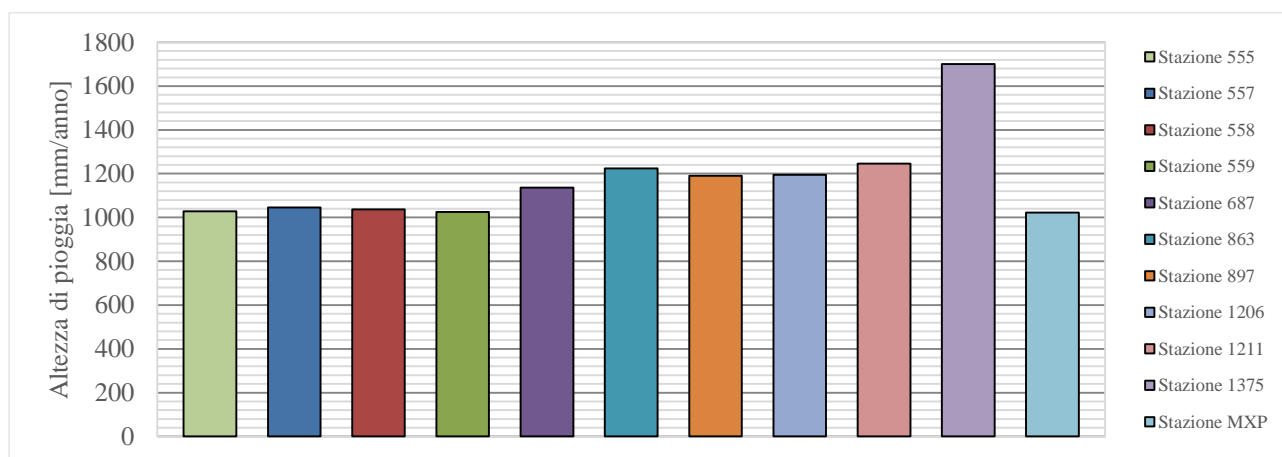


Figura 2-2: Altezze medie annue nelle stazioni pluviometriche nel periodo 2005-2015

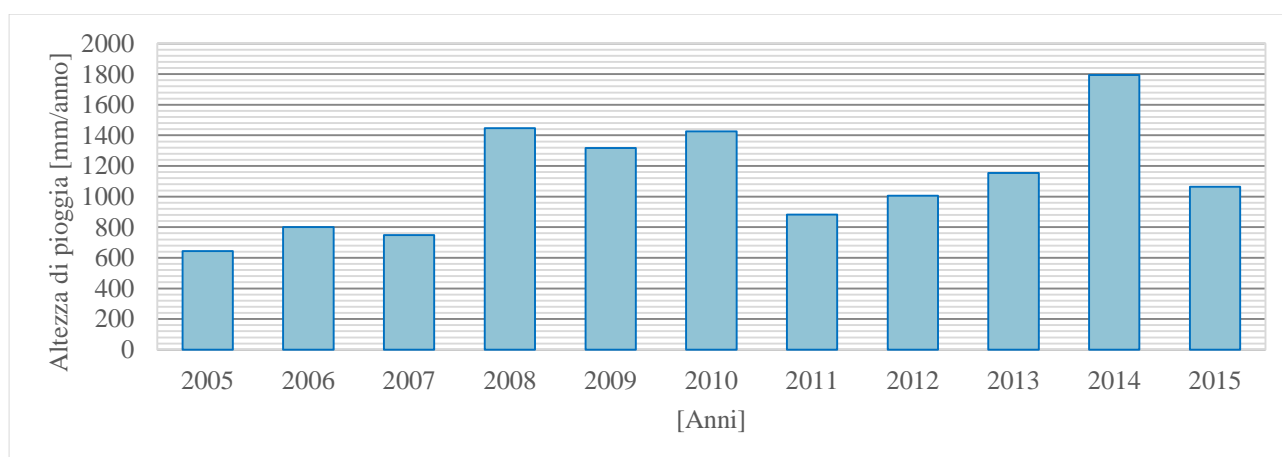


Figura 2-3: Precipitazione cumulate annue mediate tra le stazioni pluviometriche analizzate

Si è inoltre effettuata un'analisi statistica dei dati pluviometrici cumulati.

Nel seguito le piogge medie mensili sono considerate variabili aleatorie. Questo approccio permette di considerare nell'analisi pluviometrica sia la non deterministica (spaziale e temporale) conoscenza delle variabili in esame sia l'errore di misura associato.

Studiano i dati pluviometrici, si è cercato di risalire alla forma della distribuzione di probabilità più adatta a riprodurre le principali proprietà statistiche delle osservazioni stesse stimando i parametri di tale distribuzione. In seguito si è effettuato un test di ipotesi valutando la bontà di tale scelta.

La distribuzione di probabilità  $p(x)$  nel caso dei volumi medi mensili si ipotizza normale, ossia di tipo Gaussiano.

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.1)$$

Essendo  $\mu$  la media della popolazione e  $\sigma$  lo scarto quadratico medio. La probabilità cumulata è definita come:

$$P(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \cdot dx \quad (2.2)$$

Nelle *Figure 2-4 – 2-14* si osservano gli andamenti delle distribuzioni di probabilità campionarie  $p(x)$  e  $P(x)$  dell'altezza di precipitazione mensile per tutte le stazioni ARPA analizzate nel periodo 2005-2015.

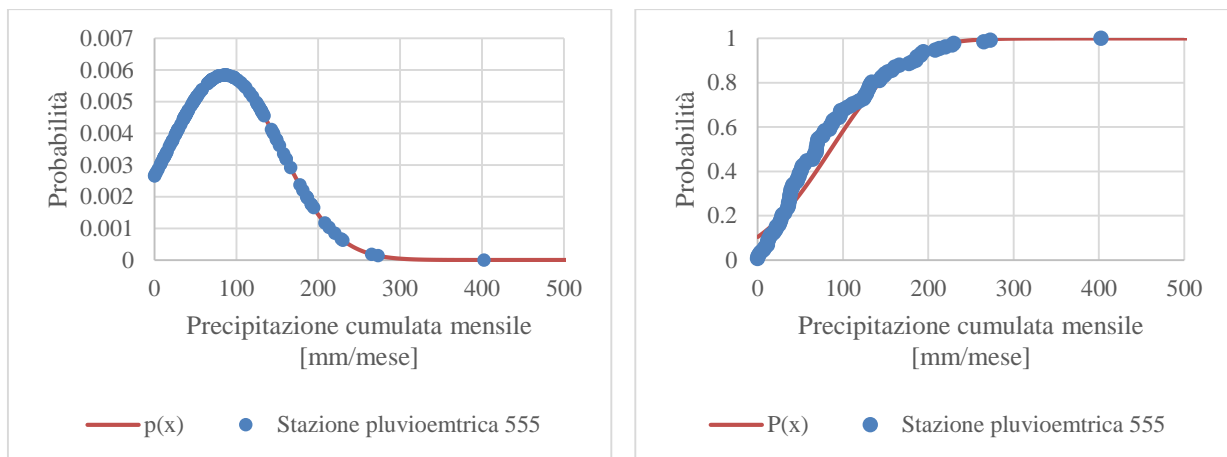


Figura 2-4: Distribuzione di probabilità  $p(x)$  e  $P(x)$  di precipitazione della stazione pluviometrica 555

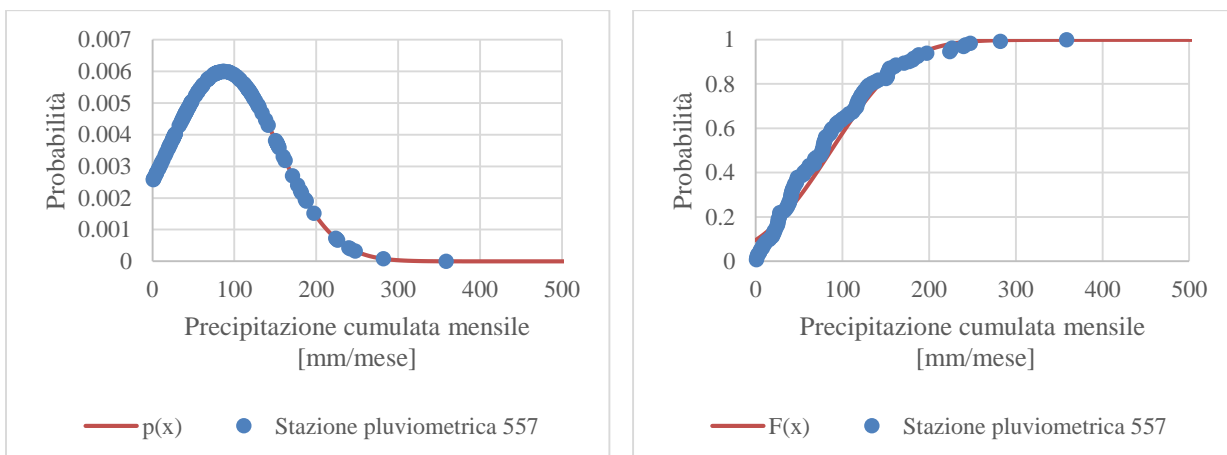


Figura 2-5: Distribuzione di probabilità  $p(x)$  e  $P(x)$  di precipitazione della stazione pluviometrica 557

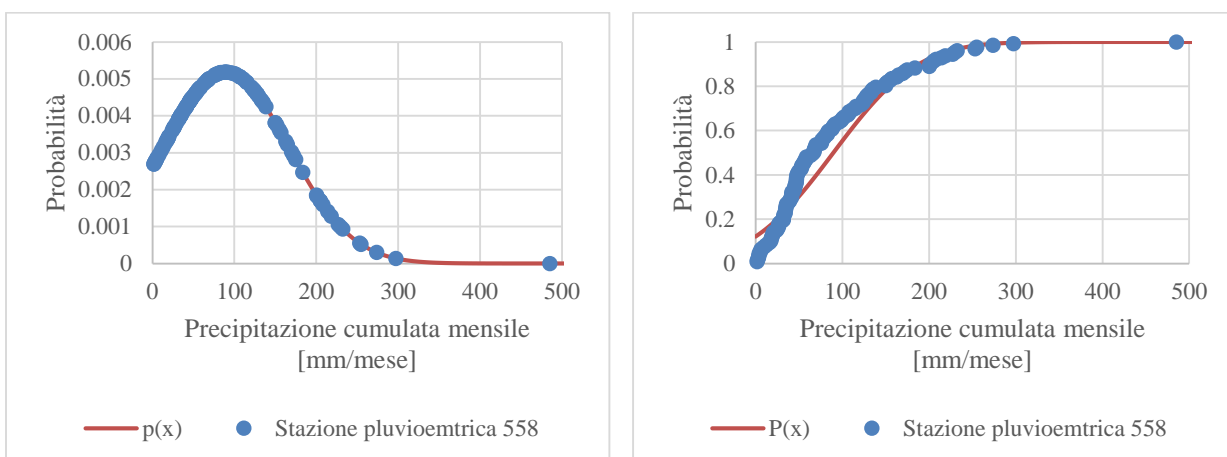


Figura 2-6: Distribuzione di probabilità  $p(x)$  e  $P(x)$  di precipitazione della stazione pluviometrica 558

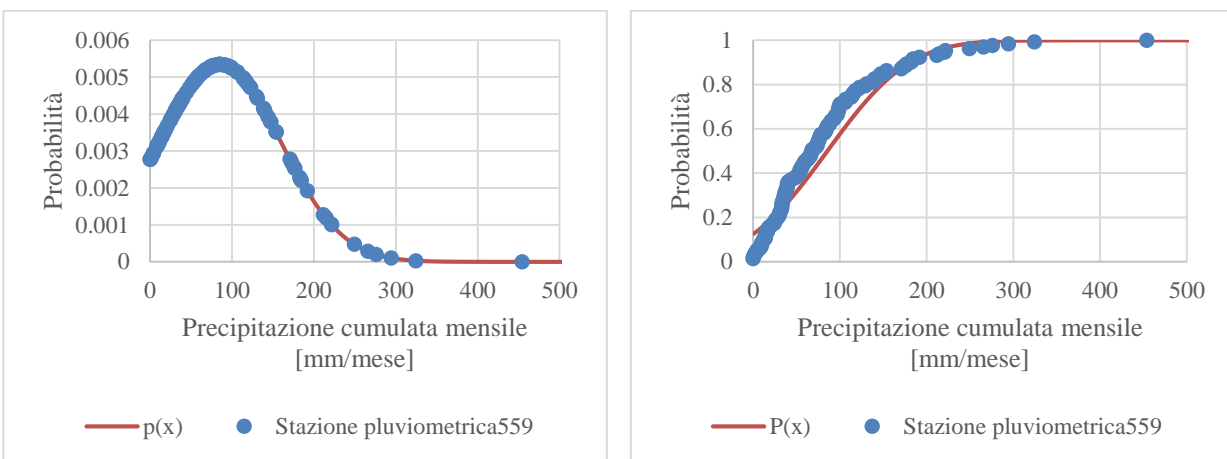


Figura 2-7: Distribuzione di probabilità  $p(x)$  e  $P(x)$  di precipitazione della stazione pluviometrica 559

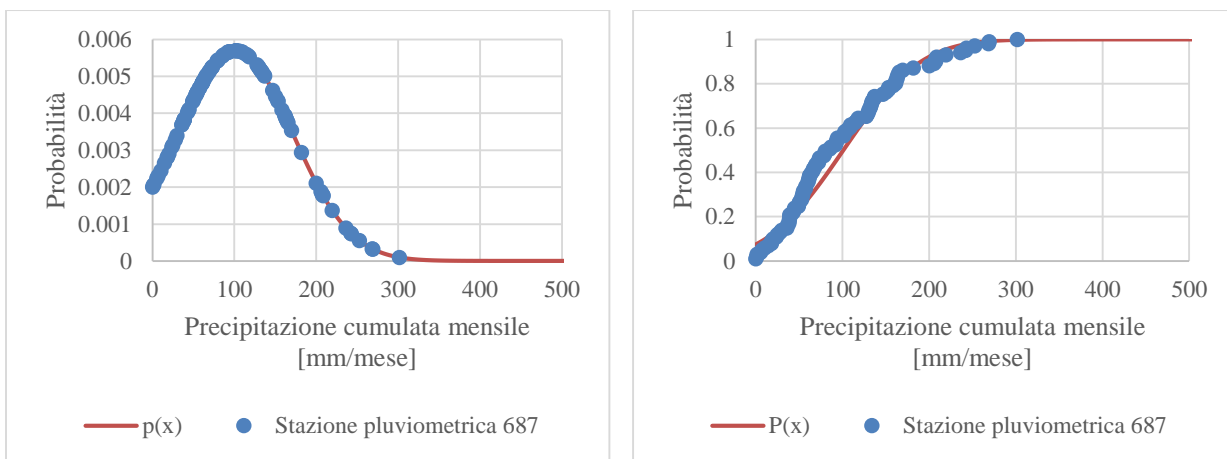


Figura 2-8: Distribuzione di probabilità  $p(x)$  e  $P(x)$  di precipitazione della stazione pluviometrica 687

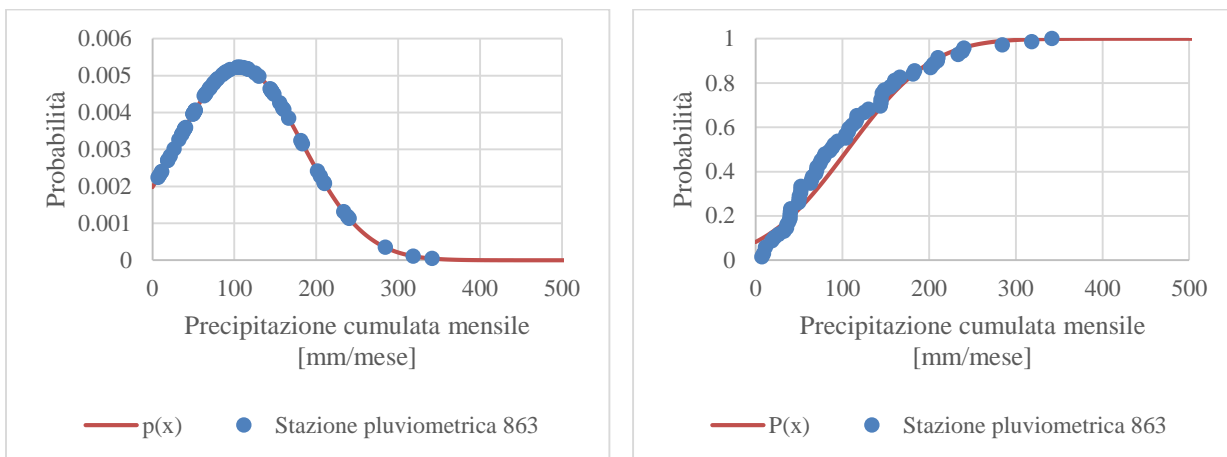


Figura 2-9: Distribuzione di probabilità  $p(x)$  e  $P(x)$  di precipitazione della stazione pluviometrica 863

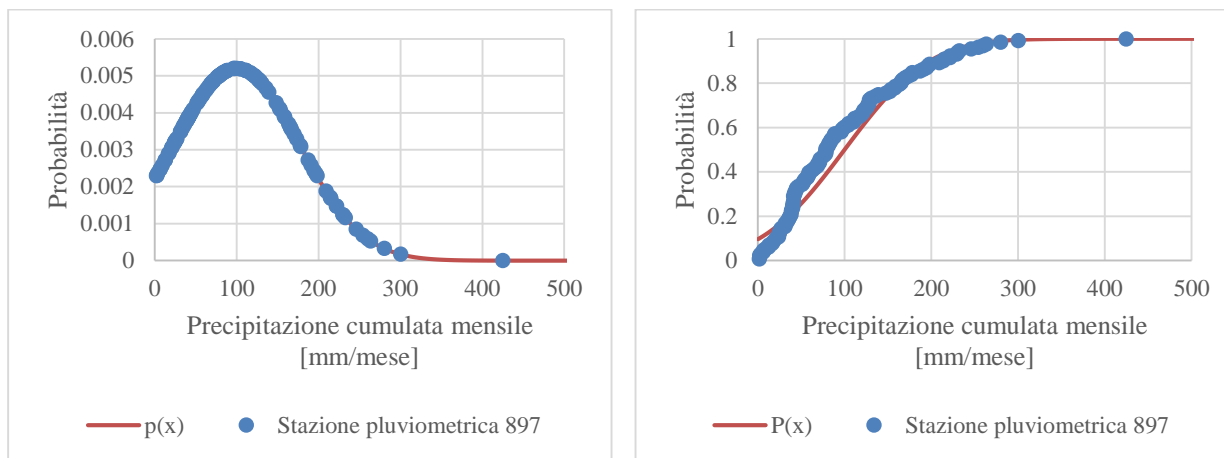


Figura 2-10: Distribuzione di probabilità  $p(x)$  e  $P(x)$  di precipitazione della stazione pluviometrica 897

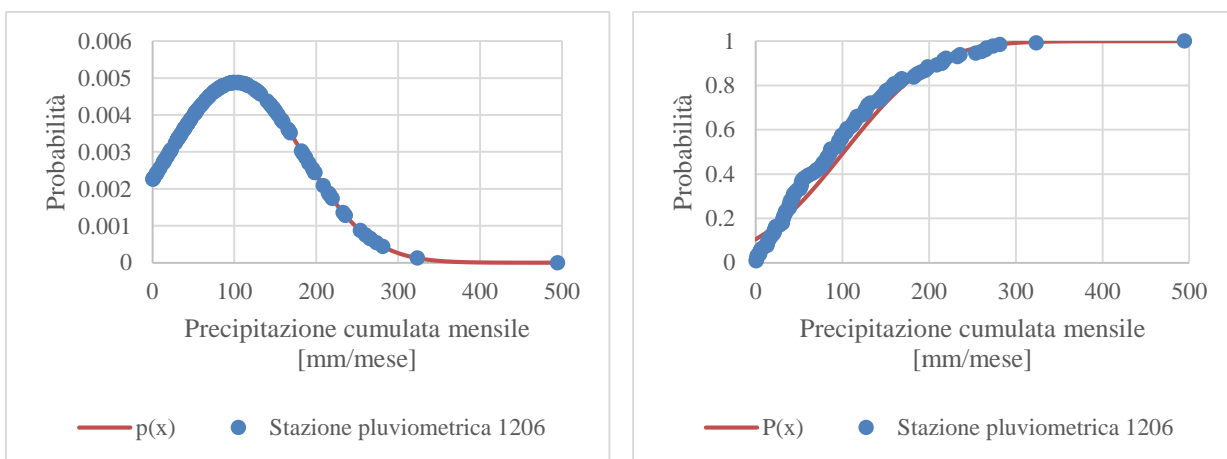


Figura 2-11: Distribuzione di probabilità  $p(x)$  e  $P(x)$  di precipitazione della stazione pluviometrica 1206

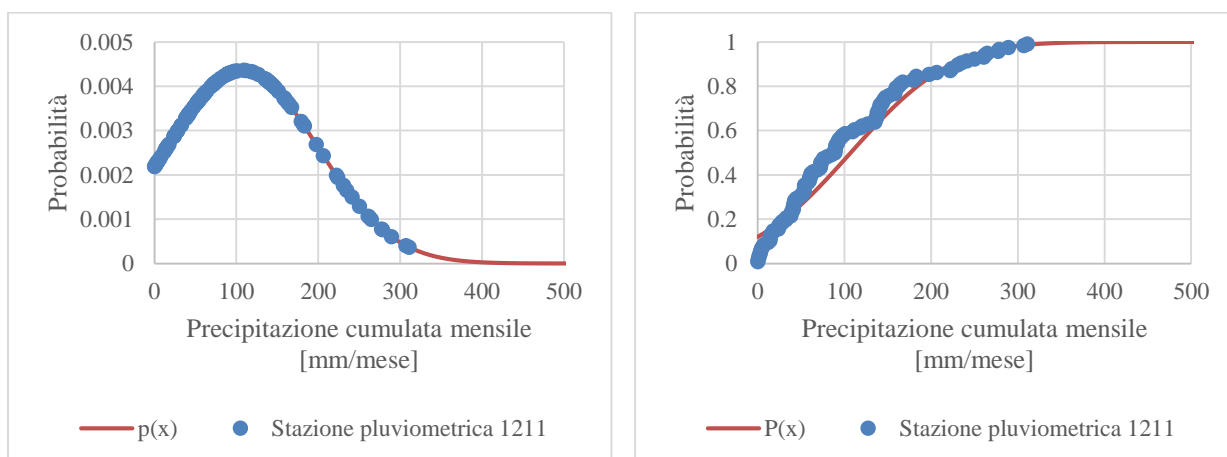


Figura 2-12: Distribuzione di probabilità  $p(x)$  e  $P(x)$  di precipitazione della stazione pluviometrica 1211

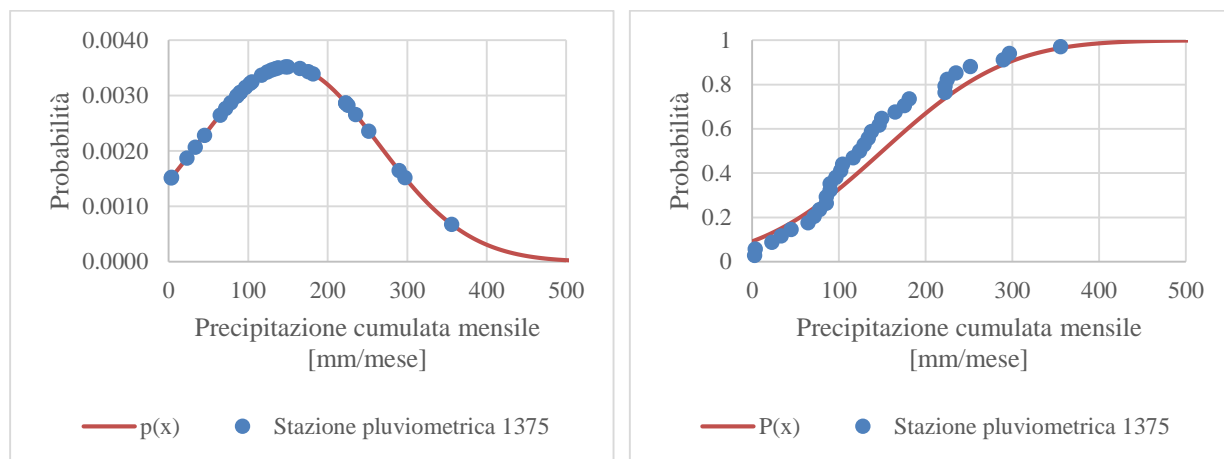


Figura 2-13: Distribuzione di probabilità  $p(x)$  e  $P(x)$  di precipitazione della stazione pluviometrica 1375

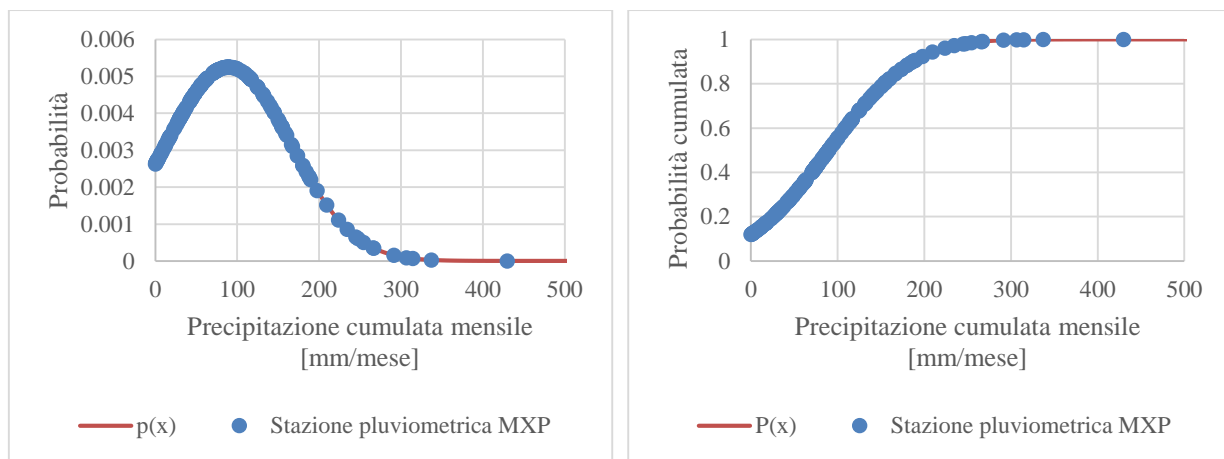


Figura 2-14: Distribuzione di probabilità  $p(x)$  e  $P(x)$  di precipitazione della stazione pluviometrica MXP

Il test di Pearson effettuato sui dati disponibili ha evidenziato che si può accettare l'ipotesi di distribuzione normale del campione con un livello di significatività pari al 5% per tutte le stazioni tranne per la 1375.



Si riportano in *Tabella 2-3* i valori medi di precipitazione mensile e le relative deviazioni standard.

<i>Stazione</i>	<i>Media [mm/mese]</i>	<i>Dev. St. [mm/mese]</i>
555	85.69	68.25
557	87.11	66.46
558	89.75	76.95
559	85.38	74.60
687	101.24	70.01
863	106.42	76.39
897	99.90	76.65
1206	101.87	81.74
1211	107.43	91.48
1375	150.07	113.22
MPX	89.50	75.98

*Tabella 2-3: Precipitazioni medie mensili e deviazioni standard*

## 2.2 Analisi fiume Ticino

### *Introduzione*

Il presente capitolo analizza le caratteristiche idrauliche del fiume Ticino, posto in prossimità dell'aeroporto di Malpensa, valutandone la modellazione per le finalità del presente progetto di tesi.

### *Dati*

A partire dalla fine del Lago Maggiore sono presenti 3 stazioni di rilevamento ARPA, le quali registrano quotidianamente l'andamento del livello idrometrico della rete fluviale (Sito: <http://idro.arpalombardia.it/>).

Unitamente a questi dati di livello, l'ARPA Varese ha reso disponibili gli andamenti di portata giornaliera a valle dello sbarramento di Miorina, nella stazione di rilevamento di Vigevano e ulteriori dati idrometrici (mediati mensilmente) in coincidenza del ponte di Oleggio.

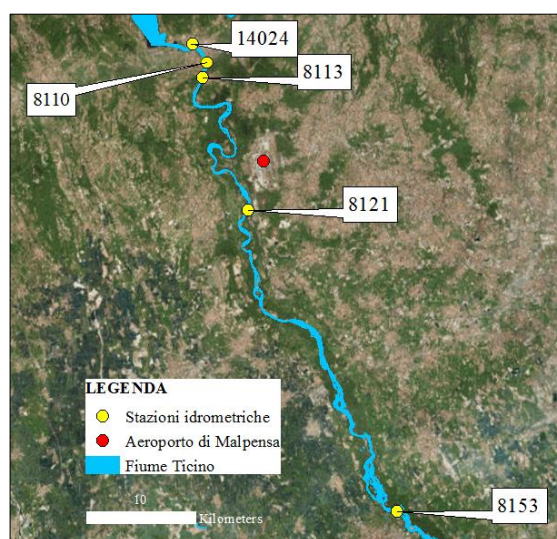


Figura 2-15: Stazioni idrometriche lungo il fiume Ticino

Codice	Comune	Provincia	Tipo di stazione	Luogo	Utm_X	Utm_Y	Data di inizio rilevamento	Data di fine rilevamento	Zero idrometrico [m s.l.m.]
14024	Sesto Calende- alzaia	VA	IdroNivoMeteo	Verbano	471899.24	5063668.82	23/01/2012	Ad oggi	192.919
8113	Ticino a Miorina	VA	IdroNivoMeteo	Golasecca (VA), strada lungo Ticino	472749.84	5060605.9	27/07/1998	Ad oggi	189.915
8121	Oleggio	NO	Idrometrica	Ponte di Oleggio (SS527)	476930.18	5048476.11	01/01/2001	Ad oggi	n.d
8153	Ticino a Vigevano	VA	IdroNivoMeteo	Vigevano (PV), ponte su SS494	490615.16	5020794.93	25/05/2000	Ad oggi	84.691

Tabella 2-4: Stazioni idrometriche del fiume Ticino

Codice	Comune	Provincia	Tipo di stazione	Luogo	Utm X	Utm Y	Data di inizio rilevamento	Data di fine rilevamento
8110	Diga della Miorina	VA	IdroNivoMeteo	Verbano	473195.32	5062060.48	16/07/2013	01/10/2015
8153	Ticino a Vigevano	VA	IdroNivoMeteo	Vigevano (PV), ponte su SS494	490615.16	5020794.93	01/01/2010	07/03/2015

Tabella 2-5: Stazioni di misurazione della portata del fiume Ticino

### Dati geometrici

Il corso d'acqua è caratterizzato da un assetto idraulico di tipo naturale differente a seconda della zona di scorrimento.

Nella parte sublacuale, tra lo sbarramento Villoresi e il ponte (SS527) nel Comune di Oleggio, il Ticino è caratterizzata per lunga parte da un alveo di tipo golenale e a tratti inciso; le sezioni mediamente larghe tra i 50-120 m di fondo ghiaioso hanno sponde poco ripide e vegetate.

La regolazione della portata, esercitata dagli sbarramenti di monte altera notevolmente il regime fluviale; i livelli idrometrici, nel tratto costeggiante l'aeroporto, hanno mediamente

escursioni poco rilevanti (vd *Tabella 2-6*), se non ha causa di eventi eccezionali o manovre di derivazione dei canali artificiali.

<i>Codice</i>	<i>Media</i>	<i>Massimo</i>	<i>Minimo</i>	<i>Deviazione standard</i>
14024	0.97	3.52	-0.179	0.47
8113	2.48	4.02	1.38	0.33
8121	-0.11	1.95	-0.78	0.46
8153	-0.87	1.71	-1.39	0.33

*Tabella 2-6: Livelli idrometrici [m] delle stazioni lungo il fiume Ticino riferiti allo zero idrometrico*

Il Ticino esercita generalmente un'azione drenante sull'acquifero non solo per la falda superficiale della provincia di Varese ma anche per quella Novarese; tali tesi sono supportate da precedenti elaborati tecnici rilasciati dagli enti preposti per entrambe le sponde del corso d'acqua. (Cit. PTA provincia di Varese). L'azione drenante del Ticino è anche supportata dall'analisi piezometrica dettagliata nel *Capitolo 4*.

Si è inizialmente considerato come profilo di piena relativo al tempo di ritorno di 200 anni (cui corrisponde una portata al colmo  $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ ) documentato nel Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) della Regione Lombardia. Con riferimento alla numerazione del PAI, si sono considerate le sezioni comprese tra la No. 42 (Sbarramento di Miorina) e la Sez. No. 30 (*ponte stradale di Oleggio*) come rappresentato in *Figura 2-16*. I risultati delle elaborazioni relative al calcolo della quota idrica,  $H$ , valutata nella generica sezione di calcolo in condizioni di piena sono riportati nel succitato PAI. Per completezza, tali quote sono indicate in *Tabella 2-7*, insieme alle coordinate,  $x$  ed  $y$ , delle relative sezioni di calcolo.

<i>Sez. No.</i>	<i>Utm X</i>	<i>Utm Y</i>	<i>H (Tr=200 anni) [m. s.l.m]</i>
42	473153.00	5061865.00	201.7
41	472122.58	5058431.17	192.62
40	474271.07	5058227.98	190.36
39	474463.42	5058336.35	190.15
38	475243.71	5057932.67	186.8
37	475257.26	5057797.21	184.82
36	474642.25	5056534.66	180.19
35	475159.73	5056009.06	178.99
34	475725.98	5054865.73	176.81
33	474579.94	5053909.34	173.96
32	474089.56	5053264.52	166.6
31	476010.47	5051313.84	156.77
30	477007.50	5048604.53	151.63

*Tabella 2-7: Sezioni PAI del fiume Ticino*

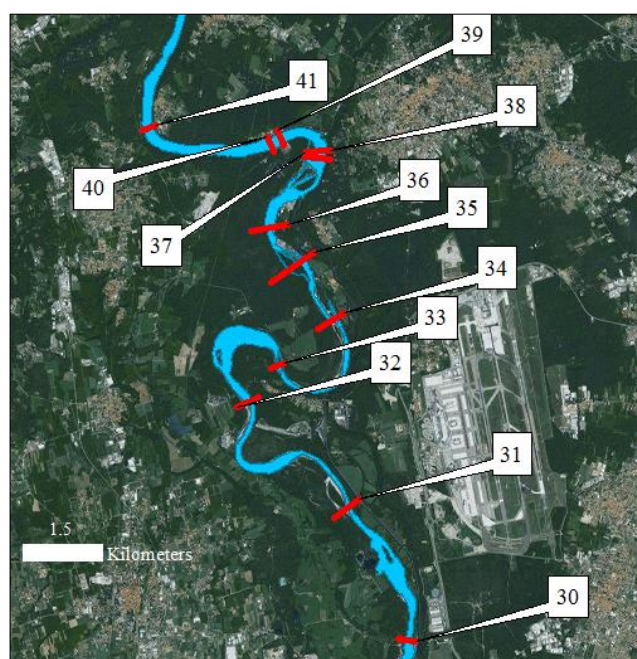


Figura 2-16: Sezioni PAI sul fiume Ticino

Sulla base dei livelli idrometrici delle stazioni (8113) e di portata della sezione di Miorina (8110) disponibili nel periodo 2013-2015, è stato possibile ricostruire due scale di portata, stimando una differenza pari a 1.5 m tra il tirante idrico in condizioni di deflusso della portata di piena bicentennale ( $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ed in condizioni di deflusso medio annuo ( $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Partendo dai valori riportati in *Tabella 2-7*, sono stati stimati i livelli idrici medi nelle sezioni di interesse (dalla sez. 42 alla sez. 30) (vd *Tabella 2-8*).

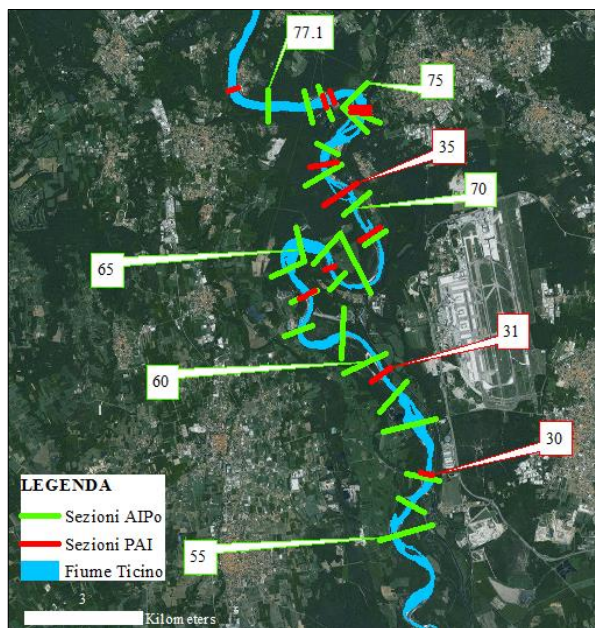
Sez. No.	Utm X	Utm Y	h [m. s.l.m]
42	473153.00	5061865.00	200.2
41	472122.58	5058431.17	191.12
40	474271.07	5058227.98	188.86
39	474463.42	5058336.35	188.65
38	475243.71	5057932.67	185.30
37	475257.26	5057797.21	183.32
36	474642.25	5056534.66	178.69
35	475159.73	5056009.06	177.49
34	475725.98	5054865.73	175.31
33	474579.94	5053909.34	172.46
32	474089.56	5053264.52	165.10
31	476010.47	5051313.84	155.27
30	477007.50	5048604.53	150.13

Tabella 2-8: Carichi medi annui stimati lungo il fiume Ticino

Si evidenzia che la stima fornita nella *Tabella 2-8* è altamente incerta in quanto non supportata da misure disponibili nel tratto interessato. Per questa ragione nel modello si valuteranno gli effetti di diverse condizioni al contorno del fiume Ticino (in termini di carico e di flusso) sulla falda idrica sotterranea.

La quota del fondo alveo del fiume Ticino è stata ricavata dalle sezioni AIPo (vd *Figura 2-17* e *Tabella 2-9*).

(Sito: [http://geoportale.agenziapo.it/cms/index.php?option=com\\_aipografd3&view=main](http://geoportale.agenziapo.it/cms/index.php?option=com_aipografd3&view=main)).



*Figura 2-17: Sezioni PAI e AIPo*

<i>Sezione</i>	<i>Utm X</i>	<i>Utm Y</i>	<i>Quota fondo [m s.l.m]</i>
77.1	472906.12	5057947.57	182.9
77	473928.79	5057959.90	181.42
76	474335.39	5058064.63	181.16
75	475123.96	5058249.45	177.45
74	475247.17	5057738.11	179.89
73	475130.12	5057596.42	177.94
72	474366.20	5056900.26	172.96
71	474384.68	5056253.39	173.68
70	475123.96	5055446.34	172.36
69	475622.97	5054590.00	167.65
68	475395.03	5053419.47	165.34
67	474705.03	5053530.37	164.2
66	474298.43	5054251.17	161.47
65	473743.97	5054318.93	161.83
64	473497.54	5053875.3	160.26

63	473891.82	5053123.77	158.17
62	473700.84	5052279.74	153.82
61	474797.44	5052162.71	152.61
60	475536.72	5051472.70	151.63
59	476208.24	5050677.97	149.24
58	476731.90	5049914.05	145.78
57	476929.04	5048497.09	146.16
56	476534.75	5047825.58	144.66
55	476109.67	5047018.53	141.51

Tabella 2-9: Sezioni AIPo

Note le sezioni dell'alveo nel tratto di fiume in costa all'aeroporto di Malpensa si è deciso di effettuare il tracciamento dei profili di moto permanente con l'impiego del software *HEC-RAS* nelle le due condizioni di flusso sopra citate (Profilo B, con portata  $Q=2000 \text{ m}^3/\text{s}$  e Profilo A in condizioni di flusso medio  $Q=300 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

In *Appendice I* si riportano tutti i dati e le condizioni imposte e in *Figura 2-18* i profili ottenuti.

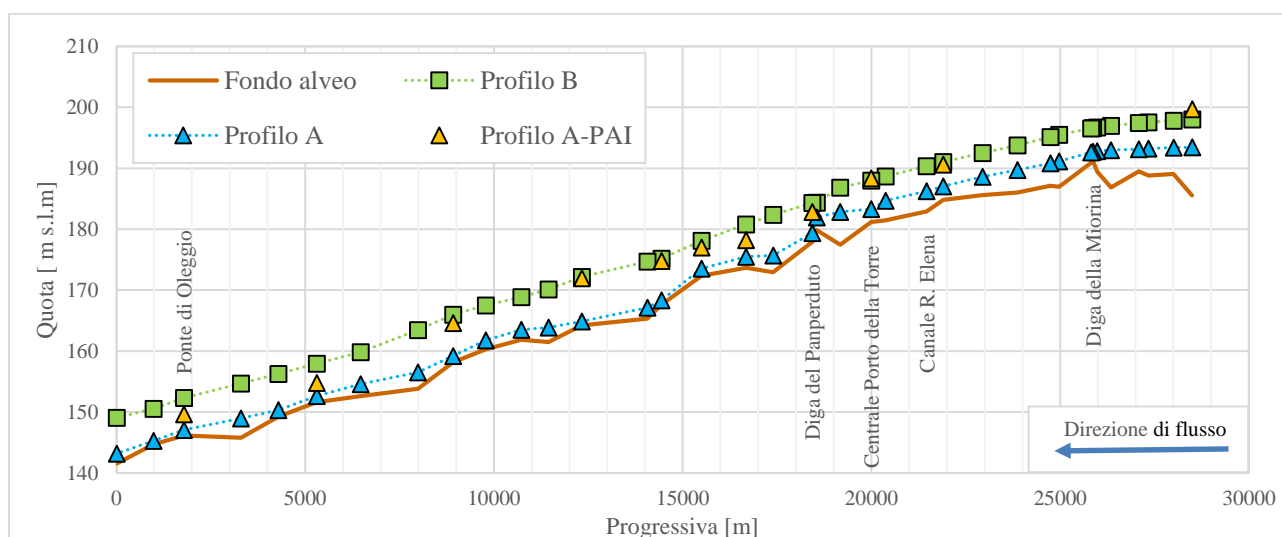


Figura 2-18: Profili di moto permanente in condizioni di flusso medie ed eccezionale

L'andamento del profilo B (vd *Tabella I-4* in *Appendice I*) risulta del tutto simile a quello fornito dal PAI avvalorando la bontà delle elaborazioni effettuate.

Per quanto riguarda il profilo medio (A), si nota che l'andamento del tirante medio stimato in *Tabella 2-8* attraverso la scala della protata (Profilo A-PAI), sovrastimi eccessivamente la condizione di carico ottenuta (vd Profilo A). Tale discrepanza, visibile anche in rapporto alla quota del fondo alveo, è da imputarsi con tutta probabilità alla scala delle portate utilizzata, poco indicativa per la totalità delle sezioni prese in esame.



Si specifica che nel tracciamento di entrambi i profili non si è tenuto conto dell'effetto idraulico dato dalla presenza degli sbarramenti, ma solo, nel caso di profilo medio, delle consuete derivazioni (vd *Tabella I-3* in *Appendice I*). Sulla base delle analisi qui eseguite, si analizzeranno nel *Capitolo 4* differenti scenari considerando la condizioni di flusso del fiume Ticino in tre configurazioni definite dai profili A, B e fondo alveo.

### 2.3 Analisi falda sotterranea: prelievi e dati piezometrici

La falda superficiale nell'intorno della zona aeroportuale si estende per una profondità di circa 130-140 m dalla superficie topografica. In questo paragrafo si analizzano dati di emungimento e livelli piezometrici rilevati in un'ampia zona di circa 784 km<sup>2</sup> nella quale rientrano le provincie di Varese, Milano e Novara (vd *Figura 2.19*).



*Figura 2-19: Area d'indagine*

La zona considerata si estende per una area quadrata centrata nell'aeroporto di lato pari a 28 km. L'ampia zona indagata perette di ricavare l'andamento generale della falda sotterranea nella zona di interesse e ricercare le condizioni al contorno adeguate da utilizzare nel modello numerico descritto nel *Capitolo 3*.

La grande complessità associata ai bacini idrici, richiede un'attenta analisi in merito alle variazioni freatiche e ai regimi di emungimento locali, tale da poter chiarire i meccanismi e le forzanti che intervengono in maniera preponderante nei cambiamenti di stato del sistema.

Nel *Paragrafo 2.3.1*, si analizzano i regimi di emungimento dell'aeroporto e dei comuni circostanti

Nel *Paragrafo 2.3.2* riporta l'analisi dei dati freatiche disponibili, evidenziando i trend e le escursioni stagionali della falda in relazione ai regimi pluviometrici e di prelievo.

Infine nel *Paragrafo 2.3.3* si analizzano le direzioni principali di flusso sotterraneo e vengono ricostruiti gli andamenti isopiezometriche della falda. Questo studio sarà utilizzato per la definizione del dominio del modello numerico e delle sue condizioni al contorno nel *Capitolo 4*.

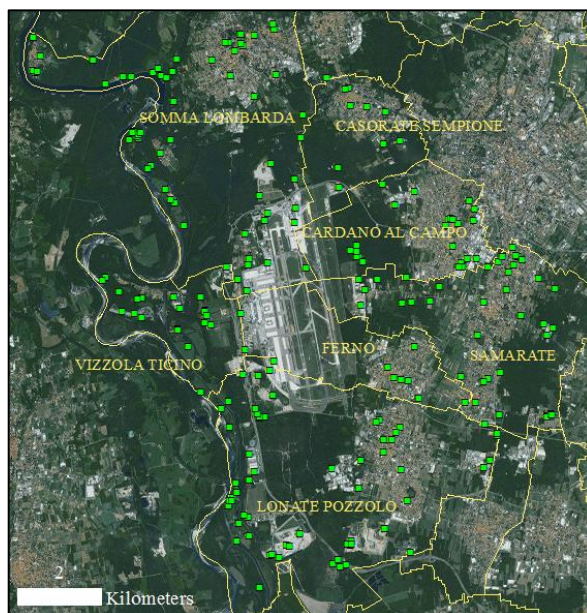
### 2.3.1 Portate emunte

#### *Pozzi provincia di Varese*

Nella provincia di Varese sono presenti 2404 pozzi, di cui 1824 attivi. Di ciascun pozzo sono disponibili ubicazione, profondità, tipo, uso, come riportato nelle *Tabelle A-1-A-15* in *Allegato A* (fonte: Provincia di Varese).

In questo paragrafo si è circoscritta l'area indagata (vd *Figura 2-20*) nell'intorno dell'aeroporto comprendendo i sette comuni (Lonate Pozzolo, Vizzola Ticino, Somma Lombardo, Casorate Sempione, Cardano al Campo, Samarate, Ferno, Samarate).

In *Tabella 2-10* sono riportati il numero dei pozzi (totali ed attivi) ubicati nei sette comuni considerati.



*Figura 2-20: Posizione dei pozzi di emungimento dei comuni di Lonate Pozzolo, Vizzola Ticino, Somma lombardo, Casorate Sempione, Cardano al Campo, Samarate, Ferno.*



<i>Comune</i>	<i>N° tot. pozzi</i>	<i>N° pozzi note le portate</i>	<i>N° pozzi attivi</i>
Cardano al Campo	28	17	12
Casorate Sempione	11	5	5
Ferno	8	4	3
Lonate Pozzolo	63	33	35
Samarate	42	22	23
Somma Lombardo	62	30	35
Vizzola Ticino	21	10	10

Tabella 2-10: numero dei pozzi di emungimento attivi nei sette comuni

In *Figura 2-21* e in *Tabella 2-11* sono riassunti i volumi totali emunti nel periodo 2005-2015 per ogni comune considerato.

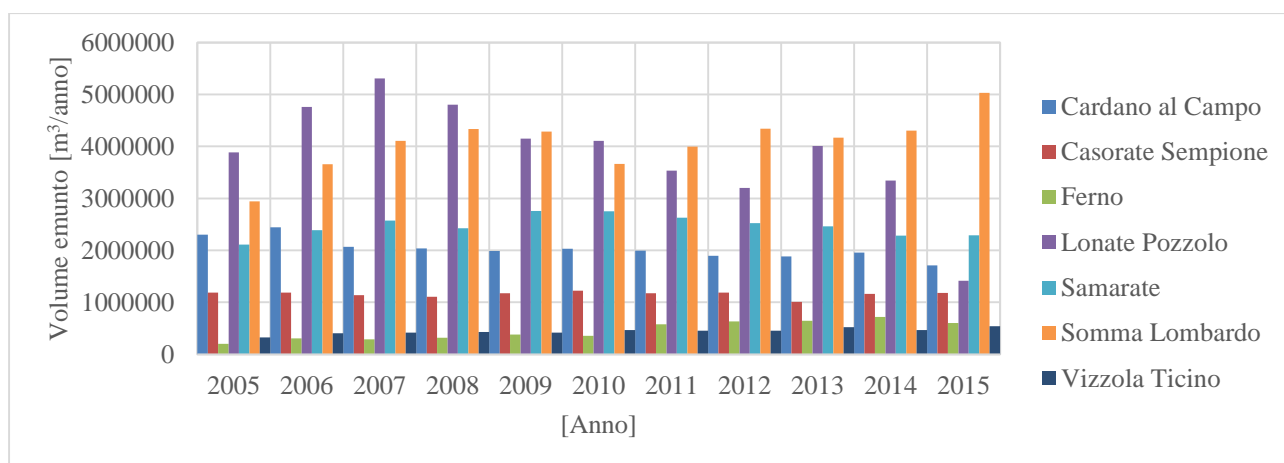


Figura 2-21: Volumi totali emunti dai sette comuni nel periodo 2005-2015

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Cardano al Campo	2,299,068	2,444,164	2,065,865	2,034,386	1,984,480	2,027,545	1,991,255	1,896,559	1,881,033	1,957,144	1,707,977
Casorate Sempione	1,183,727	1,184,852	1,137,729	1,105,190	1,172,208	1,220,288	1,171,626	1,185,424	1,008,844	1,161,625	1,181,082
Ferno	202,375	307,874	287,800	317,619	379,318	354,002	578,961	631,954	644,538	720,005	601,950
Lonate Pozzolo	3,883,177	4,759,862	5,311,032	4,802,417	4,148,441	4,106,072	3,531,822	3,202,070	4,009,004	3,341,336	1,415,157
Samarate	2,112,923	2,386,597	2,571,991	2,425,950	2,757,989	2,752,064	2,627,644	2,524,088	2,461,105	2,280,401	2,288,476
Somma Lombardo	2,945,309	3,659,456	4,105,866	4,335,393	4,287,199	3,661,451	3,996,417	4,342,964	4,168,628	4,302,087	5,032,048
Vizzola Ticino	325,545	401,753	415,343	426,414	415,406	465,134	450,146	450,298	523,144	466,926	539,373

Tabella 2-11: Volumi annui emunti dai sette comuni [m³/anno]

Le *Figure 2-22 – 2-28* riportano i consumi annui di ogni comune suddivisi tra: potabile, industriale e altro (Scambio termico, Antincendio, Autolavaggio, Ig.Sanitario, Attrezzature sportive, Verde Pubblico, Irrigazione aree verdi, Allevamento, Piscicoltura).

In *Appendice II* vengono riportate gli ulteriori andamenti grafici dei rimanenti comuni della provincia di Varese presenti nell’area di modellazione.

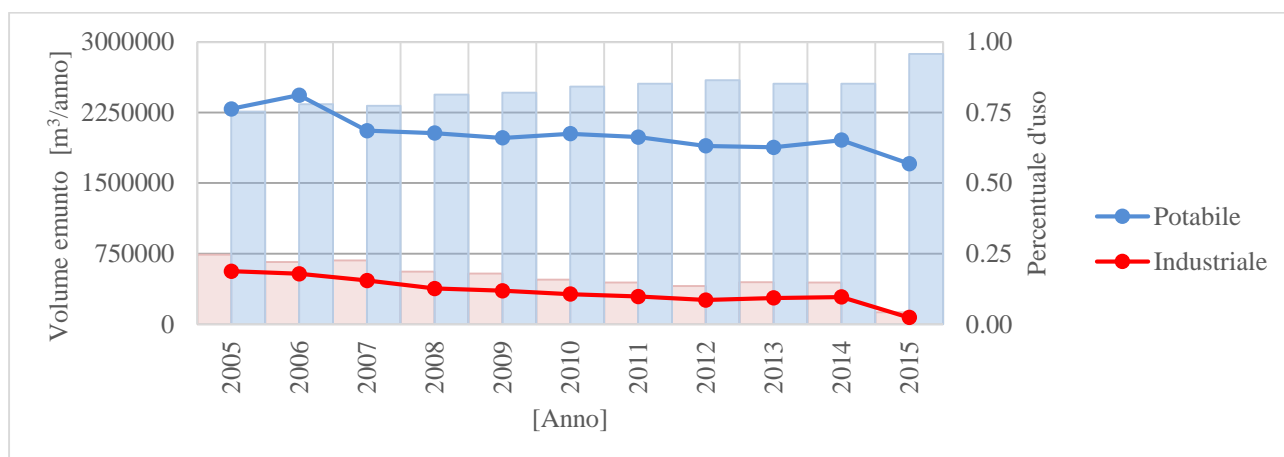


Figura 2-22: Portate emunte annualmente dal comune di Cardano al Campo nel periodo 2005-2015

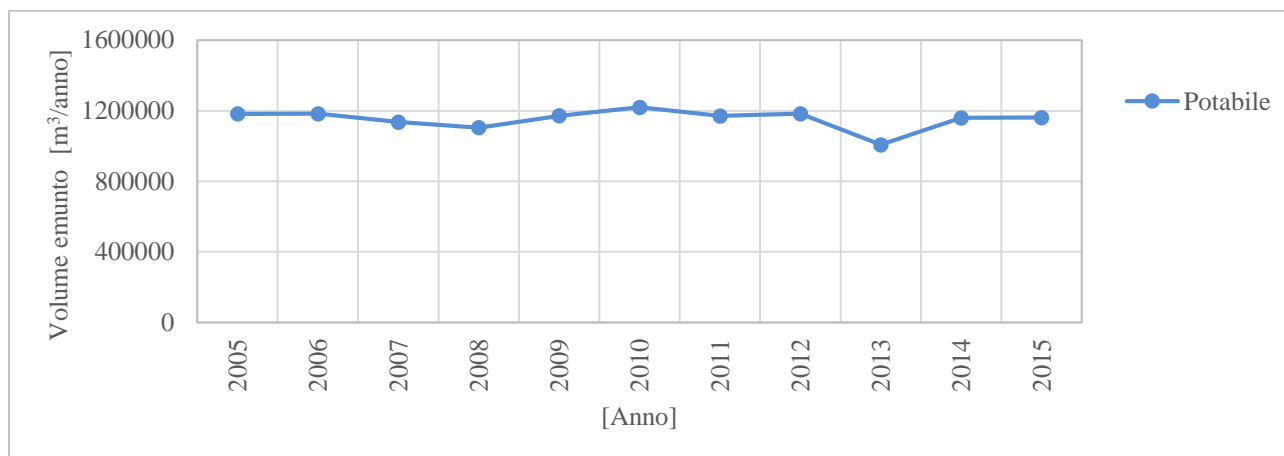


Figura 2-23: Portate emunte annualmente dal comune di Casorate Sempione nel periodo 2005-2015

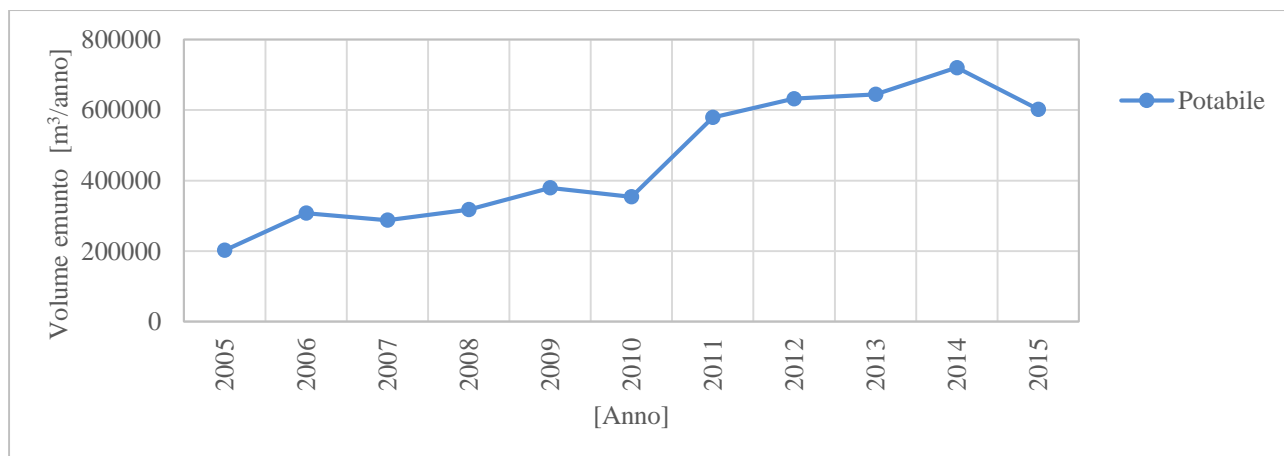


Figura 2-24: Portate emunte annualmente dal comune di Ferno nel periodo 2005-2015

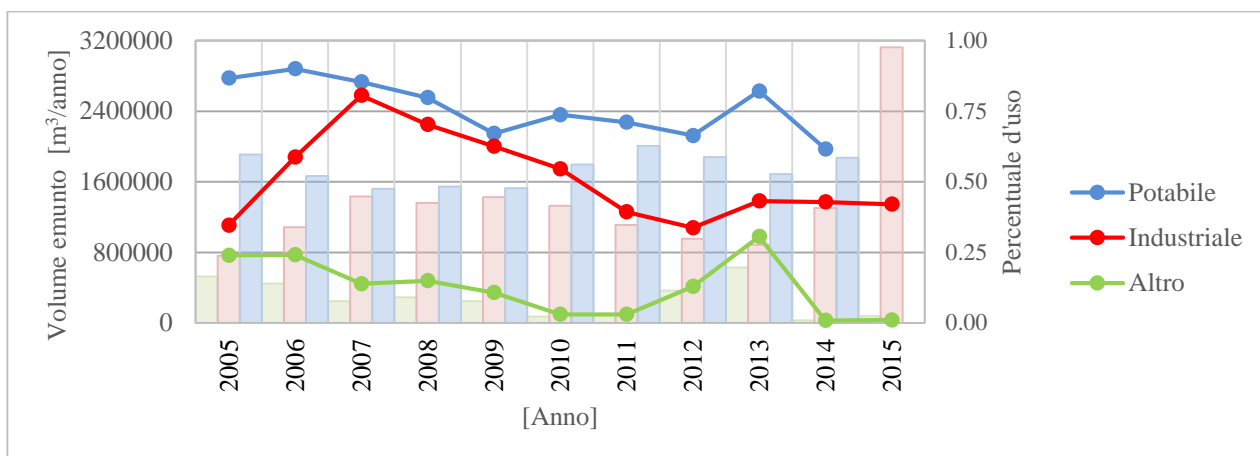


Figura 2-25: Portate emunte annualmente dal comune di Lonate Pozzolo nel periodo 2005-2015

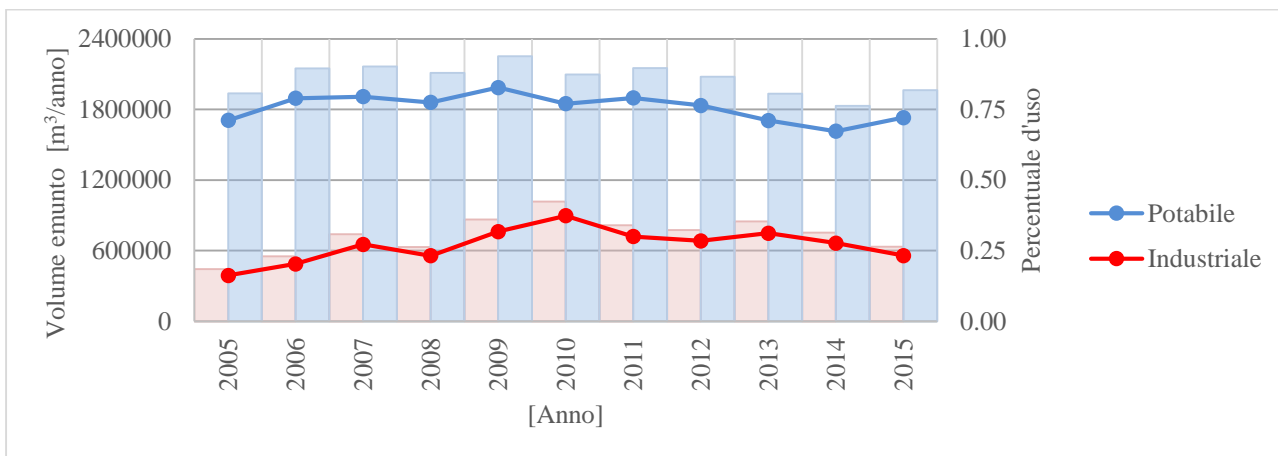


Figura 2-26: Portate emunte annualmente dal comune di Samarate nel periodo 2005-2015

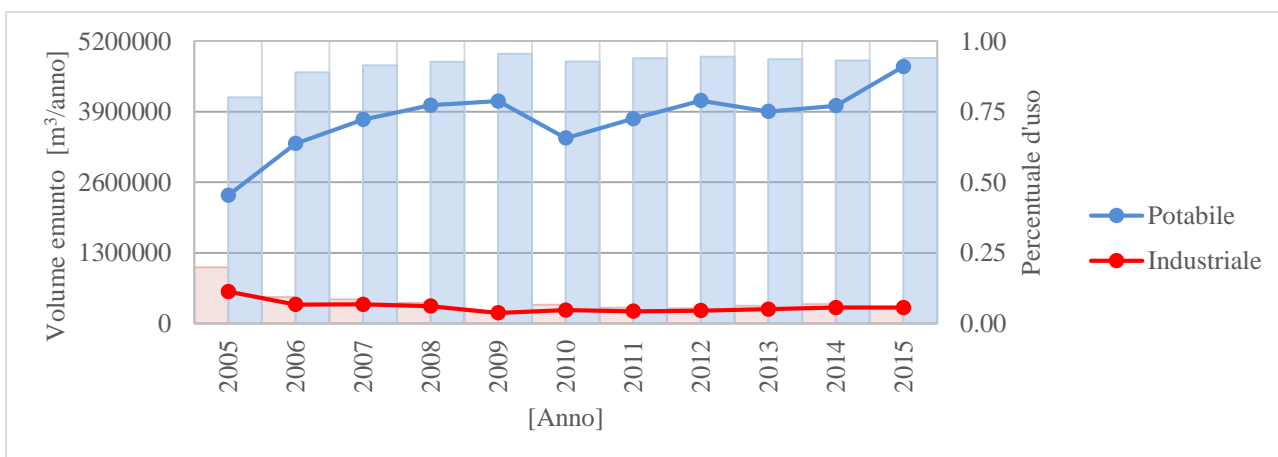


Figura 2-27: Portate emunte annualmente dal comune di Somma Lombardo nel periodo 2005-2015

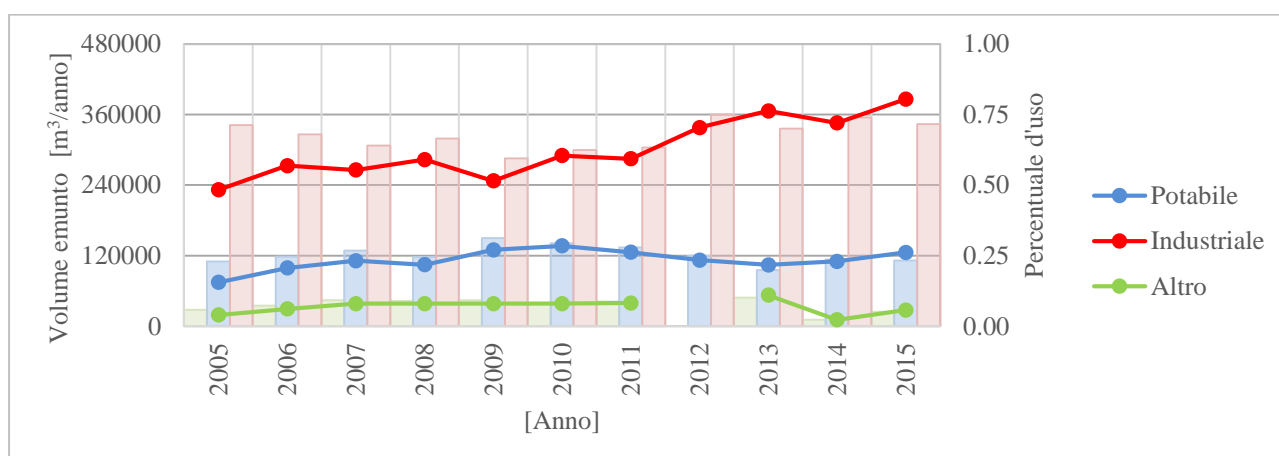


Figura 2-28: Portate emunte annualmente dal comune di Vizzola Ticino nel periodo 2005-2015

Come è ben visibile dagli andamenti dei diversi comuni considerati, gli usi irrigui o di altra natura sono trascurabili. Ad eccezione del comune di Vizzola Ticino, la portata emunta dal bacino idrico sotterraneo è prevalentemente ad uso potabile data l'elevata densità di popolazione dei comuni afferenti.

#### Pozzi SEA

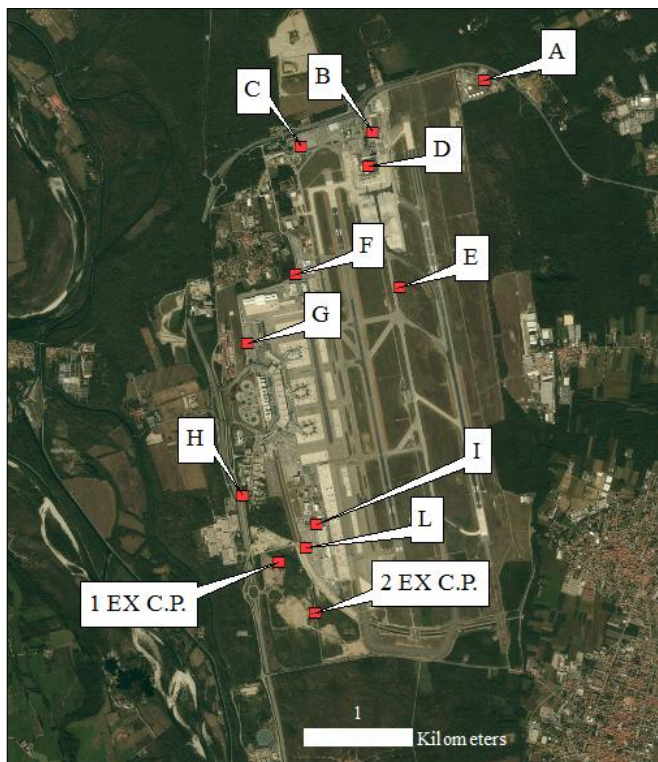
Compresi nei volumi emunti precedentemente mostrati vi sono anche le portate emunte all'interno del sedime aeroportuale.

L'aeroporto di Malpensa è dotato di impianti di approvvigionamento idrico autonomo che soddisfano l'intero fabbisogno prelevando l'acqua dalla falda sotterranea mediante dodici pozzi (vd Figura 2-29) così suddivisi:

- n. 4 pozzi (pozzi B,C,D,E) che alimentano prevalentemente le utenze della rete di distribuzione idrica del Terminal2, per tutti gli usi, compreso l'antincendio;
- n. 4 pozzi (pozzi F,G,H,L) che alimentano prevalentemente le utenze della rete di distribuzione del Terminal1, per gli usi potabili, igienico sanitari;
- n. 1 pozzo (denominato pozzo A) dedicato all'alimentazione idrica dell'area Deposito combustibili;
- n. 1 pozzo (denominato pozzo I) dedicato prevalentemente alla alimentazione della vasca di riserva idrica da 1,600 m<sup>3</sup> predisposta per le necessità antincendio dell'area del Terminal 1;
- n. 2 pozzi (denominati pozzi 1exCP e 2exCP) che alimentano, per tutti gli usi, prevalentemente le utenze remote (comprese le aree di cantiere) e le torri evaporative della Centrale Termica.

Attualmente sono in attività otto pozzi A, C, D, F, H, L,1exCP, I (quest'ultimo in manutenzione). Il pozzo 2exCP risulta dismesso ed il pozzo E in fase di chiusura.

In *Tabella 2-12* sono riassunte le caratteristiche di ogni pozzo (denominazione, uso, ubicazione, quota in m s.l.m., profondità dei filtri e diametro). Si nota che il pozzo B non ha diametro costante ma varia tra 305 mm (fino a 68.12 m dal p.c) e 159 mm.



*Figura 2-29: Pozzi aeroportuali*

Denominazione	Comune	Località	Uso	Utm X	Utm Y	Quota p.c [m s.l.m]	Quota pozzo [m s.l.m]	Profondita' dal p.c [m]	Profondità Filtri da p.c [m]	Diametro [mm]
A (Petrolieri)	Casorate Sempione	T2	Potabile	479534.55	5055632.38	234	234	72	60-72	244
B (Merci)	Somma Lombardo	T2	Potabile	478494.55	5055147.40	235	235	90	64-67, 76-86	305-159
C (Officina)	Somma Lombardo	T2	Potabile	477824.54	5055020.40	236	236	80	60-70	300
D (Sotto)	Somma Lombardo	T2	Potabile	478460.54	5054830.40	230.8	230.8	100	67-93	300
E (Farsura)	Somma Lombardo	T2	Potabile	478743.52	5053710.40	225.24	223.84	72.6	58.4-68.4	340
F (Varco N° 4)	Somma Lombardo	T1	Potabile	477775.53	5053828.41	230	227	99.2	64.38-88.38	650
G (Park P4)	Somma Lombardo	T1	Potabile	477329.52	5053181.42	222.2	219.2	103.2	74.6-91.2	600
H (Cantiere)	Ferno	T1	Potabile	477285.50	5051768.44	217	214	104	64-82	600
I (Mile Cargo)	Lonate Pozzolo	T1	Antincendio	477974.50	5051496.44	215	212.5	99	66-78, 84-90	600
L (Cargo City)	Lonate Pozzolo	T1	Potabile	477874.50	5051273.44	215	213.8	101.5	69-75, 81-93	600
1 ex C.P.	Lonate Pozzolo	Cargo City	Industriale	477614.50	5051150.44	213	213	61.9	50-67	250
2 ex C.P.	Lonate Pozzolo	Cargo City	Industriale	477962.49	5050674.45	213	211	66.5	45-65	273

*Tabella 2-12: Pozzi aeroportuali*

Noto il volume totale emunto annualmente da ogni comune, nel seguito si confronta l'incidenza dei prelievi dell'aeroporto sulla base dell'uso finale (Potabile, industriale, ecc) e della competenza amministrativa sul quale ricade ogni singola stazione di pompaggio.

I volumi emunti annualmente da ciascun pozzo dell'aeroporto di Milano Malpensa, sono stati forniti direttamente da SEA.spa (vd *Figure 2-30 a 2-33*).

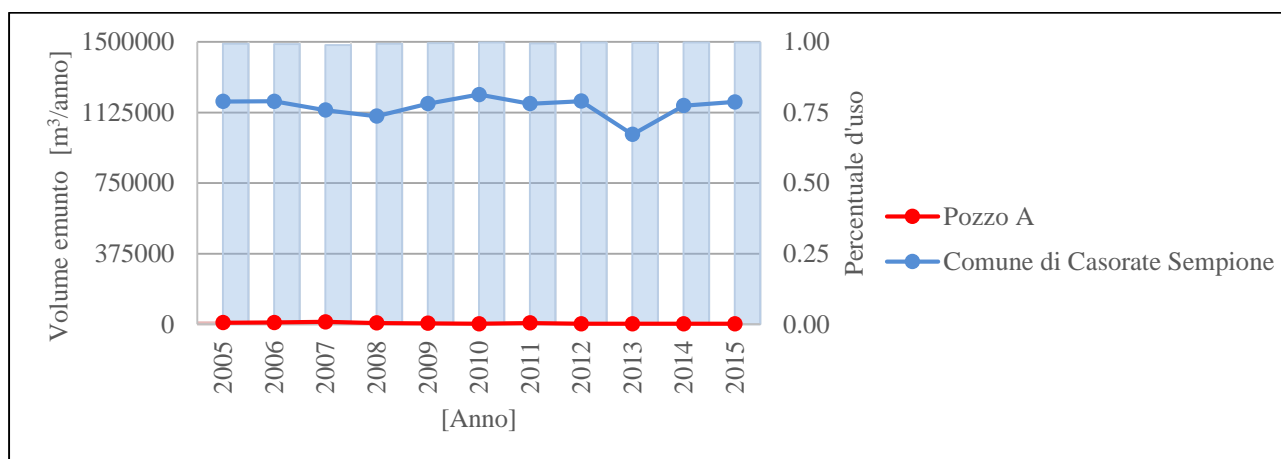


Figura 2-30: Confronto tra i volumi emunti dal pozzo aeroportuale A e il comune di Casorate Sempione

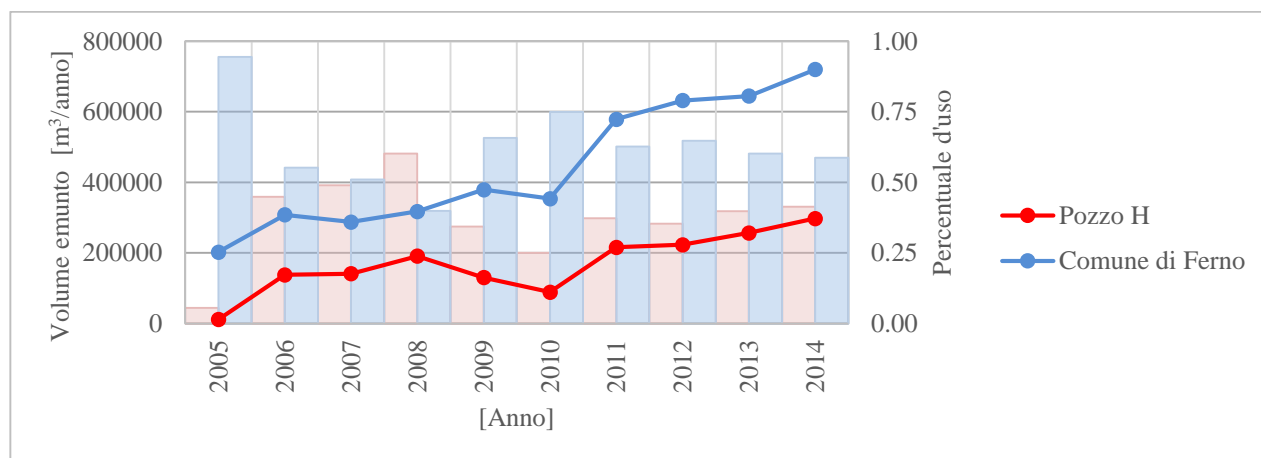


Figura 2-31: Confronto tra i volumi emunti dal pozzo aeroportuale H e il comune di Ferno

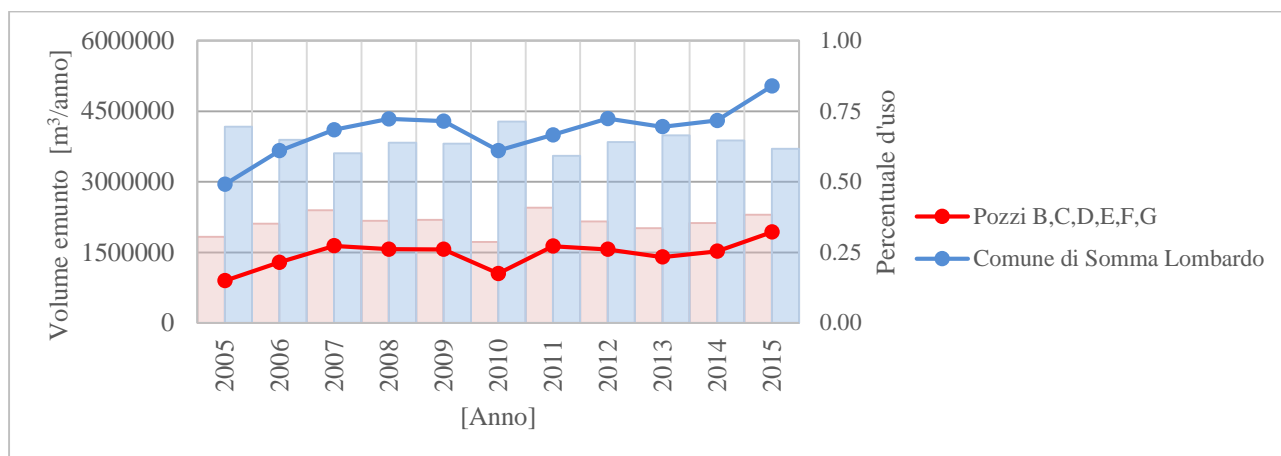


Figura 2-32: Confronto tra i volumi emunti dai pozzi aeroportuale B, C, D, E, F, G e il comune di Somma Lombardo

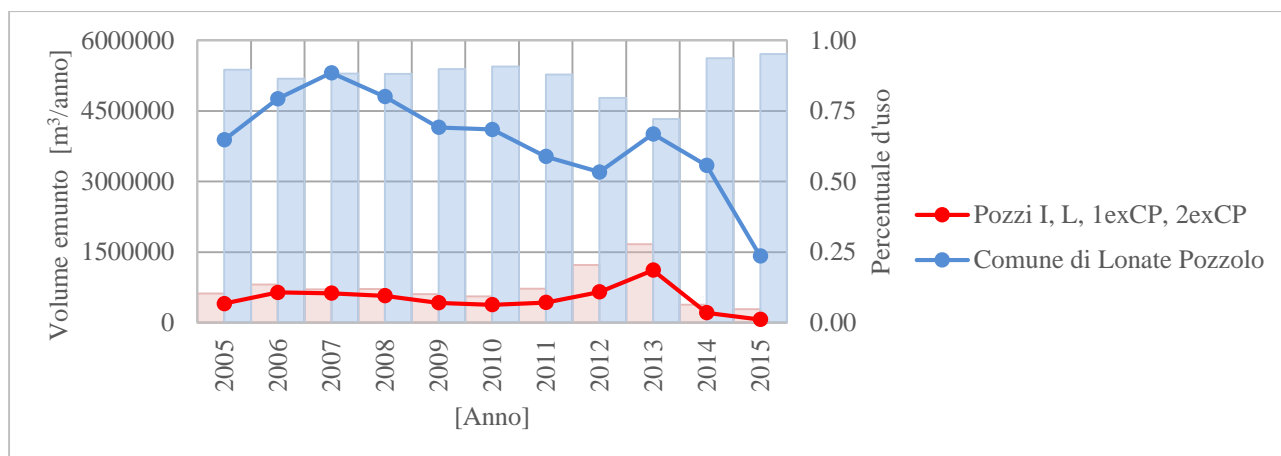


Figura 2-33: Confronto tra i volumi emunti dai pozzi aeroportuale I, L, 1exCP, 2exCP e il comune di Lonate Pozzolo

Come si vede dai grafici sopra riportati, l'incidenza dell'aeroporto sulle portate emunte è variabili a seconda del comune considerato. Il comune di Ferno avendo una popolazione afferente eseguita (circa pari a 6,900 Ab.) ed il comune di Somma Lombardo per la presenza di metà dei pozzi areoportuali, risultano le amministrazioni sulle quali l'aeroporto di Malpensa impatta maggiormente, mediamente intorno al 25%.

Le portate emunte dall'aeroporto mediamente si attestano a circa 64.36 [l/s] con picchi massimi di 87.97 [l/s]. In Figura 2-34 e in Tabella 2-13 sono riassunte le portate emunte in tutti i pozzi areoportuali nel periodo 2005-2015.

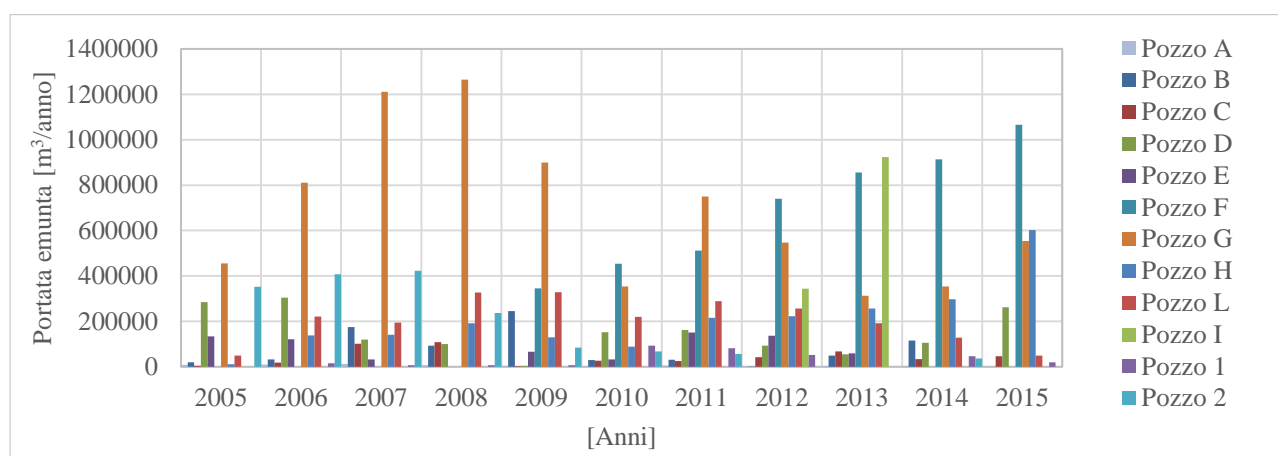


Figura 2-34: Portate emunte dai pozzi aeroportuali nel periodo 2005-2015

Denominazione	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Pozzo A	8,010	9,373	12,448	6,709	4,780	2,050	6,270	2,543	2,559	2,180	2,030
Pozzo B	19,362	32,780	175,205	93,620	245,869	29,315	31,043	37	49,294	114,989	0
Pozzo C	4,573	18,360	101,142	108,055	2,266	26,351	25,115	42,831	67,249	33,292	46,590
Pozzo D	284,359	304,198	119,451	99,725	4,307	152,764	161,671	93,587	54,702	105,940	262,911
Pozzo E	134,284	120,899	31,960	0	66,392	32,482	150,413	137,193	59,264	0	0
Pozzo F	0	0	0	0	345,210	453,820	511,970	740,490	855,870	913,070	1,065,980
Pozzo G	454,814	810,466	1,211,681	1,264,596	899,947	353,869	749,672	547,486	313,495	353,589	554,081
Pozzo H	11,206	138,020	140,929	191,102	130,101	88,709	216,060	223,105	256,726	297,598	601,950
Pozzo L	49,911	221,460	195,059	326,725	328,443	220,506	288,666	256,516	191,209	127,673	49,049
Pozzo I	0	0	0	0	0	0	0	343,900	923,800	0	0
Pozzo 1	0	15,174	7,178	7,713	7,172	93,310	81,540	52,530	0	46,933	19,181
Pozzo 2	353,023	406,884	423,318	237,482	84,248	67,695	55,893	0	0	36,361	0
<b>Totale</b>	<b>1,319,542</b>	<b>2,077,614</b>	<b>2,418,371</b>	<b>2,335,727</b>	<b>2,118,735</b>	<b>1,520,871</b>	<b>2,278,313</b>	<b>2,440,218</b>	<b>2,774,168</b>	<b>2,031,625</b>	<b>2,601,772</b>

Tabella 2-13: Portate emunte dai pozzi aeroportuali nel periodo 2005-2015 [m³/anno]

La maggior parte della portata emunta (mediamente il 54%) deriva dalle stazioni G,H ed L e in misura variabile con l'anno dai restanti pozzi. L'andamento nel corso degli anni presenta una certa variabilità, con un andamento relativamente stabile negli ultimi cinque anni. I quantitativi di portata emunta da ciascuna struttura risultano comunque inferiori a quelli medi dati in concessione (vd Figura 2-14).

Denominazione	A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	1 ex C.P.	2 ex C.P.
Concessione	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.04	0.04

Tabella 2-14: Portata media di concessione m³/s dei pozzi aeroportuali

Inoltre tutti i pozzi sono tra loro inanellati in unica rete idrica, in modo da poter sostenere eventuali cali o picchi nella fornitura.



Si riportano di seguito gli andamenti complessivi dello scalo, suddivisi in base all'uso e all'entità percentuale sul totale annuo emunto.

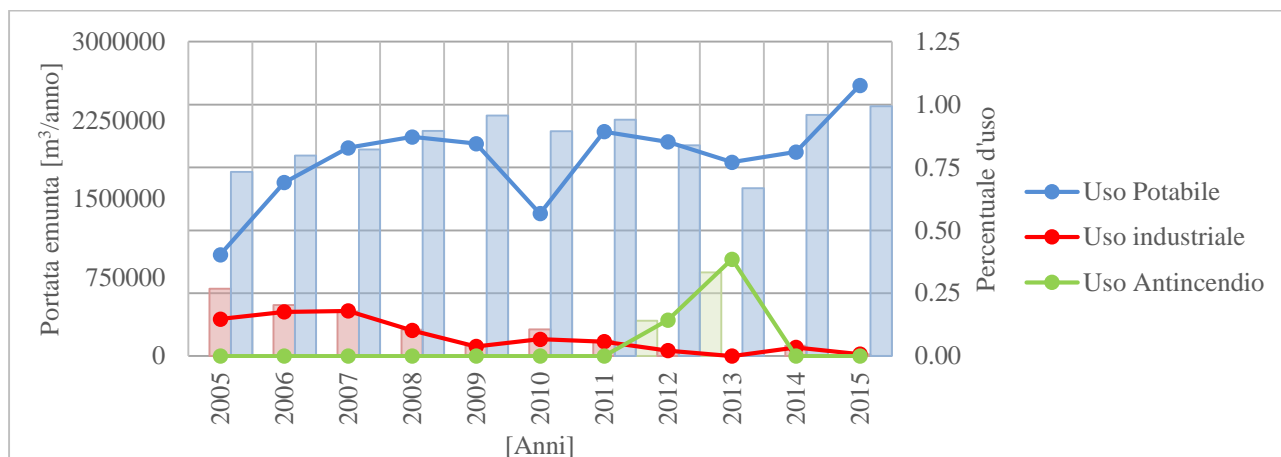


Figura 2-35: Volumi totali emunti ad uso potabile, industriale e antincendio dell'aeroporto nel periodo 2005-2015

Uso	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Potabili	966,519	1,655,556	1,987,875	2,090,532	2,027,315	1,359,866	2,140,880	2,043,788	1,850,368	1,948,331	2,582,591
Industriali	353,023	422,058	430,496	245,195	91,420	161,005	137,433	52,530	0	83,294	19,181
Antincendio	0	0	0	0	0	0	0	343,900	923,800	0	0

Tabella 2-15: Volumi totali m³/anno emunti ad uso potabile, industriale e antincendio dell'aeroporto nel periodo 2005-2015

Data la natura dell'opera civile in analisi, in termini percentuali l'uso preponderante dell'acqua di falda è ovviamente potabile e in minima parte industriale.

Le notevoli dimensioni areali e quindi il bacino di utenza servito del Terminal 1 risultano preponderanti rispetto alle altre aree aeroportuali, come è ben visibile dal Figura 2-36.

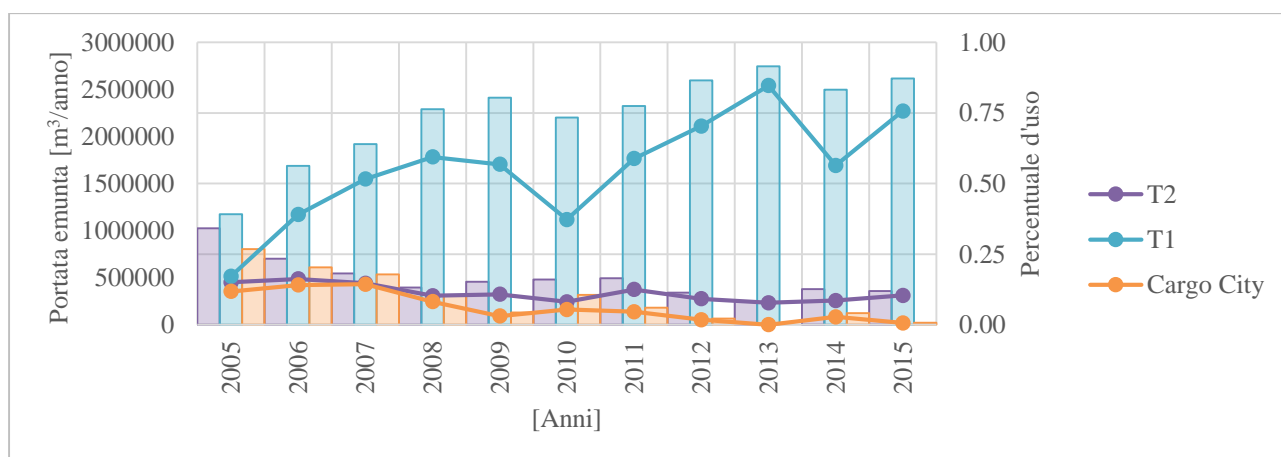


Figura 2-36: Portate totali emunte nelle tre macro aree aeroportuali nel periodo 2005-2015

Area	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Pozzi T2	450,588	485,610	440,206	308,109	323,614	242,962	374,512	276,191	233,068	256,401	311,531
Pozzi T1	515,931	1,169,946	1,547,669	1,782,423	1,703,701	1,116,904	1,766,368	2,111,497	2,541,100	1,691,930	2,271,060
Pozzi Cargo City	353,023	422,058	430,496	245,195	91,420	161,005	137,433	52,530	0	83,294	19,181

Tabella 2-16: Portate totali emunte m<sup>3</sup>/anno nelle tre macro aree aeroportuali nel periodo 2005-2015

### 2.3.2 Andamento freaticometrico

#### Dati

Per conoscere l'andamento temporale nel periodo 2005-2015 della falda nel bacino di interesse, sono stati analizzati i dati piezometrici forniti da ARPA Lombardia per la provincia di Varese (18 piezometri in falda superficiale A e 6 in falda profonda B) e di Milano per caratterizzare l'area a Sud dell'aeroporto con particolare riferimento alla definizione dei contorni del modello matematico (36 piezometri in falda A disponibili nel portale di confine <http://ambiente.provincia.milano.it/>). Si sono inoltre utilizzati dati piezometrici forniti dalla provincia di Varese (Piano Cave, 14 piezometri in falda A) e da SEA.spa per 3 pozzi costantemente monitorati (L-I-G).

Si sono inoltre analizzate le misurazioni freaticometriche della provincia (5 piezometri in falda superficiale) di Novara disponibili in un intorno significativo dell'area di interesse (<http://www.regione.piemonte.it/monitgis/jsp/cartografia/mappa.do>).

In *Figura 2-37* è riportata una mappa di tutte le stazioni piezometriche utilizzate ed in *Allegato B* sono riassunte le caratteristiche delle stazioni di monitoraggio.

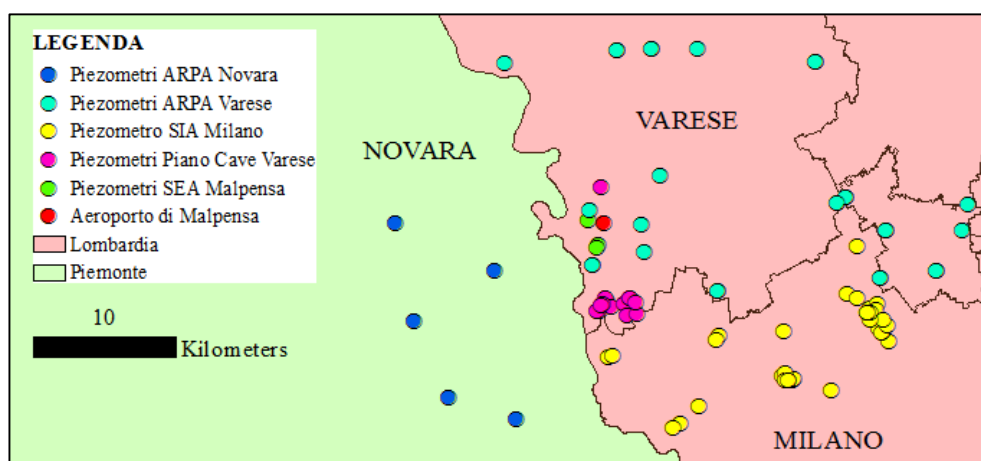


Figura 2-37: Inquadramento database piezometri superficiali

#### Analisi

I dati freaticometrici sono stati elaborati identificando, ove non indicato dall'ente, la tipologia di falda captata. Questa operazione si basa sulla conoscenza della profondità dei sondaggi e della posizione dei filtri (vd *Tabelle B-1-B-7 in Allegato B*).

Riportiamo di seguito gli andamenti freaticometrici mensili della falda superficiale nelle vicinanze dell'aeroporto di Malpensa (vd *Figura 2-38 e Figura 2-40*), e gli andamenti dei piezometri della falda profonda (vd *Figura 2-39 e Figura 2-41*).

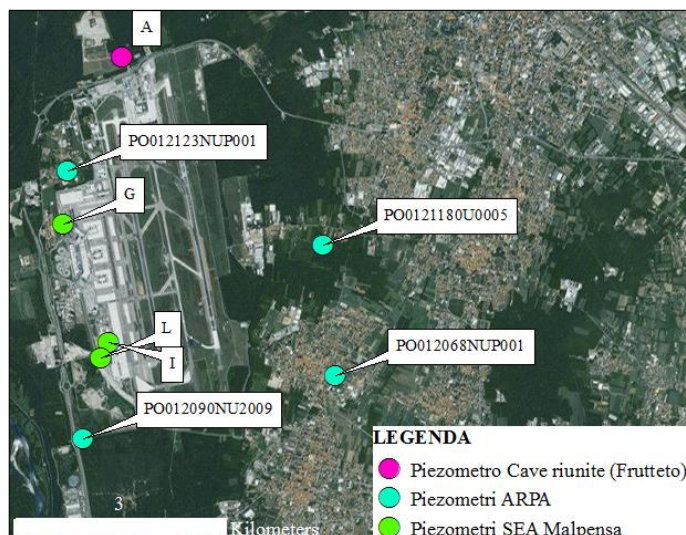


Figura 2-38: Piezometri captanti la falda superficiale nell'intorno dell'aeroporto di Malpensa

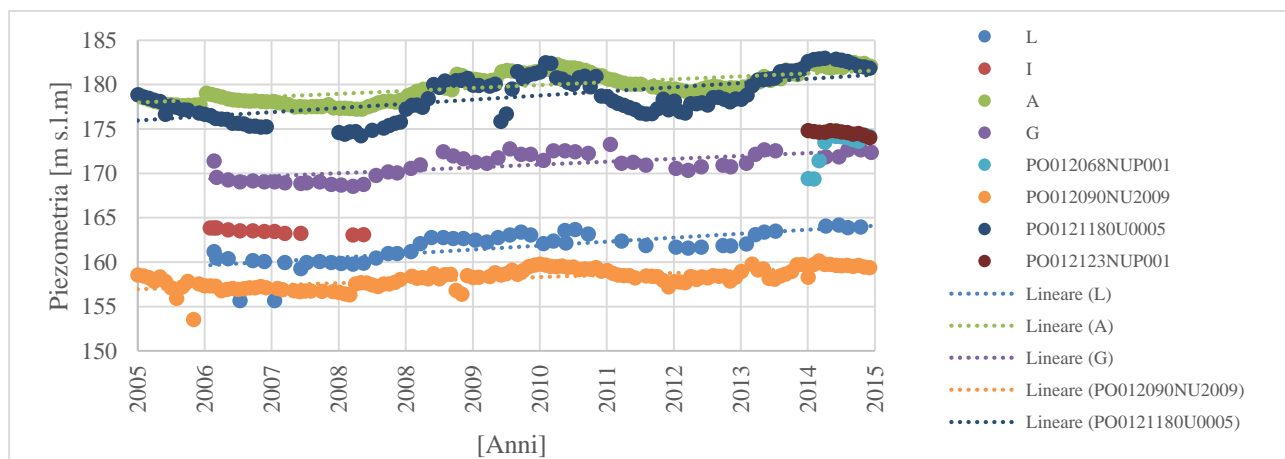


Figura 2-39: Andamento freaticometrico falda superficiale nell'intorno dell'aeroporto di Malpensa

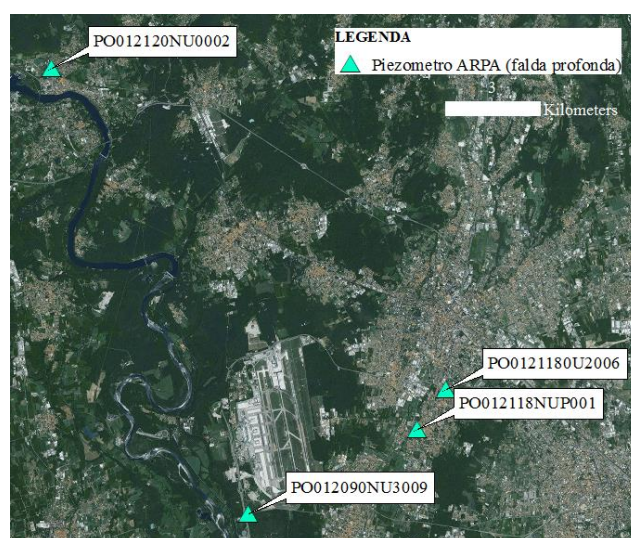


Figura 2-40: Piezometri profondi nell'intorno dell'aeroporto di Malpensa

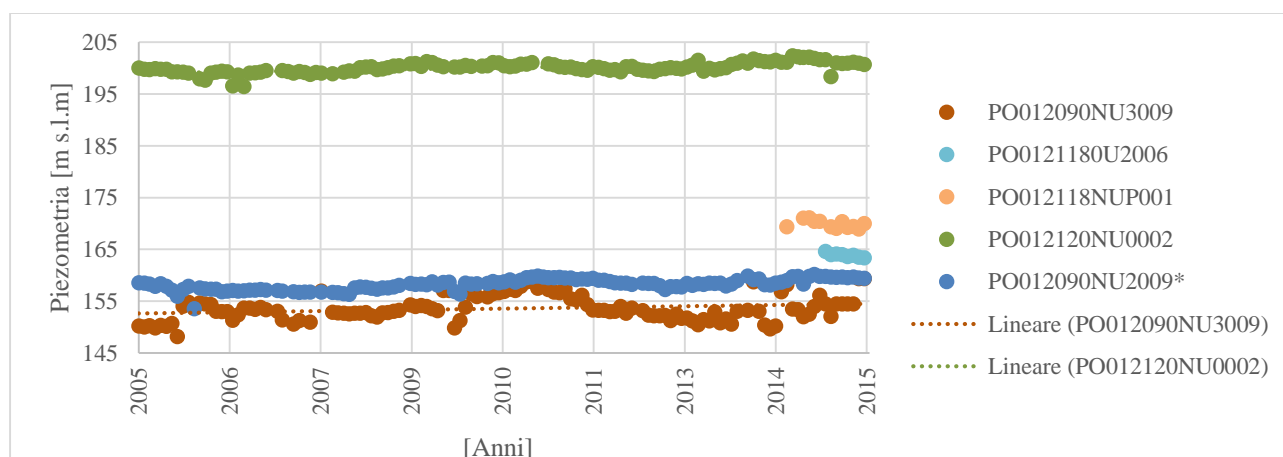


Figura 2-41: Andamento freaticometrico falda profonda, (PO012090NU2009\* - piezometro in falda A)

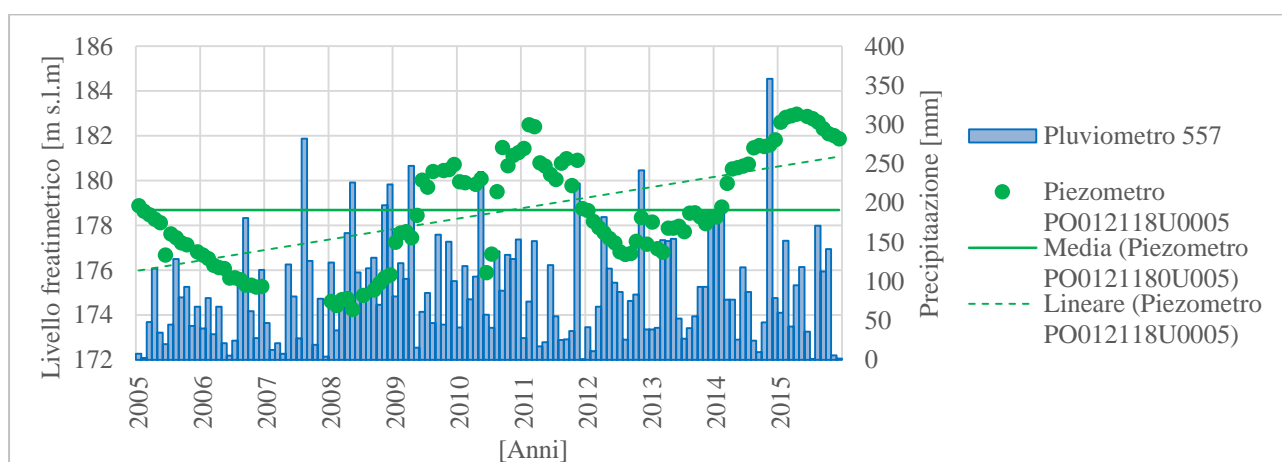
Ad una prima analisi visiva è ben evidente la chiara uniformità negli andamenti della falda superficiale non solo per l'area circostante l'aeroporto ma in tutti i piezometri (vd *Appendice III*). Le registrazioni piezometriche, sono generalmente tra loro in fase (i.e., massimi e minimi si presentano negli stessi periodi) e traslati dalla quota media nell'intorno della quale variano; per nessuna stazione non vi sono andamenti anomali.

Solo quattro stazioni di misura che raggiungono la falda profonda nella zona di indagata le 2 rimanenti stazioni, non riportate in *Figura 2-40*, si trovano molto al di fuori dell'area d'indagine (Saronno-VA). Nelle stazioni riportate in *Figura 2-41* non si evidenziano particolari trend temporali e confrontando il piezometro in falda superficiale PO012090NU2009 situato nelle vicinanze del PO012090NU3009; è possibile osservare una distanza media tra la falda superficiale e profonda di 4.6 m.

La notevole complessità associata ai sistemi sotterranei rende difficile comprendere quali realmente siano i termini forzanti e quali fenomeni giochino un ruolo marginale sul sistema. Si sono pertanto correlati gli andamenti freaticometrici con i termini di ricarica e di prelievo.

A titolo di esempio si riportano in *Figura 2-42* i livelli piezometrici monitorati nel piezometro ARPA (PO0121180U0005) situato a km 1.4 ad Est dell'aeroporto (vd *Figura 2-38*). Un andamento analogo è stato riscontrato nei rimanenti piezometri ARPA Varese dell'area indagata (vd *Appendice IV*).

In *Figura 2-41* è anche riportata la pioggia cumulata mensile della vicina stazione pluviometrica (557).



*Figura 2-42: Andamento freaticometrico piezometro PO0121180U0005 e precipitazione cumulata mensile (pluviometro 557)*

Si nota una elevata correlazione tra il regime pluviometrico e l'escursione piezometrica della falda. Il livello piezometrico diminuisce linearmente tra il 2005 ed il 2008. Questo periodo è caratterizzato da piogge particolarmente scarse (pari a circa 700 mm/anno).

Tra gli anni 2008-2010 si assiste ad un incremento significativo del regime pluviometrico (circa 1400 mm/anno) associato all'aumentare del livello piezometrico. L'anno 2011 è caratterizzato da una significativa diminuzione della pioggia (850 mm/anno) e ad un'associata diminuzione del livello piezometrico. Successivamente la piezometria superficiale aumenta in concomitanza con un aumento delle piogge.

Si è inoltre analizzata l'influenza dell'impatto antropico esercitato dalle stazioni di pompaggio presenti sulle stazioni di monitoraggio. A titolo di esempio in *Figura 2-43* si riporta oltre al livello piezometrico monitorato nel piezometro (PO0121180U0005) e le portate emunte all'interno dello stesso comune.

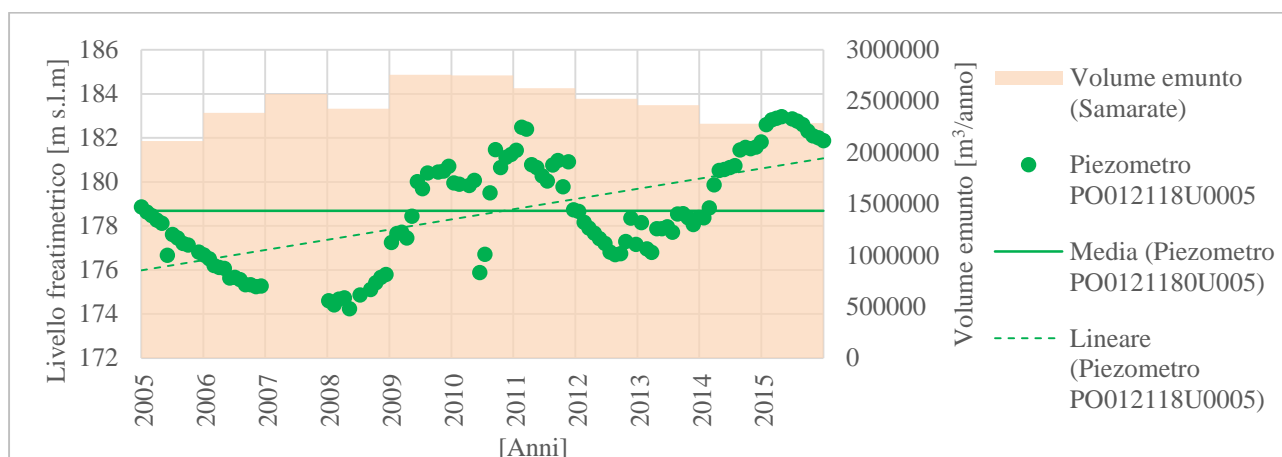


Figura 2-43: Andamento freaticometrico piezometro ARPA PO012118U0005 e volume emunto nel comune di Samarate  
[m<sup>3</sup>/anno]

Analisi analoghe effettuate per tutti i pozzi di monitoraggio ed i comuni interessati sono riportati in *Appendice IV*.

Si nota come le modeste variazioni di emungimento non provocano alterazioni del livello di falda.

Il piezometro osservato, così come tutti gli altri nell'area in esame, si trovano in un contesto di forte urbanizzazione, in cui la richiesta idrica non è sostanzialmente cambiata nell'ultimo decennio (vd *Paragrafo 2.3.1*).

Un ulteriore aspetto del quale si è valutata l'incidenza risulta essere la dipendenza della falda superficiale con il fiume Ticino; noto l'effetto drenante che il corso d'acqua genera sulla falda si è ricercato un eventuale correlazione tra i due sistemi idrici.

In particolare, si è valutata la possibilità che il fiume in questione, sia uno spartiacque sotterraneo in grado di dividere il bacino idrico sotterraneo Lombardo e Piemontese rendendoli indipendenti.

La sponda occidentale del fiume Ticino bagna le provincie di Novara e Pavia (Piemonte), a partire da Castelletto sopra Ticino (NO), situato a sud del Lago Maggiore, fino al comune di Vaccarizza (PV).

I dati piezometrici impiegati in questo parte dell'elaborato provengono dalla Regione Piemonte ed in particolare dalla provincia di Novara, la quale ha istituito un portale monitoraggio GIS (<http://www.regione.piemonte.it/monitgis/jsp/cartografia/mappa.do>), consentendo a chi vi accede di poter usufruire dei dati idrogeologici del territorio.



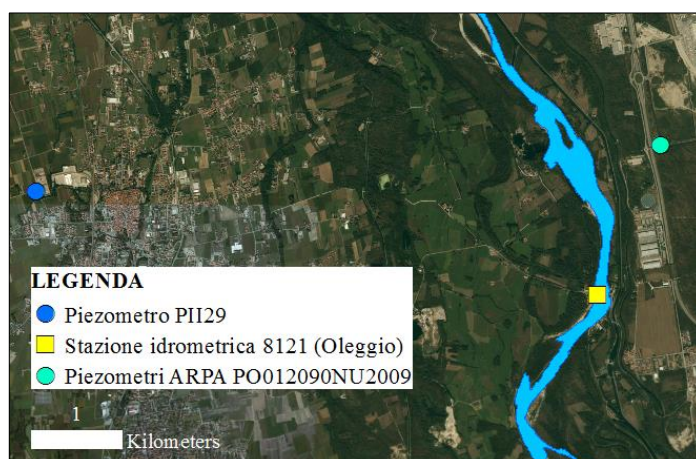


Figura 2-44: Piezometri PO012090NU2009 (VA), PII29 (NO) e stazione idrometrica 8121 di Oleggio

In entrambe le amministrazioni provinciali sono presenti numerose stazioni di rilevamento sotterraneo; per l'analisi proposta sono stati presi in esame i due piezometri più vicini in linea d'aria alla stazione idrometrica di Oleggio e all'aeroporto di Malpensa.

In Figura 2-45 sono riportati i livelli piezometrici dei due piezometri (PO012090NU2009 (VA) e PII29 (NO)). Si rivela un analogo comportamento del livello freaticco per i due sistemi idraulici sotterranei, indice della simile natura idrogeologica che li caratterizza.

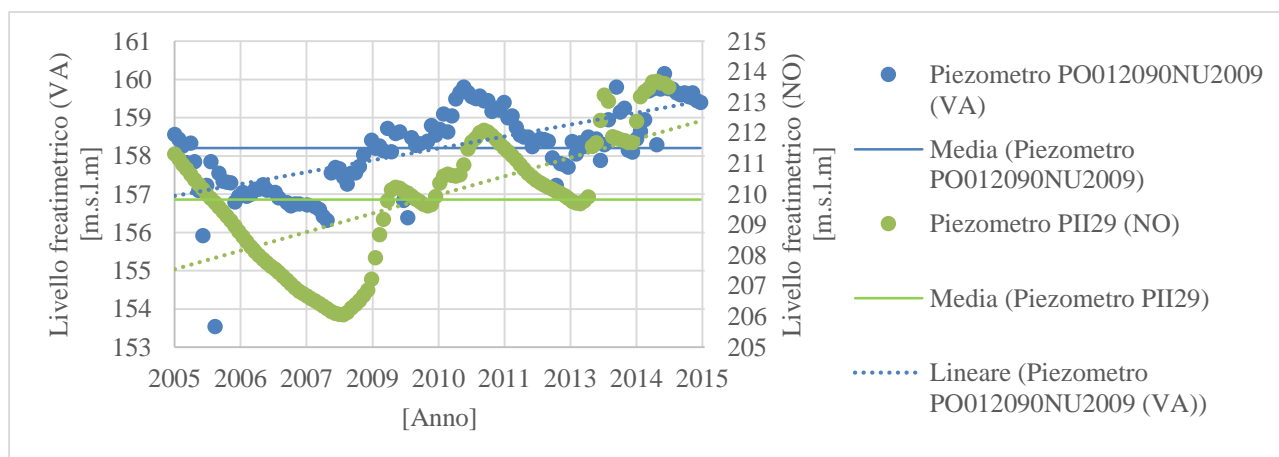


Figura 2-45: Andamento piezometri PO012090NU2009 (VA) e PII29 (NO)

In Figura 2-46 viene riportata l'escursione mensile del livello idrometrico del fiume Ticino nell'intorno del livello di zero idrometrico.

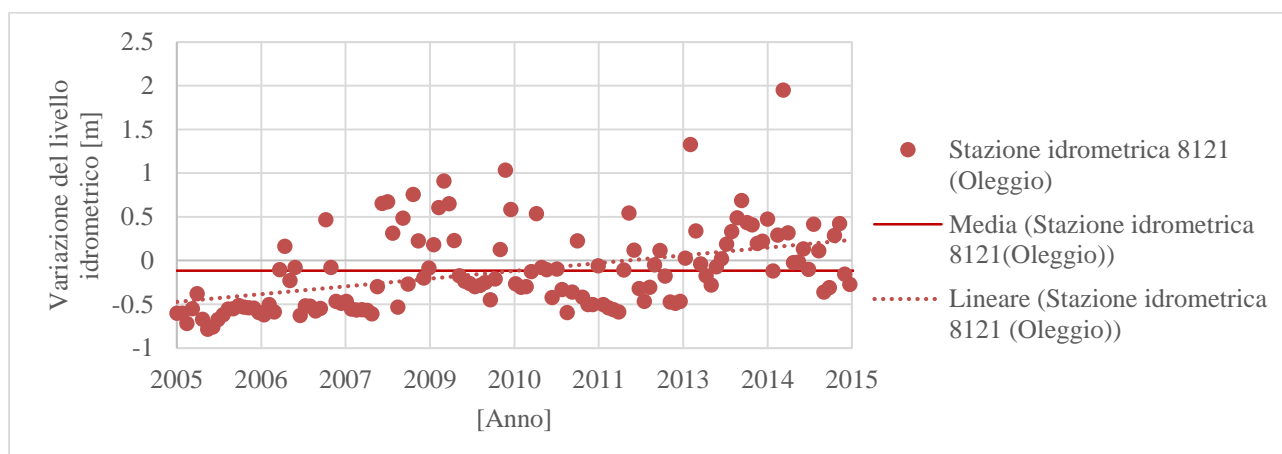


Figura 2-46: Variazione idrometrica del fiume Ticino nella stazione 8121 di Oleggio

Le escursioni dei piezometri presi in esame risultano tra loro in fase riflettendo i simili regimi pluviometrici e quindi le tempistiche di risposta dei sistemi. Per contro, il livello idrometrico medio mensile registrato nella stazione di Oleggio, rimane pressoché costante nel periodo indagato.

Pur non conoscendo lo zero idrometrico della stazione di Oleggio ed ipotizzando che le escursioni del fiume siano riferite alla quota di piano stradale del ponte stradale SS494 (154 m.s.l.m); in rapporto ad entrambi i piezometri, il corso del Ticino risulterebbe avere comunque una quota piezometrica media inferiore. Questa analisi supporta l'ipotesi di azione sostanzialmente drenante del Ticino.



Figura 2-47: Ponte SS494 Oleggio (NO)

Data l'omogeneità nel comportamento di entrambe le falda lungo l'intero territori e l'assenza di particolari condizioni che variano il regime fluviale, è possibile estendere tali considerazioni lungo tutto il tratto a monte della stazione idrometrica osservata.



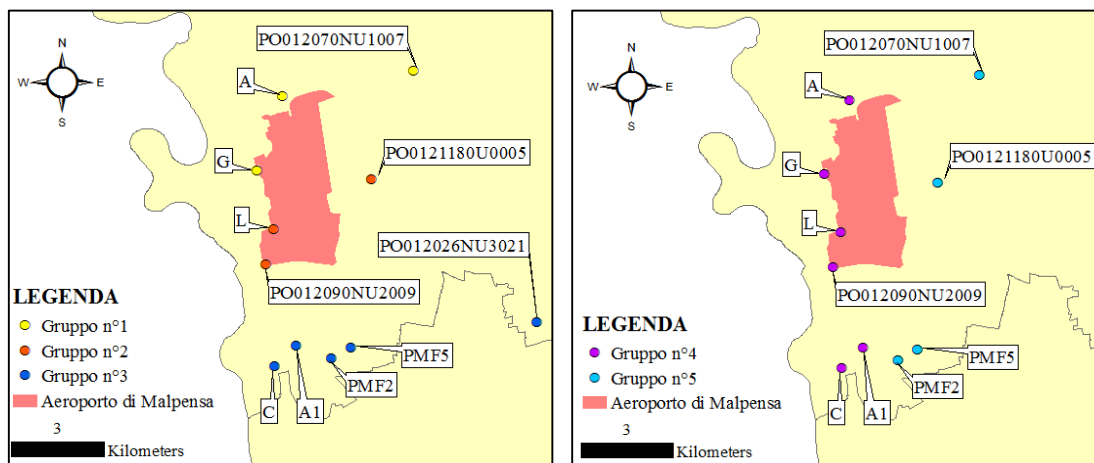
In conclusione, la definizione del fiume Ticino come condizione al contorno del modello risulta plausibile in base ai dati disponibili.

### 2.3.3 Direzione di flusso e ricostruzioni isofreatiemtriche

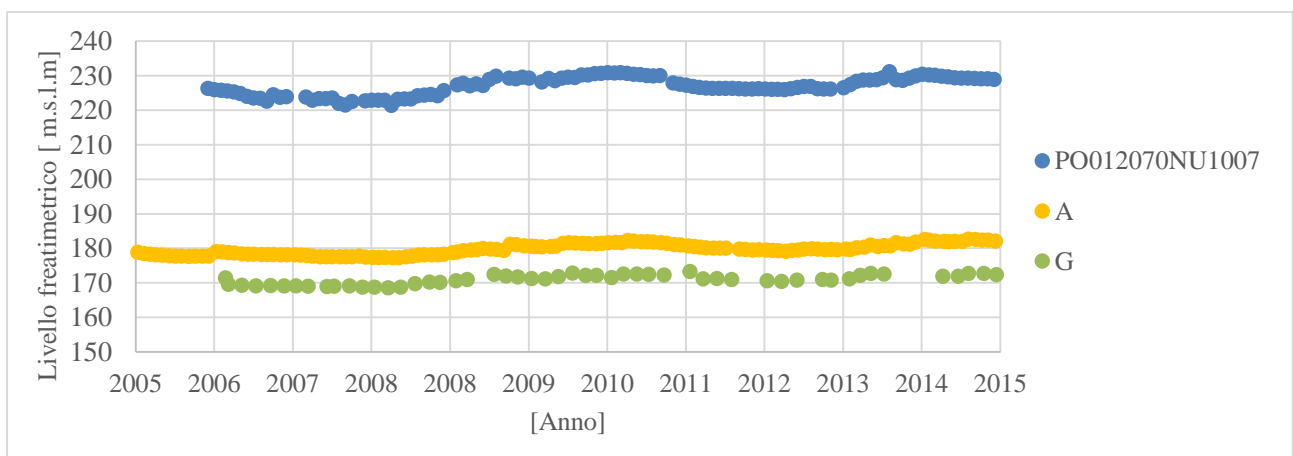
Sulla base dei precedenti elaborati trattanti lo stesso acquifero, è emerso come la falda superficiale ricarichi il fiume Ticino con un andamento delle isofreatiemtriche prevalente in direzione Sud-Ovest invariante nel corso degli anni.

Sono stati definiti 5 gruppi di piezometri con i quali si sono correlati graficamente gli andamenti freaticometrici evidenziando le principali direzioni di flusso della falda superficiale nella zona circostante l'aeroporto di Malpensa. I gruppi scelti sono così composti: 2 gruppi in direzione Sud-Ovest (Gruppi n° 1, 2), 1 gruppo orizzontale (n°3) e 2 gruppi verticali (Gruppi n° 4 e 5) da Nord a Sud (vd *Figura 2-48*).

A partire dalla *Figura 2-49* fino alla 2-53 riportiamo gli andamenti piezometrici dei gruppi sopra descritti.



*Figura 2-48: Gruppi di stazioni piezometriche*



*Figura 2-49: Andamenti piezometrici gruppo n°1*

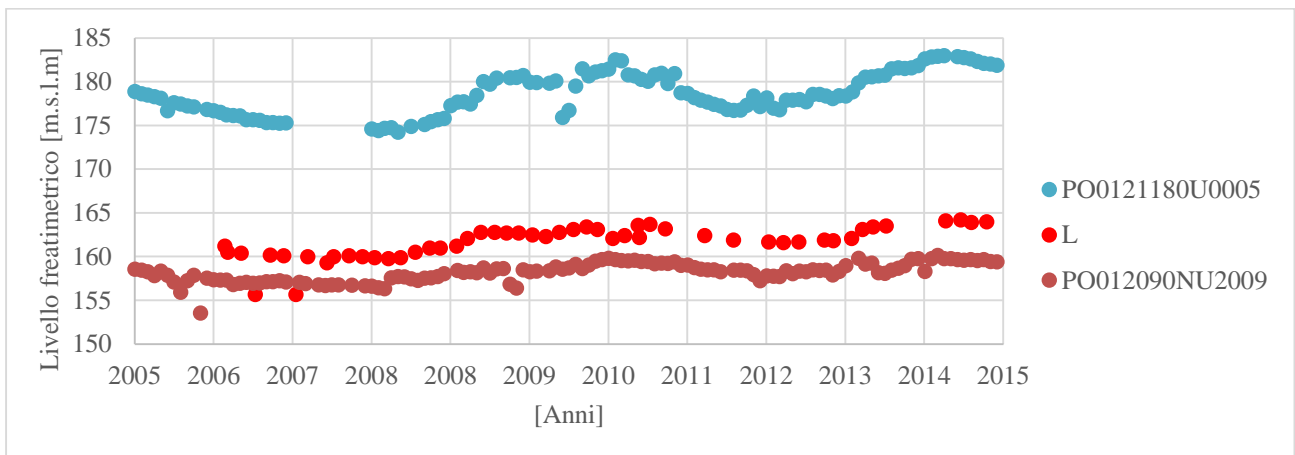


Figura 2-50: Andamenti piezometrici gruppo n°2

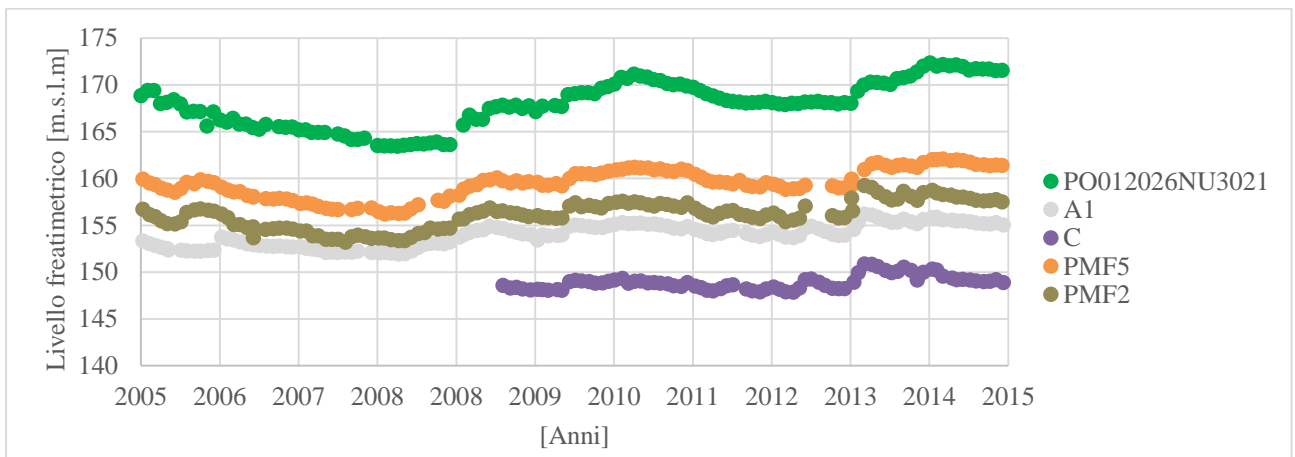


Figura 2-51: Andamenti piezometrici gruppo n°3

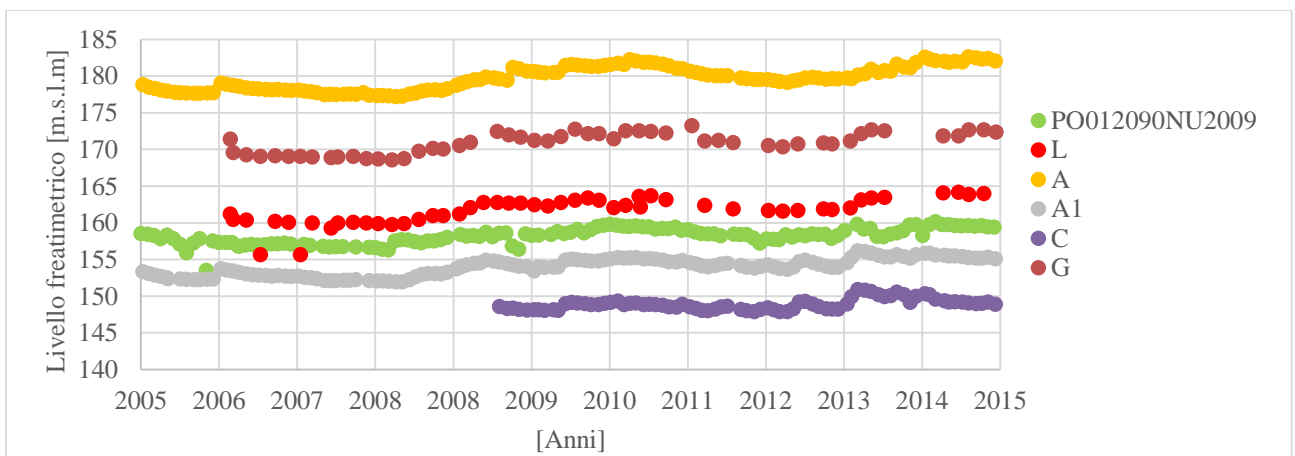


Figura 2-52: Andamenti piezometrici gruppo n°4

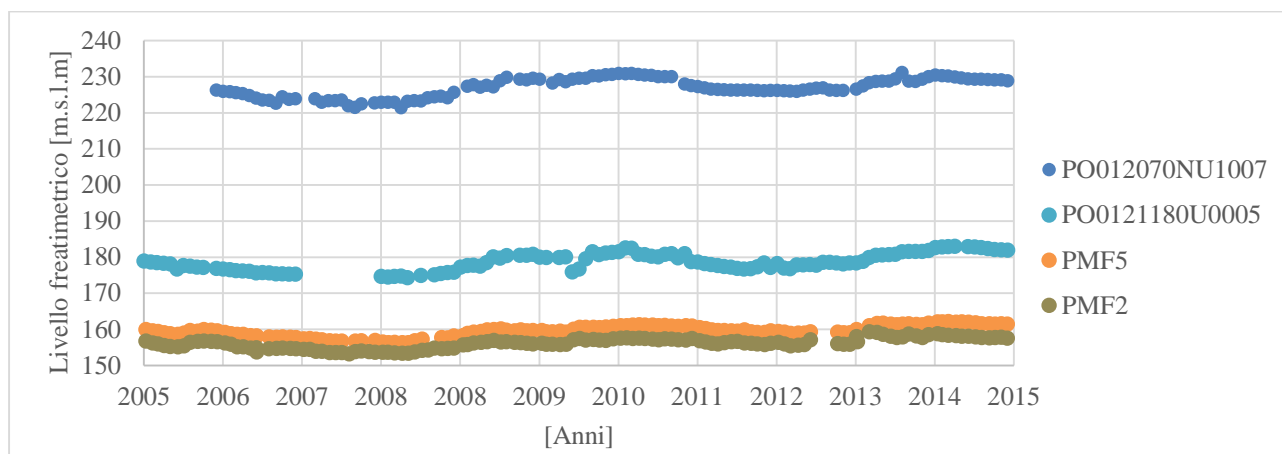


Figura 2-53: Andamenti piezometrici gruppo n°5

Dall'analisi dei gruppi di stazioni freaticometriche emerge chiaramente come vi siano due principali direzioni di deflusso della falda superficiale.

Come evidenziato dalle Figure 2-55 e 2-57 la falda presenta un gradiente in direzione Nord-Sud pari a circa 8.4‰ legato alla superficie topografica che presenta (a partire dalla zona del lago di Varese fino alle prime aree pianeggianti dell'Ovest milanese) una gradiente di circa 5.3‰.

Il secondo trend, con verso di scorrimento da Est verso Ovest è invece causato dall'azione drenante del fiume Ticino.

Non potendo sapere quale realmente sia il comportamento locale della falda superficiale e fino a che punto questo rimanga invariato e non subisca inversioni di tendenza, si è deciso di effettuare delle ricostruzioni della superficie freaticometriche analizzando a livello globale il comportamento del sistema.

#### *Ricostruzioni freaticometriche medie annue*

Di tutte le stazioni sono stati calcolati i livelli freaticometrici medi annui, in seguito si è proceduto alla ricostruzione delle superfici isopieze dell'acquifero con l'applicazione dell'Empirical Bayesian Kriging attraverso il software ArcGIS 10.3. La scelta di tale metodo è stata condizionata dalle scarse dimensioni del dataset a nostra disposizione.

L'Empirical bayesiana Kriging è un metodo di interpolazione statistica basato sul Kriging il quale rappresenta l'incertezza nella stima dei parametri del semivariogramma simulando molti semivariogrammi dai dati di input.

Il database di partenza viene suddiviso in sottoinsiemi sovrapposti di determinate dimensioni (nel nostro caso, dato il basso numero di punti si è impiegato un unico sottoinsieme costituito da tutti i punti presenti). In ogni sottoinsieme, sono stimati i semivariogrammi con le seguenti modalità:

1. Viene stimato il semivariogramma definito dai dati contenuti nel sottoinsieme;
2. Usando questo semivariogramma come modello, vengono generati in ciascuna delle posizioni di condizionamento dei nuovi dati attraverso simulazioni non condizionate;
3. A partire dai dati simulati viene stimato un nuovo semivariogramma;
4. Le fasi 2 e 3 vengono ripetute un numero specificato di volte (numero di simulazioni 1000). Ad ogni ripetizione, il semivariogramma stimato dai dati di condizionamento di partenza è utilizzato per simulare un nuovo insieme di dati nelle posizioni di ingresso e dai dati simulati viene stimato un nuovo semivariogramma.

Questo processo crea un gran numero di semivariogrammi per ogni sottoinsieme e ciascuno di questi è una stima del vero semivariogramma per il sottoinsieme.

Per ogni posizione di previsione, il valore viene calcolato utilizzando un nuovo semivariogramma determinato dalla minimum likelihood del campione di semivariogrammi ottenuti dalle simulazioni effettuate; nel caso in cui il punto ricada in due o più sottoinsiemi si andrà ad effettuare la medesima procedura di scelta statisticamente basata sul valore di massimaverosimiglianza dei semivariogrammi di ogni sottoinsieme.

Per la totalità dei casi trattati si è impiegato un modello di semivariogramma di tipo Power avente la seguente formulazione i cui parametri  $b$  (slope) e  $\alpha$  (power) vengono stimati con il metodo della massimaverosimiglianza (ML):

$$\gamma(h) = \text{Nugget} + b|h|^\alpha \quad (3.1)$$

I risultati esposti, pur non coinvolgendo la risoluzione delle equazioni di flusso dell'acquifero in esame, offrono una visione qualitativa (data driven approach) della direzione media annua dei flussi sotterranei.

Nelle seguenti figure vengono riportati gli andamenti della superficie piezometrica media annua dal 2005 al 2015. Ove possibile, le ricostruzioni piezometriche effettuate sono raccordate con le ricostruzioni effettuate da SIA società milano (per la provincia di Milano). Si nota come le ricostruzioni piezometriche effettuate in questo lavoro sono del tutto consistenti con le ricostruzioni effettuate da SIA società milano (Sito: <http://ambiente.provincia.milano.it>).

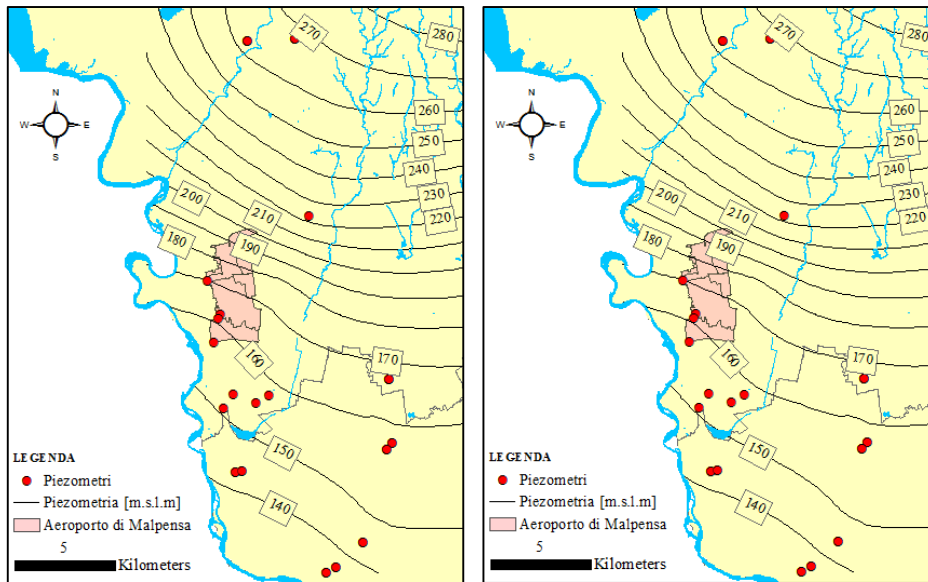


Figura 2-54 - Ricostruzione della superficie piezometrica media annua 2005 e 2006

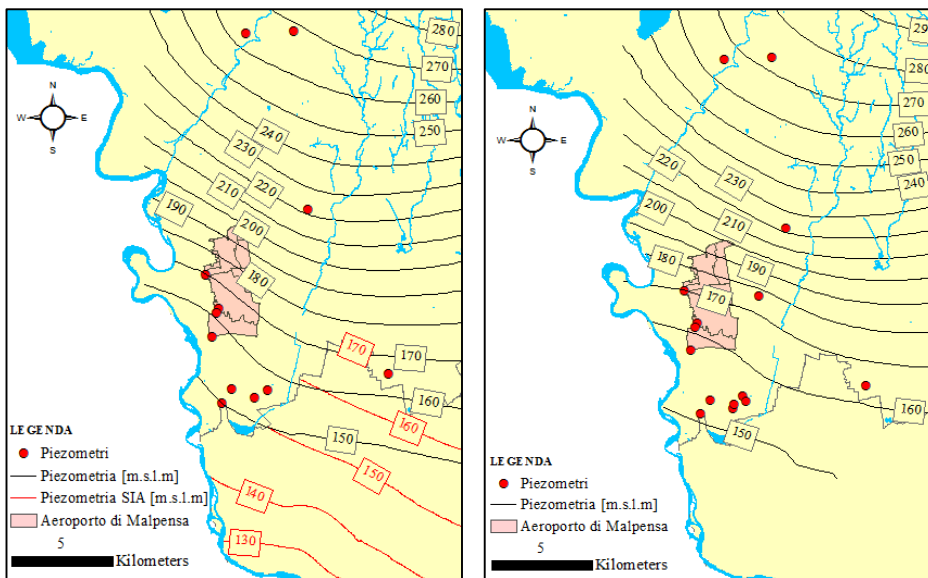


Figura 2-55 - Ricostruzione della superficie piezometrica media annua 2007 e 2008

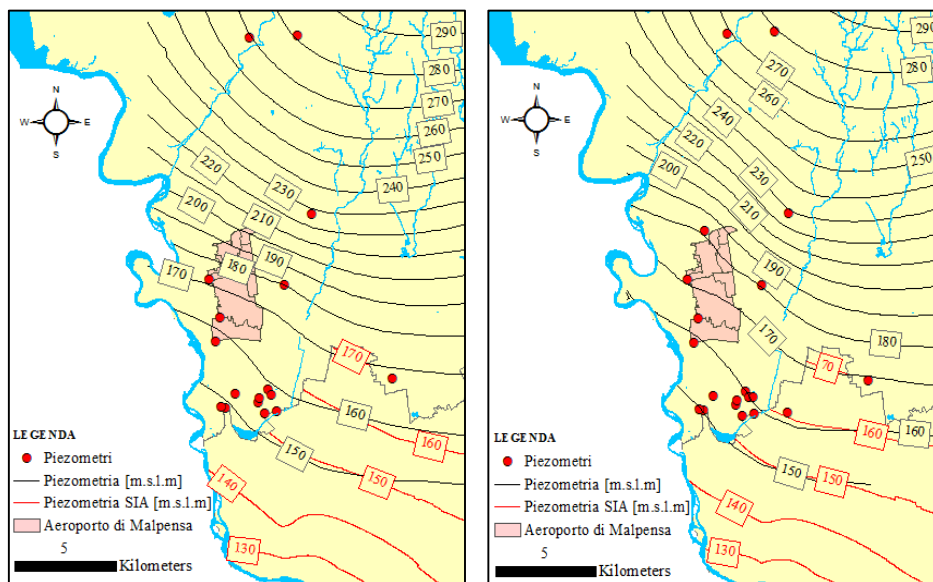


Figura 2-56: Ricostruzione della superficie piezometrica media annua 2009 e 2010

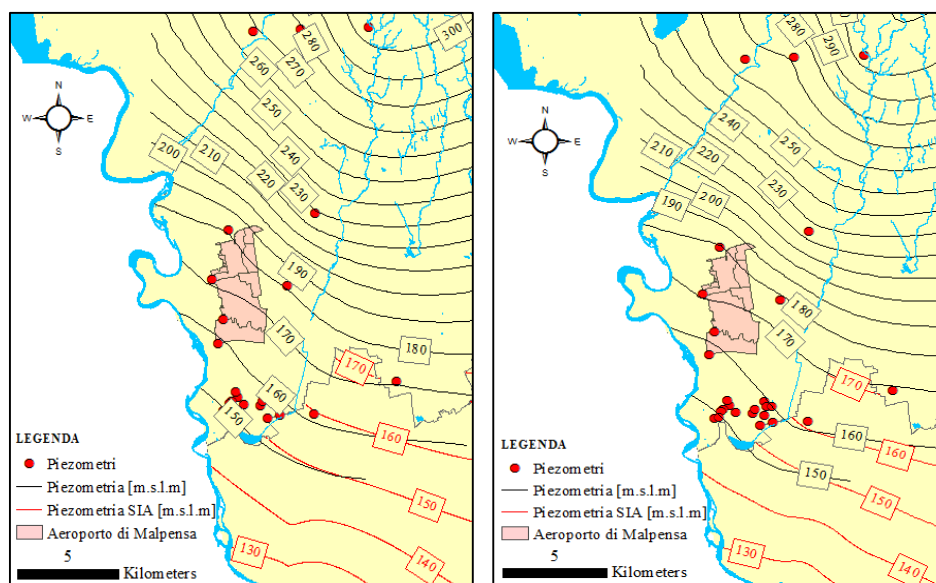


Figura 2-57: Ricostruzione della superficie piezometrica media annua 2011 e 2012

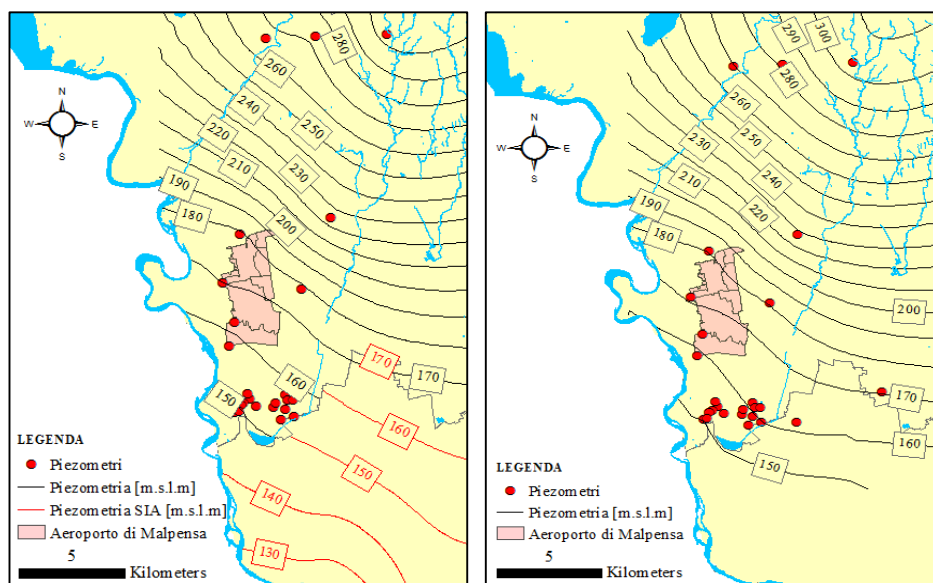


Figura 2-58: Ricostruzione della superficie piezometrica media annua 2013 e 2014

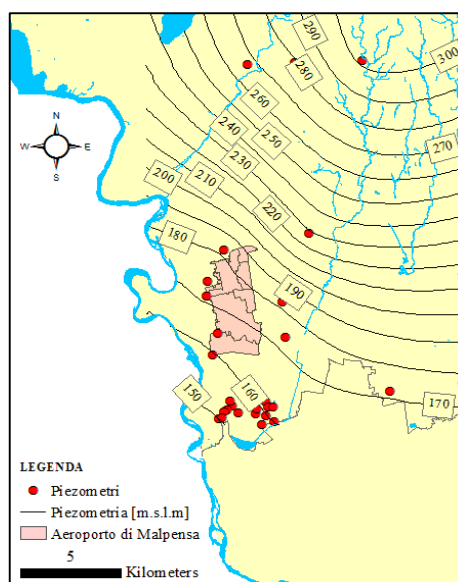


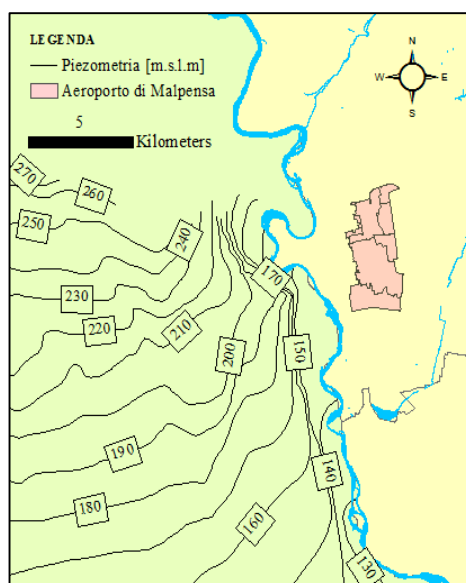
Figura 2-59: Ricostruzione della superficie piezometrica media annua 2015

Come visibile dalle figure sopra riportate, l'andamento della superficie piezometrica dell'acquifero superficiale mostra un livello delle isopieze attestato tra i 250 ed i 130 m.s.l.m nella zona di indagine (con soggiacenza statica della falda compresa tra circa i 55 e i 20 metri di profondità), e un andamento delle isofreatiemetriche prevalentemente in direzione Nord-Est Sud-Ovest invariante nel corso delle annate. Il gradiente piezometrico risulta essere maggiore nella zona Nord-Est (pari a circa 1.2%) per poi diminuire nell'area Sud-Ovest ( $\approx 0.5\%$ ). Sulla base delle analisi effettuate è possibile affermare che la direzione di flusso risulta essere inclinata di  $30^\circ$  in senso orario rispetto all'asse Nord-Sud.

Risulta evidente e confermato il generale effetto drenante del tratto del Ticino, e si osserva che, in corrispondenza dell'aeroporto di Malpensa ci sia un evidente abbassamento del gradiente.

Non si evidenziano significative variazioni rispetto agli andamenti medi annui sopra riportati.

Il Ticino esercita un analogo effetto drenante lungo la sponda piemontese, come mostrato in *Figura 2-60* per l'anno 2002. Sulla base delle informazioni disponibili si conclude pertanto che il Ticino esercita un'azione drenante sia per quanto riguarda la falda piemontese che la falda lombarda.



*Figura 2-60: Piezometria di falda superficiale della provincia di Novara*





## 3 Dominio

Nel seguente capitolo vengono definite le caratteristiche geometriche e litologiche del modello concettuale che saranno utilizzate per la creazione del modello numerico nel *Capitolo 4*. Le analisi sviluppate in questo capitolo si basano sui risultati riportati nel *Capitolo 2*. Per le caratteristiche litologiche si sono inoltre utilizzate 1113 analisi stratigrafiche disponibili dall'archivio digitale Tangram (Sito:<http://www.tangram.samit.unimib.it/>).

Nel *Paragrafo 3.1* e *3.2* viene definita la geometria del dominio del modello numerico.

Nel *Paragrafo 3.3* viene descritta la tecnica sviluppata per la ricostruzione della distribuzione spaziale dei litotipi costituenti la matrice solida del modello.

### 3.1 Definizione del dominio di calcolo

L'area all'interno della quale si è risolto numericamente il campo di moto di filtrazione è stata individuata in modo tale da:

- offrire una copertura areale sufficientemente estesa attorno al sito di interesse, al fine di investigare il comportamento della falda acquifera nella zona aeroportuale e limitrofa;
- posizionare le condizioni al contorno sufficientemente lontane dal sito in esame e in corrispondenza di zone in cui la falda presenta minori fluttuazioni nel tempo.

Il dominio del modello riportato in *Figura 3-1* si sviluppa in larghezza (in direzione Est-Ovest) per circa 13km ed in altezza (in direzione Nord-Sud) per circa 21km, comprendendo una superficie di 175 km<sup>2</sup>. L'area d'interesse ricade nei seguenti territori comunali: Somma Lombardo, Casorate Sempione, Gallarate, Cardano al Campo, Samarate, Vizzola Ticino, Ferno, Lonate Pozzolo, Albizzate, Castronno, Mornago, Vergiate, Besnate, Arsago Seprio, Cavaria con Premezzo, Cassano Magnago per la provincia di Varese e Vanzaghella, Magnago, Nosate e Castano Primo per la provincia di Milano.



Figura 3-1: Area di definizione del modello numerico e relative condizioni al contorno

La superficie di piano campagna nel dominio di indagine varia tra 290 e 140 m.s.l.m. Le condizioni al contorno imposte sono rappresentate in *Figura 3-1* e di seguito dettagliate:

- Contorno Nord (in giallo in *Figura 3-1*). Data la stabilità delle linee isopiezometriche medie nel quinquennio osservata nel *Paragrafo 2.2.3* si è deciso di utilizzare lungo questo contorno una condizione di Dirichlet (carico imposto) pari a 260 m s.l.m.;
- Contorno Sud (in verde in *Figura 3-1*). Le elaborazioni fornite da SIA hanno permesso l'identificazione di un contorno di Dirichlet (carico costante) pari a 145 m s.l.m.
- Contorno Ovest (in azzurro in *Figura 3-1*). Questo contorno è formato da due parti come evidenziato in *Figura 3-2*. Una prima parte (*Figura 3-2a*) è lunga circa 20 km e coincide con il fiume Ticino. Data la notevole variabilità ed incertezza legata ai livelli del Ticino si è deciso di analizzare la risposta della falda in seguito a variazioni delle condizioni al contorno di carico determinate da un differente regime idrico (vd *Paragrafo 2.2*) e nel caso di una ricarica negativa.

Una seconda parte (*Figura 3-2b*) è lunga circa 6 km e coincide con uno spartiacque sotterraneo. Si è pertanto imposta una condizione di non flusso (impermeabile) lungo il contorno Ovest B.



Figura 3-2: Confine Ovest (a) e (b) del modello matematico

- Contorno Est (in rosso in *Figura 3-1*). Le elaborazioni eseguite nel *Paragrafo 2.2.3* hanno permesso di identificare in questa zona la presenza di uno spartiacque sotterraneo (i.e. contorno impermeabile).

### 3.2 Ricostruzione della base dell'acquifero

La ricostruzione della base dell'acquifero è stata condotta utilizzando il database digitale Tangram, unitamente ai dati stratigrafici dei pozzi aeroportuali e dei piezometri ARPA Varese.

La ricostruzione di tale superficie ha richiesto la rielaborazione dei dati utilizzando un codice in ambiente MATLAB sviluppato durante questo lavoro di tesi e dettagliato in *Appendice VI*. Il fine ultimo del codice è quello di estrapolare dalle stratigrafie disponibili la posizione e lo spessore della base impermeabile dell'acquifero (costituita prevalentemente da argilla e limo) nei punti monitorati.

La ricostruzione spaziale della base dell'acquifero è successivamente avvenuta attraverso un interpolare stocastico (Ordinary Kriging). Questa operazione ha richiesto un'analisi variografica dei dati e la stima del relativo semivariogramma (vd *Appendice V*).

Una prima analisi dei dati litostratigrafici ha evidenziato la presenza di un trend della base dell'acquifero con andamento decrescente da Nord a Sud. Si è ricostruita la superficie interpolante,  $Z_{base}$ , della base dell'acquifero minimizzando, attraverso il metodo dei mini

quadrati, la differenza tra l'eq. (3.1) e la quota calcolata utilizzando i dati sperimentali,  $Z_{base}^*$ . I parametri dell'eq. (3.1) sono riportati in *Tabella 3-1*.

$$Z_{base} = p_{00} + p_{10} \cdot x + p_{01} \cdot y + p_{20} \cdot x^2 + p_{11} \cdot x \cdot y + p_{02} \cdot y^2 \quad (3.1)$$

	<i>Coefficienti</i>	<i>Intervalli di confidenza (95%)</i>
p00	165.8	159.8 – 171.8
p10	46.03	42.23 – 49.83
p01	7.26	3.00 – 11.52
p20	6.095	2.95 – 9.22
p11	5.79	1.65 – 9.93
p02	-8.15	-11.64 – -4.655

*Tabella 3-1: Parametri di interpolazione della superficie di separazione e relativo intervallo di confidenza*

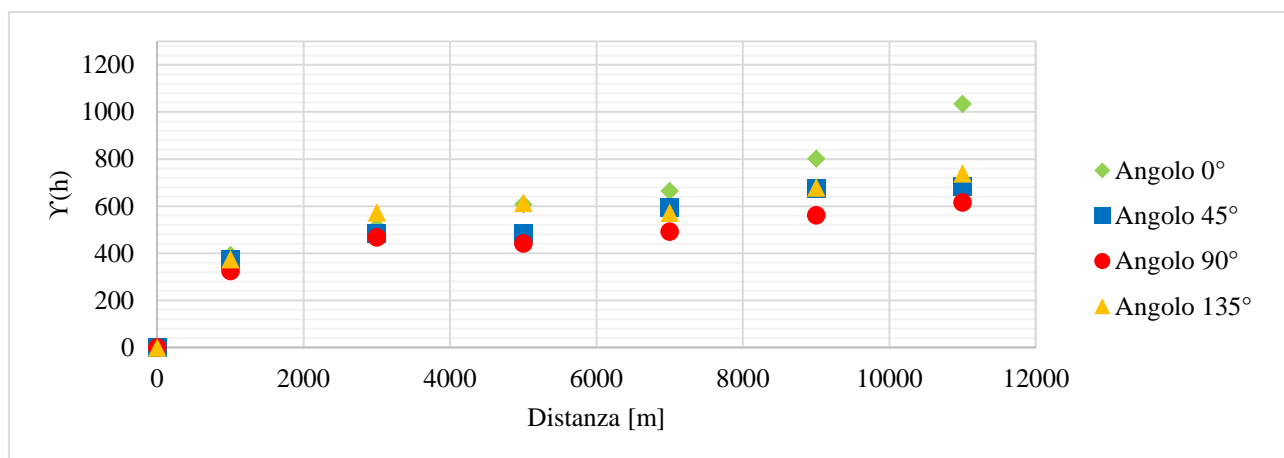
La costruzione del variogramma della superficie interpolante è stata condotta sulla variabile  $Z_{base} - Z_{base}^*$ .

È stata condotta un'analisi di sensitività al fine di individuare l'influenza dei parametri adottati per il calcolo del semivariogramma sperimentale. In *Tabella 3-2* si riportano i valori utilizzati.

Lag separation	1000
Lag tolerance	500
azimuth	360°
Tolerance angle	90°
bandwidth	500

*Tabella 3-2: Parametri adottati per la costruzione del semivariogramma sperimentale*

È stata inoltre analizzata la presenza di eventuali anisotropie attraverso il confronto fra semivariogrammi formanti angoli di 0, 45, 90, 135° rispetto alla direttrice Nord-Sud (vd *Figura 3-3*). L'osservazione dei semivariogrammi direzionali ha portato ad escludere la presenza di significative direzioni di anisotropia.



*Figura 3-3: Semivariogrammi direzionali della base dell'acquifero*

Il semivariogramma sperimentale è stato interpretato utilizzando: (1) modello sferico con stima del nugget (SPH 3 par), (2) modello sferico senza nugget (SPH 2 par), (3) modello esponenziale con nugget (EXP 2 par), (4) modello esponenziale senza nugget (EXP 2 par), (5) modello gaussiano con nugget (GAUS 3 par) e (6) modello gaussiano senza nugget (GAUS 2 par). I parametri di ciascun modello sono stati stimati sulla base del metodo di massima verosimiglianza (ML) (vd *Tabella 3-3*).

Si sono quindi applicati dei modelli (vd *Appendice VII.2*) per la scelta del modello da adottare. I risultati sono riportati in *Tabella 3-4*.

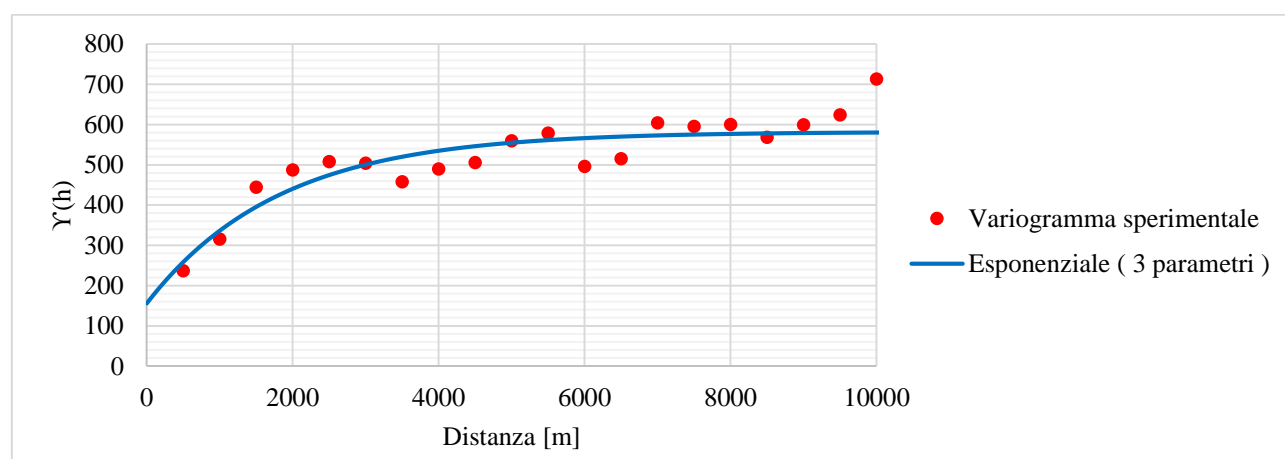
	<i>SPH (3 par)</i>	<i>SPH (2 par)</i>	<i>EXP (3 par)</i>	<i>EXP (2 par)</i>	<i>GAUS (3 par)</i>	<i>GAUS (2 par)</i>
Nugget	158.31	0	<b>155.88</b>	0	201.75	0
Sill	402.46	554.50	<b>425.80</b>	566.16	356.31	549.76
Range [m]	3,418.82	2,451.41	<b>5,442.92</b>	3,500.00	2,668.32	1,739.83

*Tabella 3-3: Parametri dei modelli implementanti*

	<i>SPH (3 par)</i>	<i>SPH (2 par)</i>	<i>EXP (3 par)</i>	<i>EXP (2 par)</i>	<i>GAUS (3 par)</i>	<i>GAUS (2 par)</i>
AIC	122.23	137.47	<b>90.46</b>	110.68	122.04	166.6
BIC	121.99	136.17	<b>88.69</b>	109.87	121.51	165.93

*Tabella 3-4: Valori di AIC e BIC per i modelli di interpretazione del semivariogramma sperimentale del tetto dell'acquitaro*

I risultati ottenuti mostrano come il modello esponenziale a 3 parametri sia il migliore per la rappresentazione dei punti sperimentali. Si riporta in *Figura 3-4* il semivariogramma sperimentale e il modello esponenziale scelto.



*Figura 3-4: Semivariogramma sperimentale e modello esponenziale per la ricostruzione della base dell'acquifero*

In seguito si è sottoposto il modello di semivariogramma adottato ad una procedura di cross-validazione in accordo con le consuete procedure geostatistiche (vd *Appendice VII.1*); nelle *Figure 3-5 – 3-7* sono riportati i risultati ottenuti e in *Tabella 3-5* i dati d'errore.

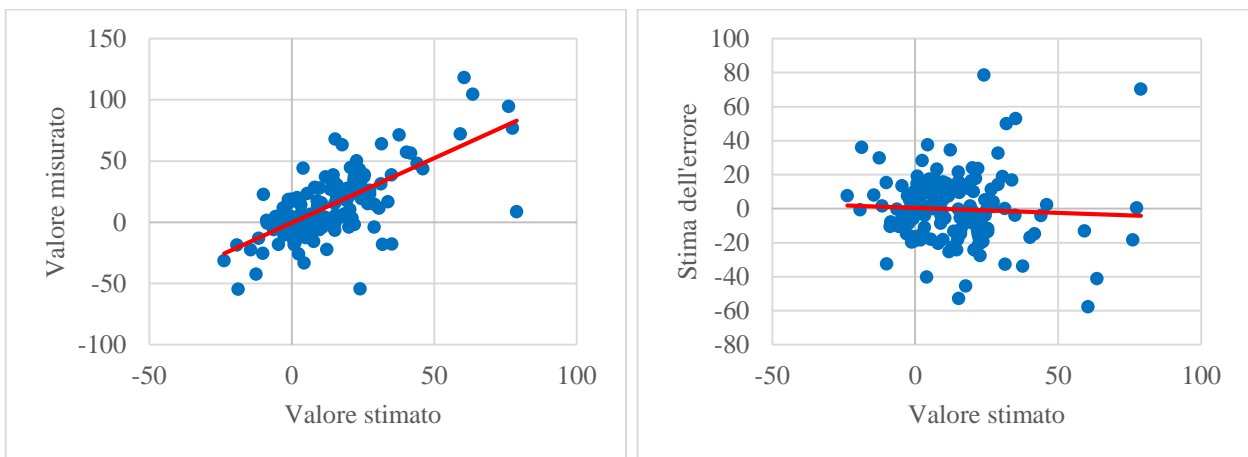


Figura 3-5: Tetto acquitardo - Cross validazione tra il valore stimato e misurato (a) e Cross validazione tra il valore misurato e l'errore stimato (b)

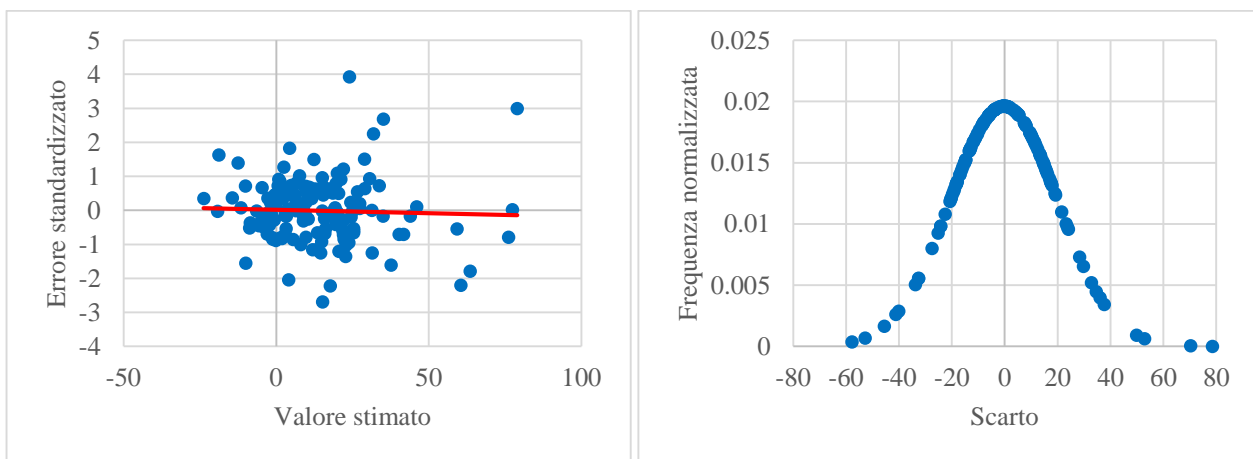


Figura 3-6: Tetto acquitardo - Cross validazione tra il valore misurato e l'errore standardizzato (a) e Distribuzione di probabilità degli errori di stima (b)

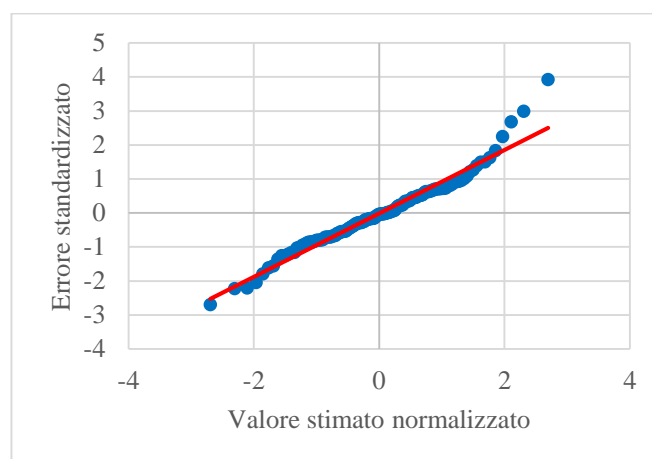


Figura 3-7: Tetto acquitardo - Cross validazione tra il valore stimato normalizzato e l'errore standardizzato

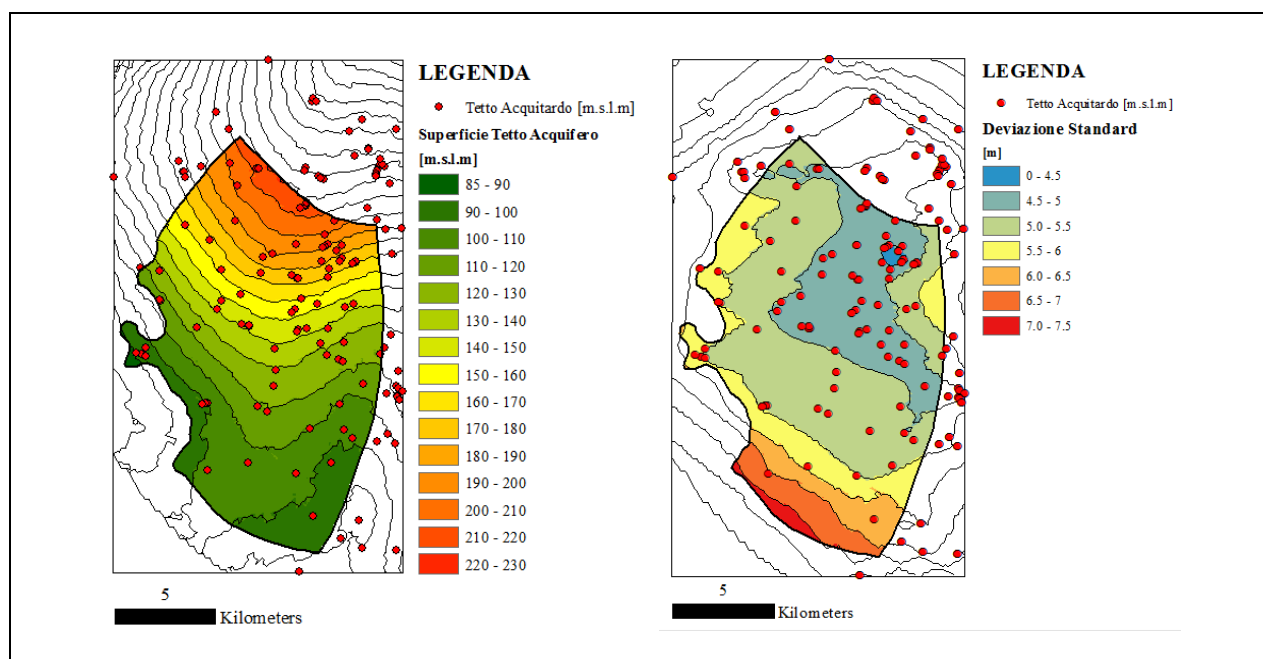
	<i>Media [m]</i>	<i>Errore quadratico medio [m]</i>	<i>Media standardizzata</i>	<i>Errore quadratico medio stand.</i>	<i>Errore standardizzato medio</i>
Errore stimato	-0.350	20.253	-0.012	0.946	21.529

*Tabella 3-5: Tetto dell'acquitaro – Cross validazione del modello di semivariogramma esponenziale*

Sulla base dei grafici precedentemente esposti, si ritiene che il modello ed i parametri ad esso associati siano in grado di fornire una rappresentazione adeguata della variabilità spaziale della base dell'acquifero nell'area in esame.

Successivamente si è ricostruita la base dell'acquifero interpolando i dati sperimentali con l'algoritmo di Ordinary Kriging presente all'interno Geostatistical wizard del software ArcGIS.

La superficie ottenute e il campo di deviazione standard ad esso associato sono riportati in *Figura 3-8 e 3-9*; i simboli individuano la localizzazione dei punti di condizionamento utilizzati.



*Figura 3-8: Tetto dell'acquitaro [m.s.l.m], campo di deviazione standard e relativi punti di condizionamento*



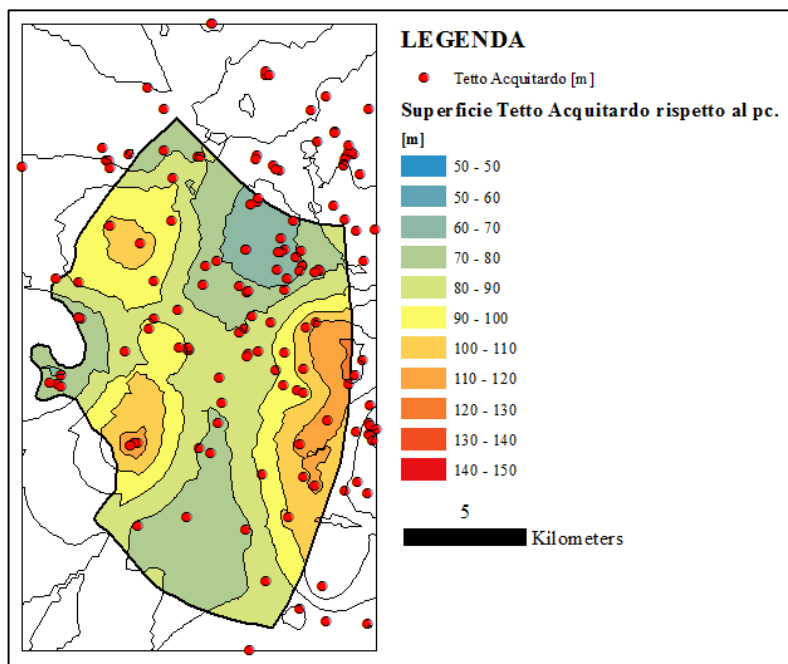


Figura 3-9: Tetto dell'acquifero [m] e relativi punti di condizionamento

In maniera del tutto analoga a quanto visto per la ricostruzione del tetto dell'acquifero si riporta in Figura 3-10 lo spessore dell'acquifero, mentre in Tabella 3-6 i principali parametri statistici.

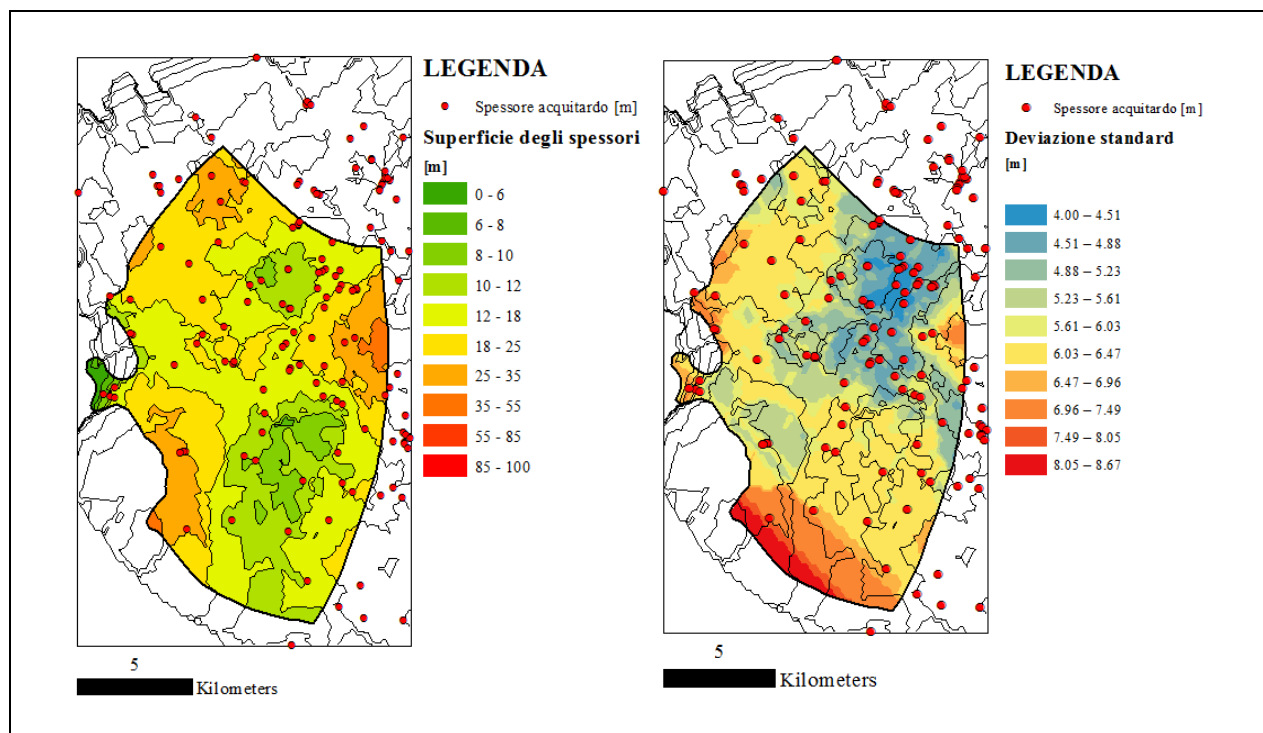


Figura 3-10: Spessore dell'acquifero, deviazione standard e relativi punti di condizionamento

	<i>Media</i>	<i>Dev. St.</i>	<i>Minimo</i>	<i>Massimo</i>
Tetto [m.s.l.m]	163.39	52.92	32.77	294.5
Tetto [m] rispetto al p.c	84.17	22.63	50	149
Spessore [m]	19.73	17.08	5	124.5

Tabella 3-6: Parametri statistici tetto e spessore dell'acquitrardo

Utilizzando i punti quotati forniti dalla regione Lombardia per le provincie di Varese e Milano (Sito: <http://www.geoportale.regione.lombardia.it/download-dati>) si è interpolata la superficie di piano campagna con l'impiego del subroutine Local Polynomial Inteprolation presente nel software ArcGIS (vd Figura 3-12).

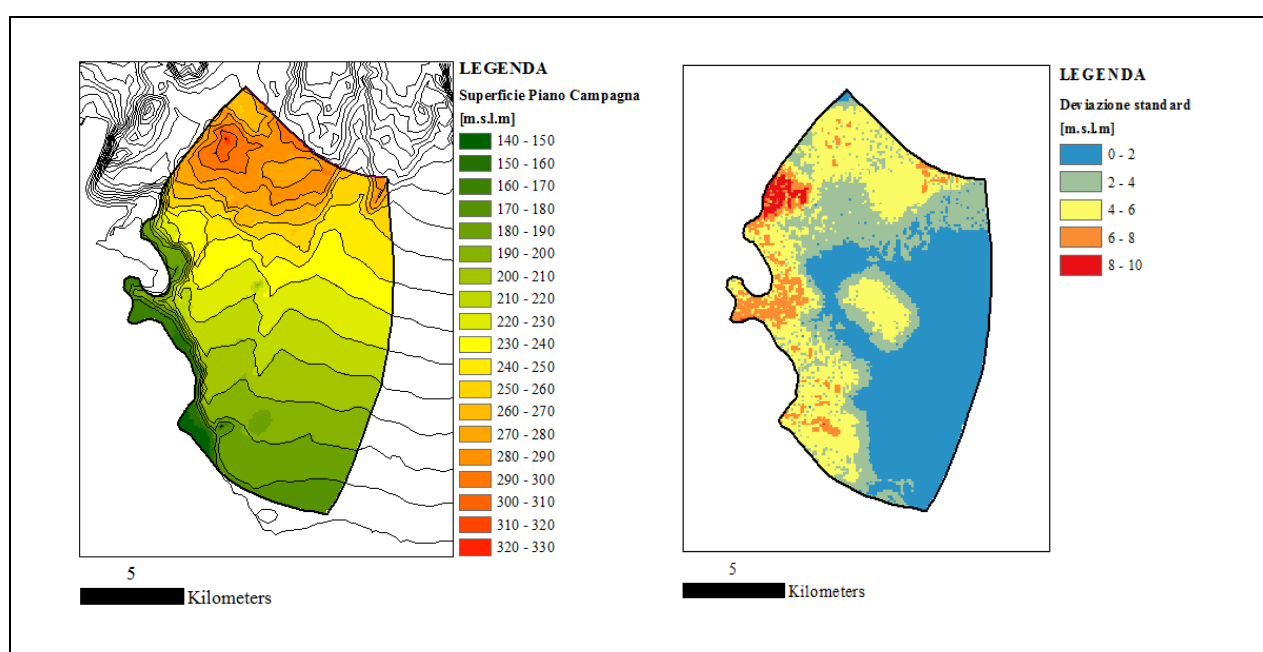


Figura 3-11: Quota piano campagna del dominio di modellazione e relativa deviazione standard

### 3.3 Ricostruzione litostratigrafica

Le informazioni litostratigrafiche disponibili sono state analizzate per ottenere una ricostruzione tridimensionale della distribuzione dei litotipi tramite metodi di interpolazione geostatistici a variabili indicizzate. In particolare nel presente paragrafo si confrontano i risultati dei modelli di ricostruzione a mezzo composito e a continui multipli.

#### 3.3.1 Modello a mezzo composito

La ricostruzione della distribuzione dei litotipi si basa sull'applicazione del kriging ad indicatori. Il metodo sviluppato in questo paragrafo è una estensione del lavoro di *Guadagnini*

*et al.* [2004], in cui si considerano due distinti litotipi, a differenza dello studio in oggetto in cui i litotipi sono in numero maggiore. In dettaglio, si eseguono i seguenti passi:

1. le informazioni stratigrafiche, rappresentate in termini di variabili discrete di valore compreso fra 1 e  $n$  e associate alle singole unità lito-stratigrafiche, vengono inizialmente riclassificate associando un valore dell'indicatore pari a 1 alla Categoria  $i$ , mentre alle restanti categorie viene associato un valore nullo dell'indicatore;
2. si procede alla costruzione dei variogrammi ad indicatori verticali e orizzontali della Categoria  $i$  e alla loro interpretazione attraverso diversi modelli teorici (sferico, esponenziale, Gaussiano);
3. il modello di variogramma teorico che meglio interpreta il variogramma sperimentale viene scelto sulla base di opportuni criteri di discriminazione di modelli;
4. attraverso il kriging ad indicatori tridimensionale si ricostruisce la distribuzione probabilistica della Categoria  $i$ ;
5. la delimitazione del volume occupato dalla Categoria  $i$  viene effettuata preservando la frazione volumetrica sperimentale della categoria in esame.

I passi 1-5 sono ripetuti in successione da  $i=1$  a  $i=n$ . I punti 4 e 5 per  $i=j$  vengono effettuati sulla porzione di dominio esterna a quella determinata per  $i=j-1$ . La procedura implementata consente di ricostruire una distribuzione dei geo-materiali consistente con i valori di frazioni volumetriche osservate. Il punto 5 ha richiesto l'implementazione della seguente tecnica iterativa:

1. viene fissata una soglia, inizialmente pari al valore della percentuale volumetrica della categoria a cui è assegnato l'indicatore 1;
2. si confronta il valore della cella con la soglia fissata; se questo è minore della soglia, la cella assume il valore 0, altrimenti assume il valore 1;
3. si calcola la nuova percentuale volumetrica all'interno del dominio;

I punti 1-3 vengono ripetuti variando la soglia iniziale fino al raggiungimento al punto 3 di una percentuale stimata pari a quella sperimentale, a meno di una tolleranza fissata.

### 3.3.2 Modello a continui multipli

Il modello a continui multipli permette di associare ad ogni singola cella la presenza di più di una categoria sovrapposte. In dettaglio, la procedura è costituita dai seguenti passaggi:

1. Si ripetono i punti 1-4 visti nel *Paragrafo 3.3.1* su tutto il dominio di calcolo associando ad ogni categoria la sua percentuale volumetrica in ogni cella;

2. il valore di conduttività associato ad ogni singola cella del dominio viene calcolato come media pesata dei valori di conduttività associati alle  $n$  unità lito stratigrafiche, pesata rispetto alla percentuale volumetrica di ciascuna di esse all'interno di ciascuna cella.

### 3.3.3 Analisi geostatistica delle categorie

Nell'ambito della porzione del territorio in esame (vd *Paragrafo 1.3*), le informazioni desumibili dalle stratigrafie consentono di schematizzare le caratteristiche litostratigrafiche del sottosuolo tramite la successione delle seguenti unità litostratigrafiche:

- Deposito ghiaioso del Diluvium Recente formata da ghiaie e sabbie con uno spessore di 90-100 m, alla cui base si trovano i conglomerati del ceppo e/o i depositi fluvio-glaciali antichi del Ferretto.
- Strato impermeabile omogeneo di spessore variabile tra i 20 e 100 m che limita la comunicazione tra la falda freatica e gli acquiferi più profondi.

Le indicazioni litologiche contenute all'interno dell'insieme di dati disponibili, risultano molto eterogenee, derivando, nella maggior parte dei casi, da diversi enti e sistemi di analisi.

Dato l'ingente ammontare di stratigrafie a nostra disposizione e la differente metodologia con la quale si è redatta la stratigrafia si è ritenuto opportuno, analizzare i dati semplificandone la descrizione.

In letteratura, per la denominazione dei terreni costituiti da più frazioni granulometriche, si utilizza la seguente convenzione. Siano A, B, C i litotipi principali (argilla, limo,.....), e siano P1,P2,P3 le loro percentuali (volumetriche) di A, B, C. Se  $P1 > P2 > P3$  il terreno viene denominato con il nome della frazione A seguito dai nomi delle frazioni B e C preceduti dalla congiunzione "con" se il corrispondente valore di P è compreso tra il 50% ed il 25%, seguiti dal suffisso "oso" se P è tra il 25% ed il 10%, infine seguiti dal suffisso "oso" e preceduti da "debolmente" se P è compreso tra il 10% ed il 5% (ad esempio, un terreno formato dal 55% di sabbia, dal 28% di limo, dall'11% di argilla e dal 6% di ghiaia viene denominato: sabbia con limo, argillosa e debolmente ghiaiosa).

I dati, sono stati suddivisi all'interno di 4 categorie. La scelta è stata eseguita sulla base di considerazioni relative alle percentuali volumetriche dei litotipi preponderanti.

La *Tabella 3-7* riporta lo schema adottato per l'attribuzione dei litotipi presenti nel sistema alle 4 classi (o categorie) che costituiscono la base per la definizione di variabili indicizzate attraverso cui descrivere la distribuzione dei geo-materiali nell'area di interesse.

<i>Categoria</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Percentuale volumetrica %</i>
1	Depositi argillosi e limosi	26.9
2	Ghiaia, ghiaietto, ciottoli, conglomerato e trovanti (sassi di grosse dimensioni)	50.9
3	Sabbia e arenaria	16.8
4	Terreno	5.4

Tabella 3-7: Percentuali volumetriche delle 4 categorie di litotipi prese in esame

Il primo passo da compiere per la ricostruzione della distribuzione spaziale delle quattro categorie riassunte in *Tabella 3-7* è quello di effettuare un'analisi variografica di ogni categoria. I dati di input sono stati riorganizzati secondo la procedura descritta nel *Paragrafo 3.3.1 e 3.3.2* per ogni litotipo individuato. A partire da questi dati è stato possibile costruire i variogrammi sperimentali che interpretano la variabilità spaziale dei geomateriali. Si è effettuata un'analisi di sensitività con la finalità di individuare l'influenza di grandezze quali Lag Separation, Angle Tolerance e Bandwidth sulla forma dei semivariogrammi sperimentali. Questa analisi ha permesso di individuare i valori utilizzati e riassunti nella *Tabella 3-8*.

	<i>Direzione orizzontale</i>	<i>Direzione verticale</i>
Lag separation [m]	6	1000
Lag tolerance [m]	1	500
Azimuth angle	0°	360°
Tolerance angle	10°	100
Bandwidth [m]	1	500

Tabella 3-8: Parametri adottati per la costruzione dei semivariogrammi sperimentali

I semivariogrammi sperimentali sono stati interpretati utilizzando i modelli sferico, esponenziale e gaussiano con e senza la stima del nugget, come effettuato nel *Paragrafo 3.2*. Per ciascuna categoria si riportano nelle *Tablelle 3-9 – 3-16* i valori dei parametri stimati con il metodo della massima verosimiglianza (ML). Nelle *Figure 3-12-3-19* sono mostrati, i semivariogrammi sperimentali e i modelli calibrati per ogni categoria.

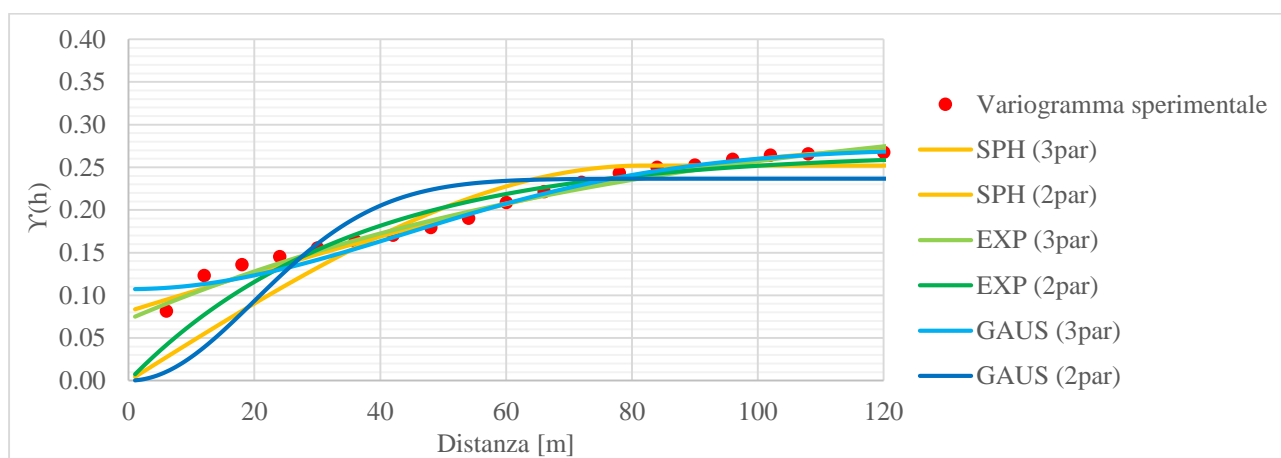


Figura 3-12: Variogramma sperimentale verticale e relativi modelli – Categoria 1

	<i>Sph3</i>	<i>Sph2</i>	<i>Exp3</i>	<i>Exp2</i>	<i>Gaus3</i>	<i>Gaus2</i>
Nugget	0.08	0.00	0.07	0.00	0.11	0.00
Sill	0.19	0.25	0.27	0.27	0.16	0.24
Range [m]	125.22	81.80	254.76	105.68	107.53	48.83

Tabella 3-9: Parametri dei modelli di variogramma verticale – Categoria 1

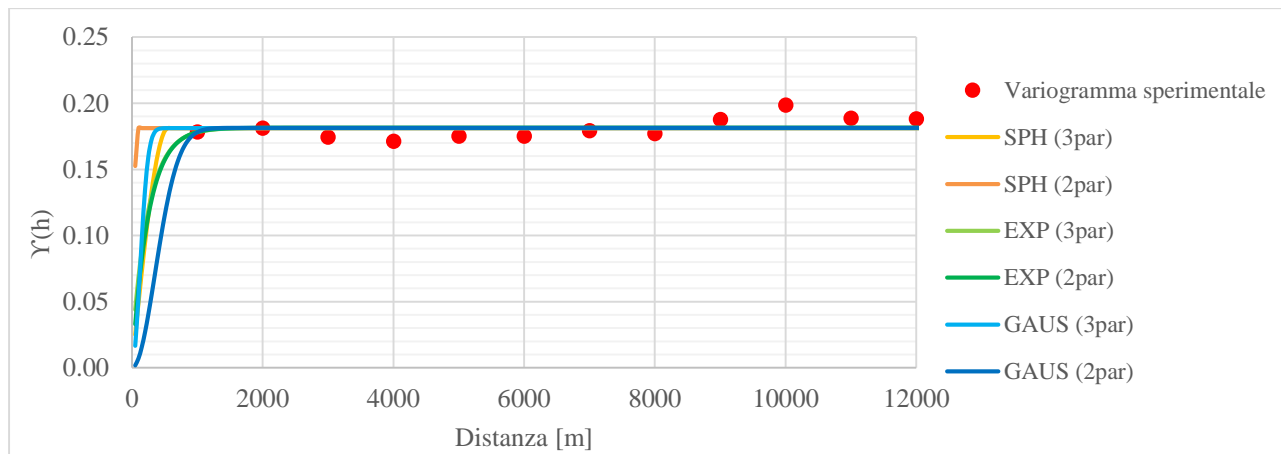


Figura 3-13: Variogramma sperimentale orizzontale e relativi modelli – Categoria 1

	<i>Sph3</i>	<i>Sph2</i>	<i>Exp3</i>	<i>Exp2</i>	<i>Gaus3</i>	<i>Gaus2</i>
Nugget	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Sill	0.18	0.18	0.17	0.18	0.18	0.18
Range [m]	551.62	76.36	765.64	749.31	298.87	864.71

Tabella 3-10: Parametri dei modelli di variogramma orizzontale – Categoria 1

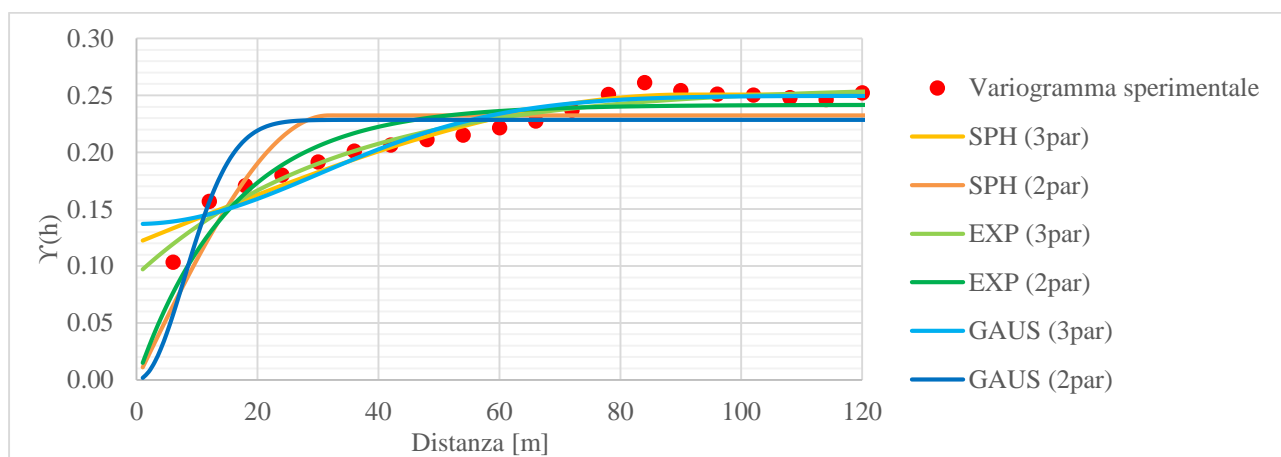


Figura 3-14: Variogramma sperimentale verticale e relativi modelli – Categoria 2

	<i>Sph3</i>	<i>Sph2</i>	<i>Exp3</i>	<i>Exp2</i>	<i>Gaus3</i>	<i>Gaus2</i>
Nugget	0.12	0.00	0.09	0.00	0.14	0.00
Sill	0.13	0.23	0.17	0.24	0.11	0.23
Range [m]	90.85	31.80	101.02	47.52	74.11	19.38

Tabella 3-11: Parametri dei modelli di semivariogramma verticale – Categoria 2

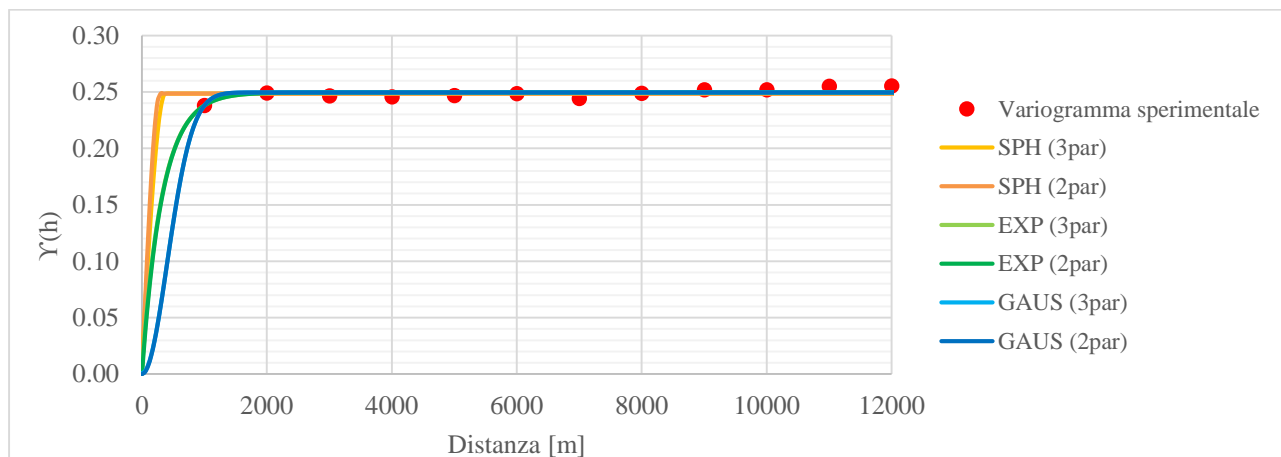


Figura 3-15: Variogramma sperimentale orizzontale e relativi modelli – Categoria 2

	<i>Sph3</i>	<i>Sph2</i>	<i>Exp3</i>	<i>Exp2</i>	<i>Gaus3</i>	<i>Gaus2</i>
Nugget	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Sill	0.24	0.25	0.24	0.25	0.25	0.25
Range [m]	374.06	290.98	984.08	976.89	988.15	987.62

Tabella 3-12: Parametri dei modelli di semivariogramma orizzontale – Categoria 2

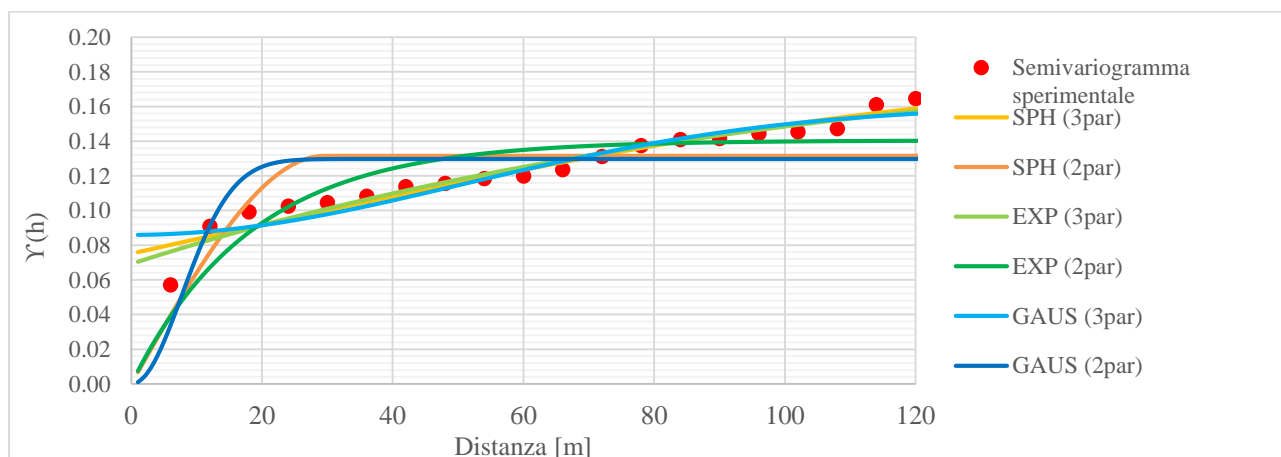


Figura 3-16: Variogramma sperimentale verticale e relativi modelli – Categoria 3

	<i>Sph3</i>	<i>Sph2</i>	<i>Exp3</i>	<i>Exp2</i>	<i>Gaus3</i>	<i>Gaus2</i>
Nugget	0.08	0.00	0.07	0.00	0.09	0.00
Sill	0.09	0.13	0.13	0.14	0.07	0.13
Range [m]	167.40	29.58	323.87	55.47	124.30	18.88

Tabella 3-13: Parametri dei modelli di semivariogramma verticale – Categoria 3

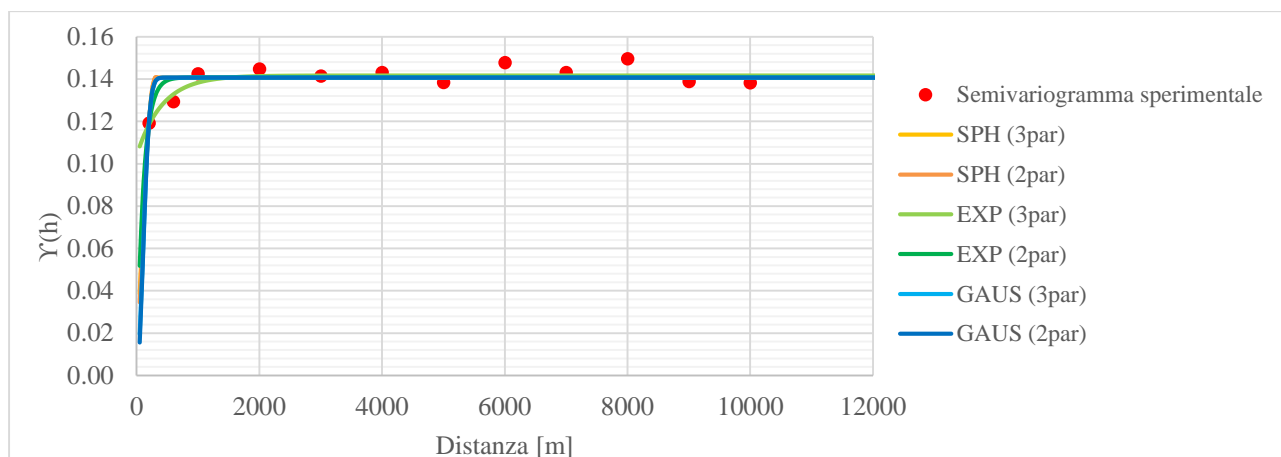


Figura 3-17: Variogramma sperimentale orizzontale e relativi modelli – Categoria 3

	<i>Sph3</i>	<i>Sph2</i>	<i>Exp3</i>	<i>Exp2</i>	<i>Gaus3</i>	<i>Gaus2</i>
Nugget	0.01	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00
Sill	0.13	0.14	0.04	0.14	0.14	0.14
Range [m]	306.42	302.75	1241.90	327.18	255.21	252.93

Tabella 3-14: Parametri dei modelli di semivariogramma orizzontale – Categoria 3

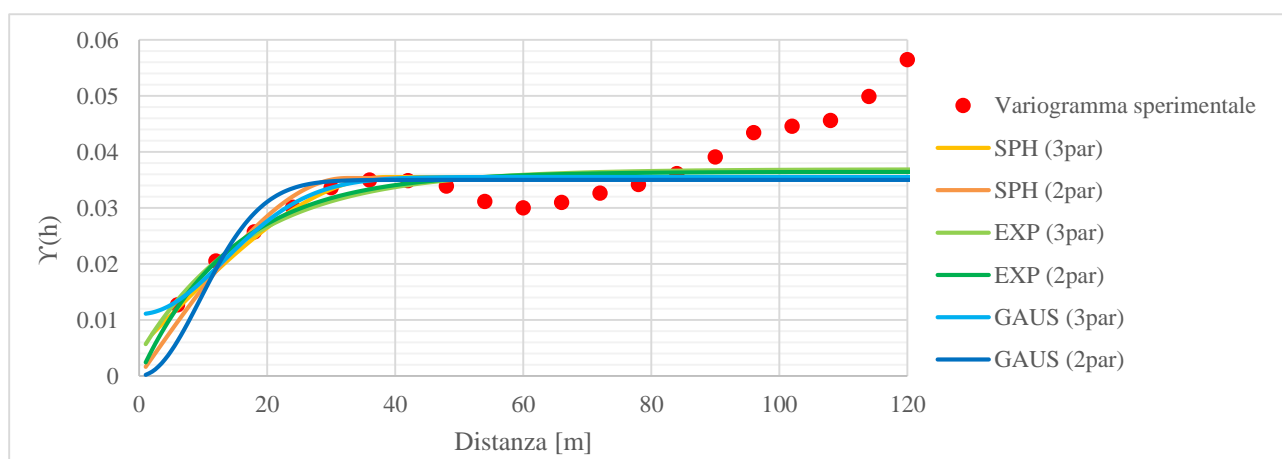


Figura 3-18: Variogramma sperimentale verticale e relativi modelli – Categoria 4

	<i>Sph3</i>	<i>Sph2</i>	<i>Exp3</i>	<i>Exp2</i>	<i>Gaus3</i>	<i>Gaus2</i>
Nugget	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Sill	0.03	0.04	0.03	0.04	0.02	0.04
Range [m]	37.76	32.42	51.19	43.84	32.50	23.38



Tabella 3-15: Parametri dei modelli di semivariogramma verticale – Categoria 4

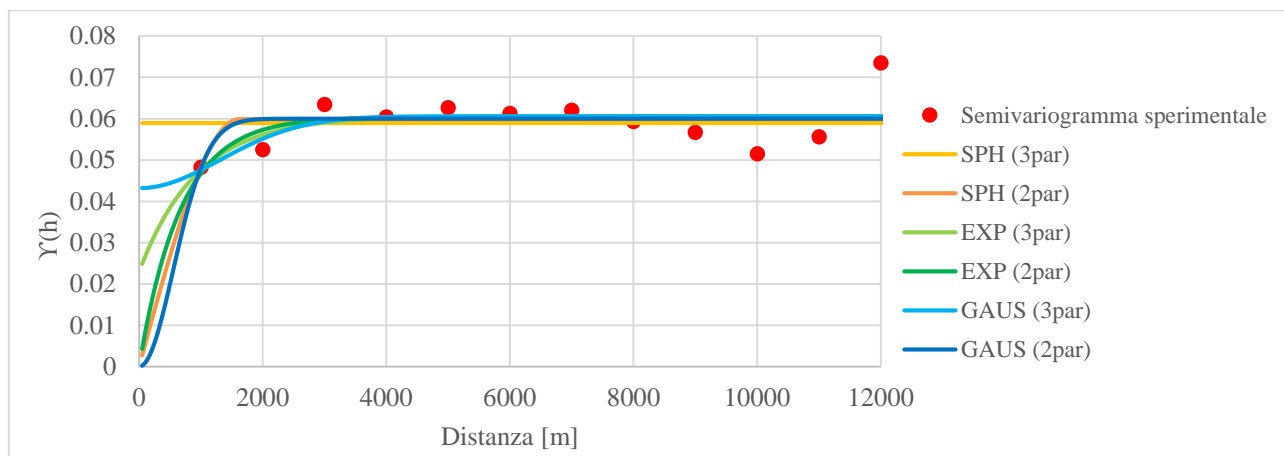


Figura 3-19: Variogramma sperimentale orizzontale e relativi modelli – Categoria 4

	<i>Sph3</i>	<i>Sph2</i>	<i>Exp3</i>	<i>Exp2</i>	<i>Gaus3</i>	<i>Gaus2</i>
Nugget	0.00	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00
Sill	0.06	0.06	0.04	0.06	0.02	0.06
Range [m]	1.04	1628.90	2823.10	2022.70	3218.00	1363.20

Tabella 3-16: Parametri dei modelli di semivariogramma orizzontale – Categoria 4

La scelta del modello di variogramma è stata effettuata considerando opportuni criteri di discriminazione dei modelli (vd *Appendice VIII*), (1) AIC [Akaike, 1974], (2) AICc [Hurvich and Tsai, 1989], (3) BIC [schwatsr, 1978],(4) KIC [Kashyap, 1982].

	<i>Modello</i>	<i>NLL</i>	<i>AIC</i>	<i>AICc</i>	<i>BIC</i>	<i>KIC</i>
Categoria 1 (VERTICALE)	Sph3	<b>-157.61</b>	<b>-197.08</b>	<b>-195.58</b>	<b>-195.09</b>	<b>-155.35</b>
	Sph2	-99.39	-140.86	-140.15	-139.86	-93.45
	Exp3	-153.70	-193.17	-191.67	-191.18	-151.44
	Exp2	-116.33	-157.80	-157.09	-156.80	-110.39
	Gaus3	-144.59	-184.06	-182.56	-182.07	-142.33
	Gaus2	-86.91	-128.38	-127.68	-127.39	-80.98
Categoria 1 (ORIZZONTALE)	Sph3	-165.40	-109.63	-106.63	-108.66	-90.60
	Sph2	-166.67	-112.89	-111.56	-112.41	-88.19
	Exp3	-165.57	-109.80	-106.80	-108.83	<b>-90.77</b>
	Exp2	<b>-166.84</b>	<b>-113.06</b>	<b>-111.73</b>	<b>-112.58</b>	-88.36
	Gaus3	-165.40	-109.63	-106.63	-108.66	-90.60
	Gaus2	-165.71	-111.44	-110.87	-112.23	-88.41

Tabella 3-17: Valori dei Model Validation Criteria – Categoria 1

	<i>Modello</i>	<i>NLL</i>	<i>AIC</i>	<i>AICc</i>	<i>BIC</i>	<i>KIC</i>
Categoria 2 (VERTICALE)	Sph3	-139.81	-178.68	-177.18	-176.69	-136.95
	Sph2	-105.28	-146.15	-145.44	-145.15	-98.74
	Exp3	<b>-146.10</b>	<b>-184.97</b>	<b>-183.47</b>	<b>-182.98</b>	<b>-143.24</b>
	Exp2	-122.78	-163.64	-162.94	-162.65	-116.24
	Gaus3	-131.84	-170.71	-169.21	-168.71	-128.97
	Gaus2	-100.84	-141.70	-141.00	-140.71	-94.30
Categoria 2 (ORIZZONTALE)	Sph3	-178.25	-121.49	-118.49	-120.52	-102.46
	Sph2	-179.51	-124.75	-123.42	-124.27	-100.05
	Exp3	-185.89	-129.13	-126.13	-128.16	<b>-110.10</b>
	Exp2	<b>-187.15</b>	<b>-132.39</b>	<b>-131.06</b>	<b>-131.91</b>	-107.69
	Gaus3	-185.87	-129.11	-126.11	-128.14	-110.08
	Gaus2	-187.13	-132.37	-131.04	-131.88	-107.67

Tabella 3-18: Valori di Model Validation Criteria – Categoria 2

	<i>Modello</i>	<i>NLL</i>	<i>AIC</i>	<i>AICc</i>	<i>BIC</i>	<i>KIC</i>
Categoria 3 (VERTICALE)	Sph3	-155.36	-192.52	-191.02	-190.53	-150.79
	Sph2	-118.74	-157.90	-157.19	-156.90	-110.49
	Exp3	<b>-157.70</b>	<b>-194.86</b>	<b>-193.36</b>	<b>-192.87</b>	<b>-153.13</b>
	Exp2	-130.41	-169.57	-168.86	-168.57	-122.16
	Gaus3	-147.02	-184.18	-182.68	-182.19	-142.45
	Gaus2	-116.49	-155.65	-154.95	-154.66	-108.25
Categoria 3 (ORIZZONTALE)	Sph3	-126.00	-140.90	-138.50	-139.62	-116.20
	Sph2	-127.22	-144.12	-143.03	-143.48	-113.74
	Exp3	<b>-131.29</b>	<b>-146.19</b>	<b>-143.79</b>	<b>-144.91</b>	<b>-121.49</b>
	Exp2	-127.71	-144.61	-143.52	-143.97	-114.23
	Gaus3	-126.00	-140.90	-138.50	-139.62	-116.20
	Gaus2	-127.22	-144.12	-143.03	-143.48	-113.74

Tabella 3-19: Valori di Model Validation Criteria – Categoria 3

	<i>Modello</i>	<i>NLL</i>	<i>AIC</i>	<i>AICc</i>	<i>BIC</i>	<i>KIC</i>
Categoria 4 (VERTICALE)	Sph3	-159.09	-182.42	-180.58	-180.76	-149.21
	Sph2	-159.06	-184.39	-183.54	-183.56	-145.50
	Exp3	-160.26	-183.59	-181.74	-181.92	<b>-150.37</b>
	Exp2	<b>-161.28</b>	<b>-186.62</b>	<b>-185.76</b>	<b>-185.78</b>	-147.73
	Gaus3	-159.02	-182.36	-180.51	-180.69	-149.14
	Gaus2	-156.00	-181.34	-180.48	-180.50	-142.44
Categoria 4 (ORIZZONTALE)	Sph3	-105.43	-113.79	-110.79	-112.82	-94.77
	Sph2	-110.22	-120.58	-119.25	-120.10	-95.88
	Exp3	-110.15	-118.51	-115.51	-117.54	-99.48
	Exp2	-111.22	-121.58	<b>-120.25</b>	<b>-121.10</b>	-96.88
	Gaus3	<b>-110.49</b>	-118.84	-115.84	-117.87	<b>-99.82</b>
	Gaus2	-110.27	<b>-120.63</b>	-119.29	-120.14	-95.92

Tabella 3-20: Valori di Model Validation Criteria – Categoria 4

Sulla base dei risultati in Tabella 3-17-3-20 si sono scelti i seguenti modelli come riportato nella Tabella 3-21:

Modello	Categoria 1		Categoria 2		Categoria 3		Categoria 4	
	Orizzontale Sph	Verticale Exp	Orizzontale Exp	Verticale Exp	Orizzontale Exp	Verticale Exp	Orizzontale Exp	Verticale Gaus
Nugget	0	0.08	0.01	0.09	0.10	0.07	0	0
Sill	0.18	0.25	0.24	0.17	0.04	0.13	0.06	0.04
Range [m]	551.62	81.80	984.08	101.02	1241.90	323.87	2022.70	23.38

Tabella 3-21: Parametri dei modelli di semivariogramma adottati

### 3.3.4 Confronto delle ricostruzioni litostratigrafiche

Una volta stimati i parametri dei differenti modelli di semivariogramma si è ricostruita la distribuzione spaziale probabilistica dei quattro litotipi, utilizzando la subroutine *kt3d* di *GSLIB* [Deutsch & Journel, 1998].

Discretizzato il dominio di modellazione (vd Paragrafo 4.2) sono state applicate le procedure riportate nei Paragrafi 3.3.1 e 3.3.2 per ricavare il campo finale di distribuzione dei geomateriali per entrambi i modelli indagati

I risultati ottenuti sono stati confrontati con sezioni geologiche disponibili.

Nelle Figure 3-21-3-23 si riporta la probabilità che siano presenti rispettivamente le categorie 1-4 lungo le sezioni A-A' e B-B' evidenziate in Figura 3-20.

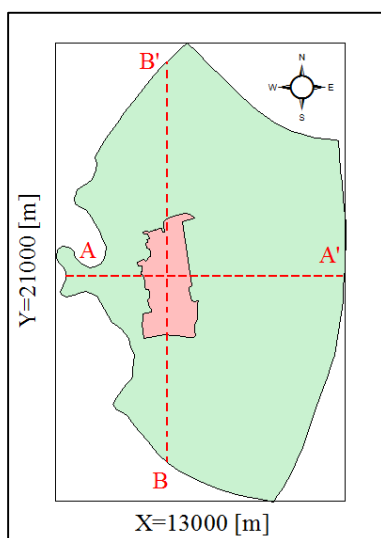
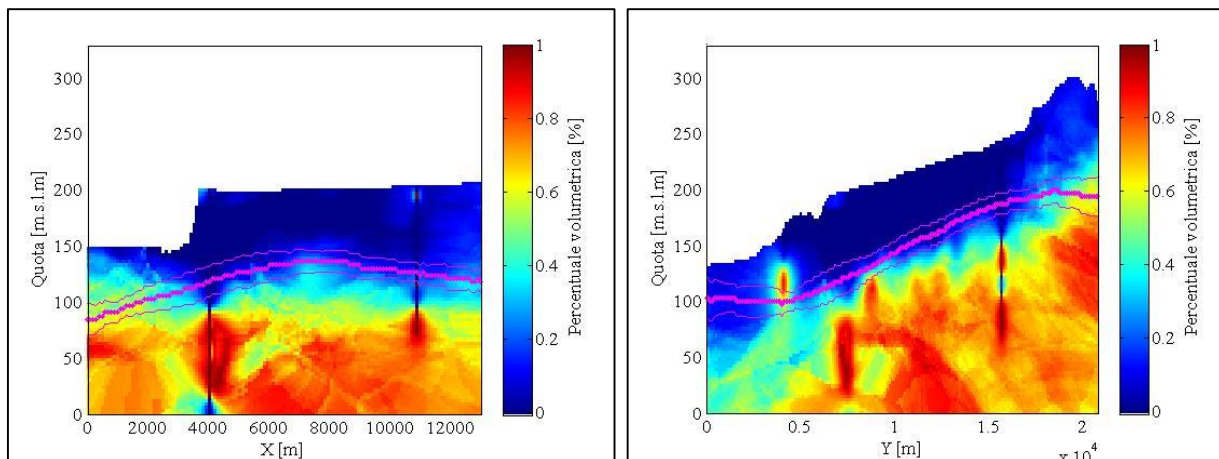
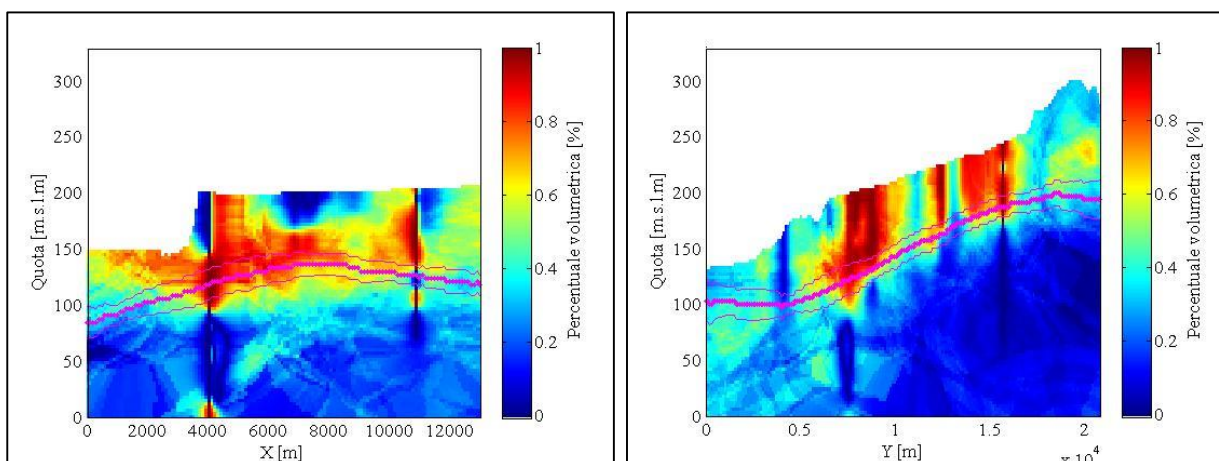


Figura 3-20: Sezioni stratigrafiche del dominio

Nelle *Figure 3-21-3-23* viene anche riportata (in magenta) la ricostruzione della base dell'acquifero superficiale calcolata al *Paragrafo 3.2* ed il relativo intervallo di confidenza di ampiezza pari a  $\pm$  la radice della varianza di kriging.



*Figura 3-21: Probabilità che sia presente la categoria 1 (argilla-limo) sezione A-A' (a) e B-B' (b)*



*Figura 3-22: Probabilità che sia presente la categoria 2 (ghiaia) sezione A-A' (a) e B-B' (b)*

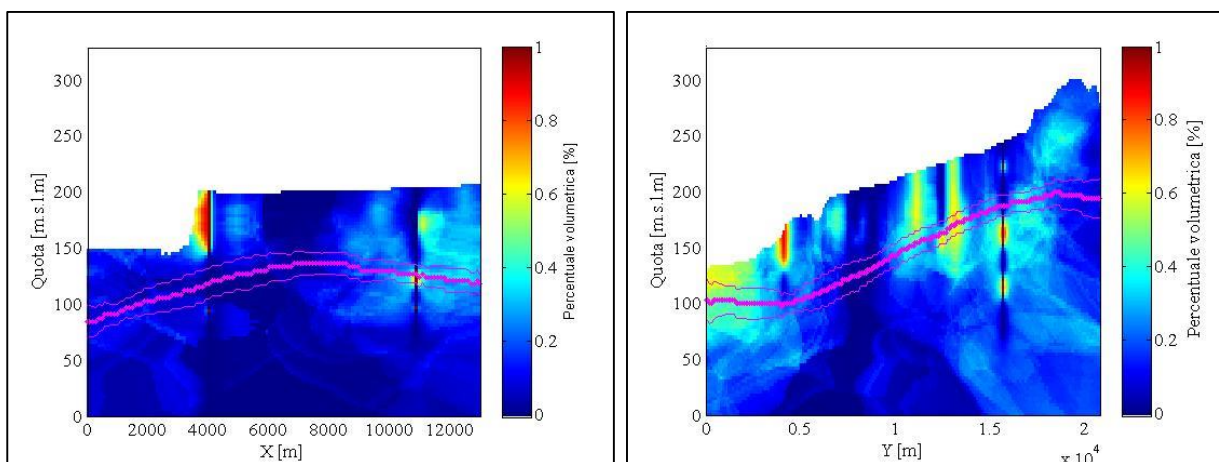


Figura 3-23: Probabilità che sia presente la categoria 3 (sabbia) sezione A-A' (a) e B-B' (b)

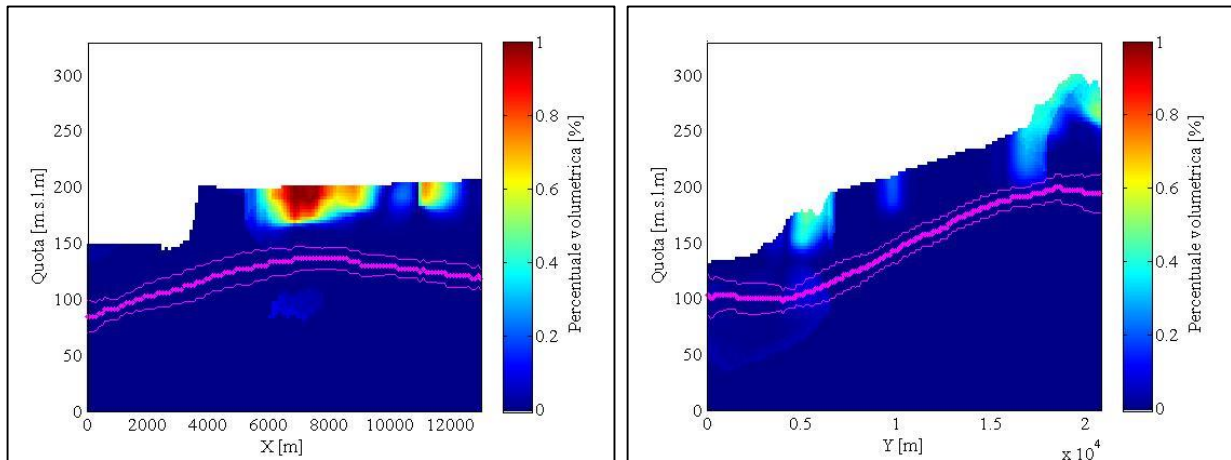


Figura 3-24: Probabilità che sia presente la categoria 4 (terreno) sezione A-A' (a) e B-B' (b)

Come è possibile osservare dalle figure sopra riportate la percentuale più consistente di argilla-limo (categoria 1) si trova al disotto della base dell'acquifero (vd *Paragrafo 3.2*).

Per quanto riguarda le restanti Categorie queste sono tendenzialmente disposte al disopra della linea di separazione a contatto con la superficie di piano campagna, se non per alcune lenti di materiale posizionate a profondità più elevate.

Nella loro globalità le *Figure 3-23-3-25* sono coerenti con l'inquadramento geologico e litologico della zona. La bassa eterogeneità dell'acquifero superficiale costituito per la maggior parte da uno strato consistente di ghiaie e sabbie del Diluvium Recente (vd *Paragrafo 1.3*) è in definitiva ben rappresentato dalla somma delle Categoria 2, 3 e 4 (vd *Figura 3-22 a e b*).

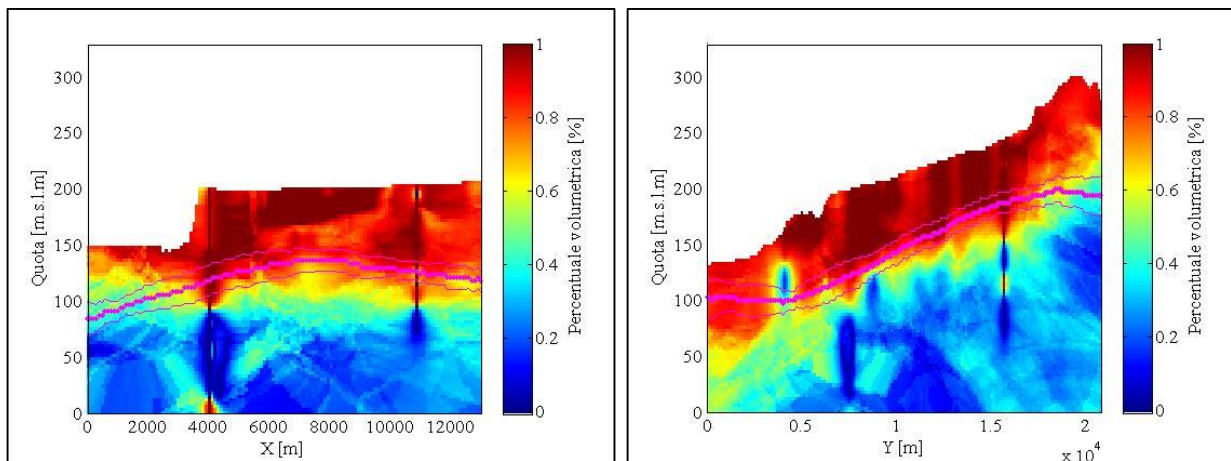
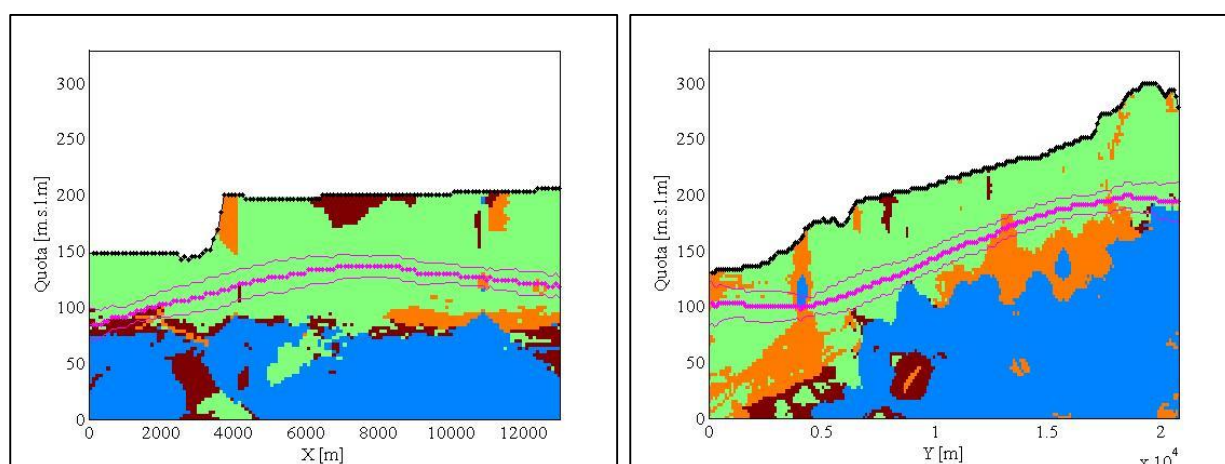


Tabella 3-22: Probabilità che siano presenti le categorie 2-3-4 (ghiaia, sabbia e terreno) sezione A-A' (a) e B-B' (b)

In *Figura 3-26a* e *3-26b*, si riportano le ricostruzioni litostratigrafiche ottenute con il metodo a Mezzo composito lungo le sezioni A-A' e B-B'.



*Figura 3-25: Ricostruzione litostratigrafica a mezzo composito sezione A-A' (a) e B-B' (b) Categoria 2 (verde), Categoria 1 (blu), Categoria 3 (Arancione), Categoria 4 (Marrone).*

Confrontando graficamente i risultati del modello a mezzo composito con quelli ottenuti dal modello a continui multipli (vd *Figure 3-23-3-25*) si osservano alcune discrepanze come mostrano i numerosi strati di Categoria 4 presenti ad elevate profondità in *Figura 3-24*.

La problematica riscontrata è legata alla sequenzialità con la quale si rielaborano in maniera indipendente i campi di Kriging di ciascuna categoria per la ricostruzione del mezzo composito. Infatti, operando in cascata (2-1-3-4 nel nostro caso), ed utilizzando la procedura di cut-off descritta in *Paragrafo 3.3.1*, alle celle caratterizzate da bassa probabilità per le categorie 1-3 viene automaticamente assegnata la categoria 4.

Si nota che, l'ordine delle categorie nella procedura implementata non influenza la ricostruzione finale (mantenendo la categoria 4 come l'ultima). A titolo di esempio, in *Figura 3-26* si riporta la ricostruzione ottenuta utilizzando la sequenza Categoria 1, Categoria 2, Categoria 3, Categoria 4.



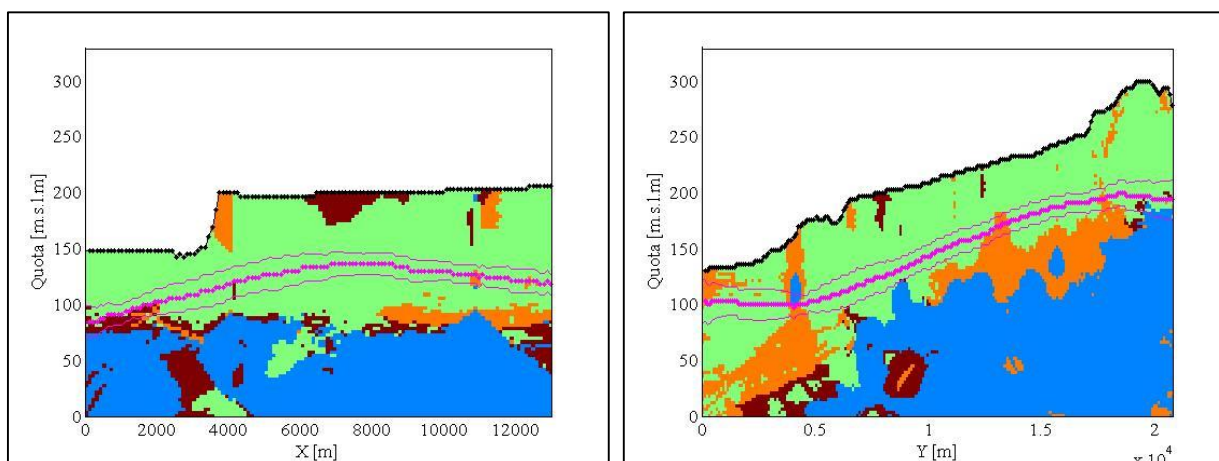


Figura 3-26: Ricostruzione litostratigrafica a mezzo composito sezione A-A' (a) e B-B' (b) e relativo ordine di assegnazione – Categoria 1 (blu), Categoria 2 (verde), Categoria 3 (Arancione), Categoria 4 (Marrone).

Nel complesso, la ricostruzione ottenuta in *Figura 3-25* e *3-26* risulta coerente con quanto osservabile nelle sezioni stratigrafiche riportate in *Figura 3-28-3-29* (fonte: SEA.spa). La base dell'acquifero superficiale, definita dalle categorie 1 e 2, si trova mediamente a circa 120 m.s.l.m dal p.c (vd *Tabella 3-23*).

	<i>Media</i>	<i>Dev. St.</i>
Tetto [m] rispetto al p.c	88.36	10.96

Tabella 3-23: Quota tetto acquitardo con ricostruzione litostratigrafica a mezzo composito

Ulteriori confronti sono stati eseguiti con le restanti sezioni stratigrafiche di *Figura 3-27* riportate in *Allegato C*.

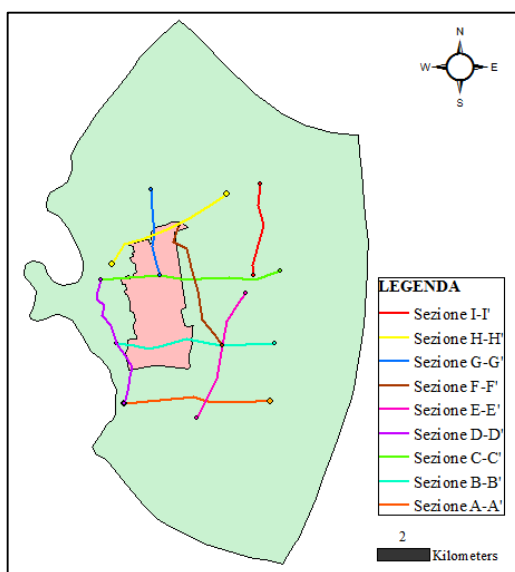


Figura 3-27: Sezioni stratigrafiche SEA.spa

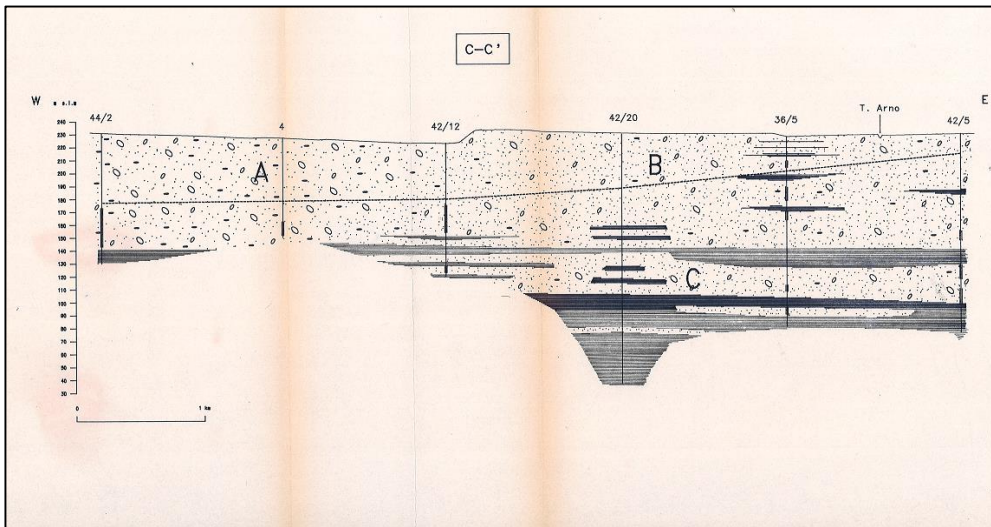


Figura 3-28: Sezione stratigrafica C-C' - SEA.spa

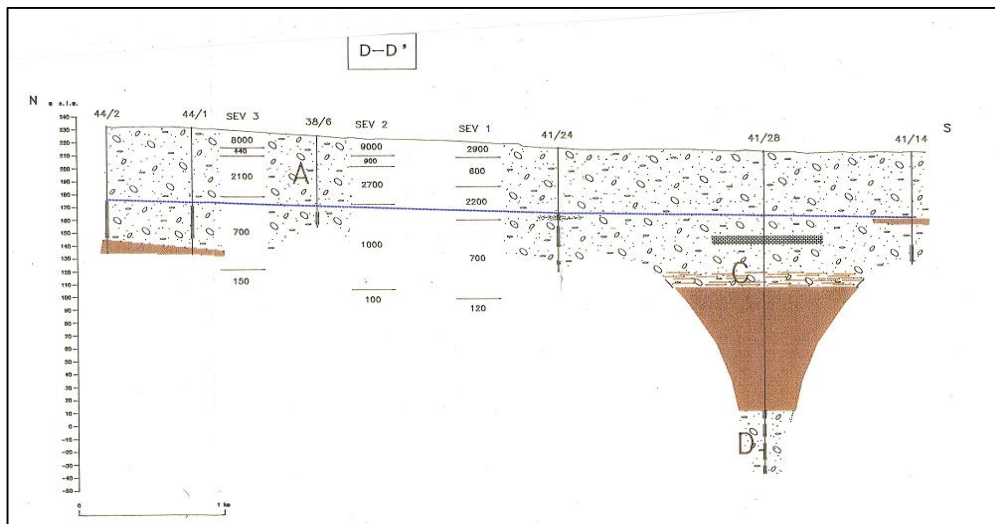


Figura 3-29: Sezione stratigrafica D-D' - SEA.spa





## 4 Modello numerico di flusso

Il modello matematico del flusso sotterraneo nell'area di indagine è stato realizzato con l'ausilio del codice alle differenze finite sviluppato dal U.S. Geological Survey denominato MODFLOW [McDonald, M. G. e Harbaugh, A. W., 1988]. Il codice utilizzato permette di risolvere il flusso sotterraneo in acquiferi tri-dimensionali eterogenei ed anisotropi. Ai fini della presente indagine si è utilizzata la versione più aggiornata attualmente disponibile (MODFLOW2005).

Il moto tri-dimensionale non stazionario dell'acqua sotterranea, in assenza di effetti di variazione di densità, è descritto dalla seguente equazione differenziale alle derivate parziali:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x(\bar{x}) \frac{\partial h(\bar{x}, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y(\bar{x}) \frac{\partial h(\bar{x}, t)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z(\bar{x}) \frac{\partial h(\bar{x}, t)}{\partial z} \right) + f(\bar{x}, t) = S(\bar{x}) \frac{\partial h(\bar{x}, t)}{\partial t} \quad (4.1)$$

dove:

$\bar{x} = [x, y, z]$  è il vettore posizione nello spazio tridimensionale;

$t$  è il tempo;

$K_x(\bar{x}), K_y(\bar{x}), K_z(\bar{x})$  sono le conduttività idrauliche (variabili con la posizione  $\bar{x}$ ) rispettivamente lungo gli assi  $x, y$  e  $z$ , paralleli agli assi principali di anisotropia del tensore della conduttività idraulica;

$h(\bar{x}, t)$  è il carico idraulico;

$f(\bar{x}, t)$  è un termine di sorgente, definito in termini di flusso per unità di volume in ingresso (positivo) o in uscita (negativo) dal sistema considerato (pozzi, ricariche, evapotraspirazione, drenaggi, fiumi, ecc), anch'esso in generale funzione dello spazio e del tempo;

$S(\bar{x})$  è il coefficiente di immagazzinamento specifico.

L'equazione (4.1), corredata dalle condizioni al contorno (di flusso e/o carico) e dalle condizioni iniziali, fornisce la rappresentazione matematica del processo di flusso in acquiferi tridimensionali eterogenei ed anisotropi.

Salvo che per alcuni sistemi estremamente semplici (come ad esempio acquiferi omogenei, bi-dimensionali, in assenza di termini forzanti concentrati o distribuiti), soluzioni analitiche dell'equazione (4.1) sono raramente possibili. Al contrario, diversi schemi di integrazione numerica possono essere utilizzati per risolvere la (4.1).

Utilizzando un metodo alle differenze finite il sistema continuo descritto dall'equazione (4.1) è sostituito da un sistema discreto, costituito da un numero finito di punti che formano una griglia spazio-temporale. I valori della grandezza di interesse (ad esempio il carico idraulico) sono calcolati in corrispondenza di tali nodi di griglia. I valori nodali calcolati costituiscono una approssimazione della distribuzione del carico idraulico. Si rimanda all'*Appendice VIII* per una visione di dettaglio del codice.

MODFLOW2005 modella il flusso sotterraneo attraverso un approccio alle differenze finite centrato in cui ogni grandezza (in ingresso e/o in uscita) è riferita al nodo centrale della cella. Il codice utilizzato consente di definire le diverse unità stratigrafiche che compongono l'acquifero come confinate, non confinate o come combinazione di entrambi le condizioni.

#### 4.1 Griglia di calcolo

Analizzate le caratteristiche di flusso dell'acquifero superficiale indagate al *Capitolo 2*, si è discretizzato il dominio ruotando la griglia di calcolo di  $30^\circ$  in senso orario rispetto alla direzione Nord orientando la griglia di calcolo lungo la direzione del flusso medio.

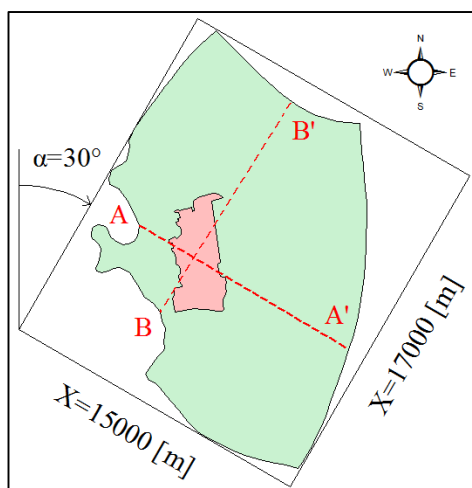


Figura 4-1: Griglia di calcolo del modello di flusso

La griglia di calcolo tridimensionale è costituita da 150 righe, 170 colonne e 110 strati per un totale di 2.805.000 celle aventi ciascuna dimensioni pari a:  $100\text{ m} \times 100\text{ m} \times 3\text{ m}$ . Il numero di celle attive è pari 518.192 (all'incirca il 18% dell'intero volume).

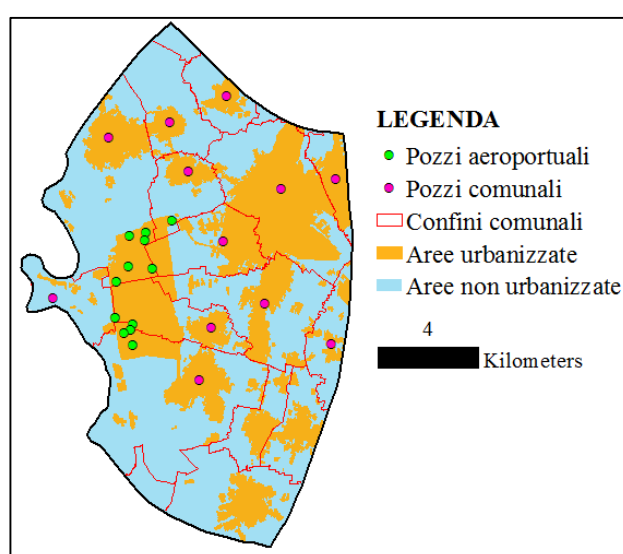
#### 4.2 Distribuzione della conduttività idraulica

Le simulazioni di flusso sono state inizialmente condotte ipotizzando che l'acquifero sia costituito da un unico mezzo poroso omogeneo ed isotropo in condizioni di moto stazionario. Il modello è stato calibrato utilizzando i dati di carico analizzati nel *Capitolo 2* relativi all'anno 2015. I dettagli della calibrazione sono riportati in *Appendice IX*.

### 4.3 Termini di ricarica e prelievo

La ricarica superficiale dell'acquifero è stata valutata sulla base dell'analisi del regime pluviometrico riportato nel *Paragrafo 2.1*, da cui si è dedotta una pioggia media mensile di circa 1300 mm/anno nell'area aeroportuale per l'anno 2014.

Per le finalità della tesi, si è deciso di imporre per ciascun comune un'unica estrazione ubicata nell'area avente maggior densità urbanizzata (vd *Figura 4-2*), associando rispettivamente il volume totale emunto dell'ultimo anno indagato (2015) (vd *Tabella 2-11*). Per l'area aeroportuale sono stati introdotti singolarmente tutti i pozzi riportati in *Figura 2-29*.



*Figura 4-2: Localizzazione pozzi di emungimento implementati in MODFLOW*

## 4.4 Simulazioni di flusso con mezzo omogeneo ed isotropo

### 4.4.1 Simulazione 1

Il primo modello di flusso analizzato considera una pioggia media di 1300 mm/anno con coefficiente di infiltrazione del 15% imponendo tre condizioni di carico del fiume Ticino.

Dalle elaborazioni effettuate al *Paragrafo 2.2* è stato stimato il profilo di moto uniforme del corso d'acqua delimitante il confine Ovest del modello di flusso in tre differenti assetti: fondo alveo a cui è associata una portata nulla, profilo A con portata media annua e profilo B corrispondente ad un evento di piena duecentennale.

In *Figura 4-3* è riportata l'andamento piezometrico ottenuto per tutta l'area nelle tre configurazioni di carico e in *Figura 4-3 (a) e (b)* i medesimi risultati nelle due sezioni stratigrafiche.

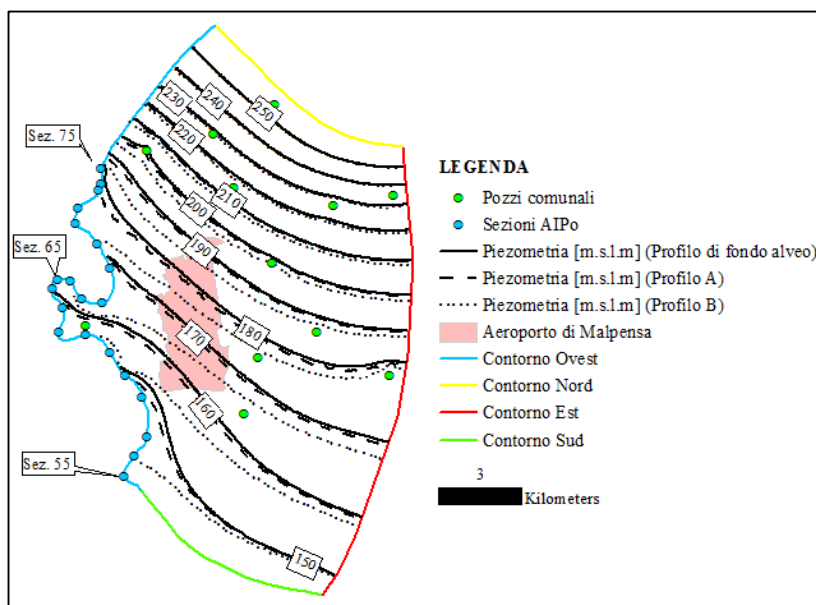


Figura 4-3: Andamento freaticometrico nelle tre configurazioni di carico del fiume Ticino (profilo di fondo alveo, A e B)

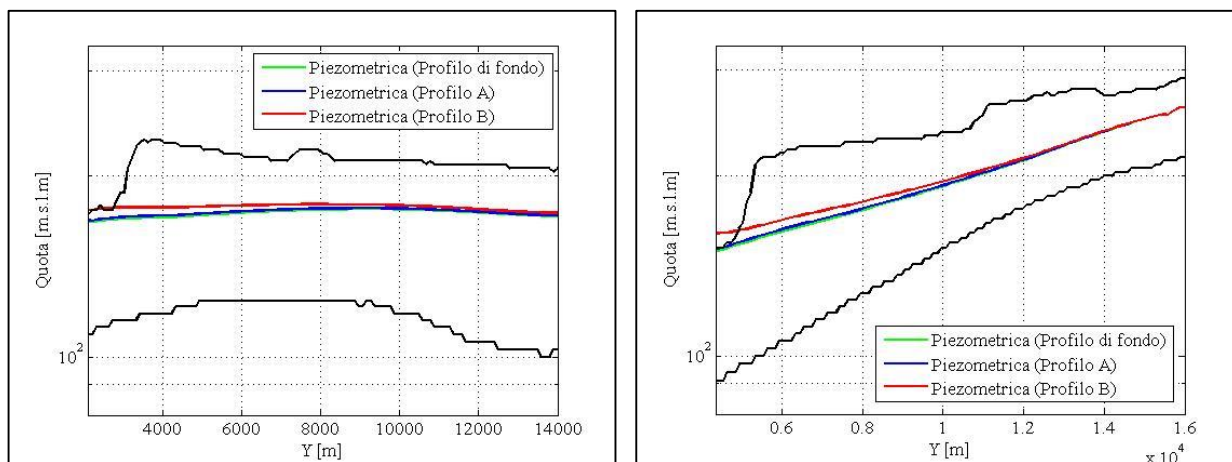


Figura 4-4: Andamento freaticometrico nelle tre configurazioni di carico del fiume Ticino nella sezione A-A' (a) e B-B' (b)

Osservando le figure sopra riportate, risulta evidente come il regime fluviale del corso d'acqua adiacente all'aeroporto non tenda a modificare significativamente gli andamenti piezometrici nel caso di portata nulla e media annua.

Note le derivazioni e la natura golenale del Ticino a partire dalla sezione AIPO n.75 è plausibile pensare che la portata di DMV che vi scorre a valle della traversa del Panperduto generi tiranti poco consistenti (vd. *Figura 2-18*) e quindi condizioni di carico di poco superiori al caso di fondo alveo.

L'applicazione della condizione al contorno associato ad un profilo di moto uniforme con portata duecentennale, genera livelli freaticometrici più distaccati dai precedenti, a partire da 200 [m.s.l.m] fino alla condizione di carico imposta di 145 [m.s.l.m] a Sud del dominio.

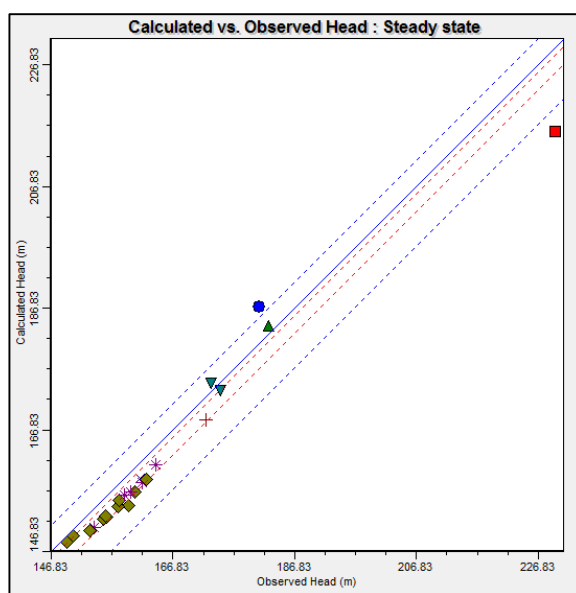


Figura 4-5: Diagramma di calibrazione di MODFLOW (Profilo A)

<i>Num. Punti</i>	23	<i>Residuo massimo [m]</i>	-13.745
<i>Errore st. della Stima [m]</i>	0.709	<i>Residuo minimo [m]</i>	-0.908
<i>RMS [m]</i>	4.285	<i>Residuo medio [m]</i>	-2.5
<i>RMS normalizzata [%]</i>	5.344	<i>Residuo medio ass. [m]</i>	3.483
<i>Coefficiente di correlazione [-]</i>	0.980		

Tabella 4-1: Risultati di calibrazione (Profilo A)

La conduttività stimata per il modello in esame (vd *Tabella 4-1*) risulta coerente con la natura litologica dell'acquifero (ghiaiosa-sabbiosa). Nonostante l'elevato residuo di calibrazione riportato in *Tabella 4-1*, la preliminarità e semplicità del modello di flusso stazionario implementato risulta accettabile. I gradienti e la direzione di flusso sono infatti simili a quelli isofreatimetriche ricostruite al *Paragrafo 2.2.3*.

$$\frac{\text{Conduttività}}{K_x = K_y = K_z \text{ [m/s]}} \quad 3.9516E-4$$

Tabella 4-2: Conduttività idraulica del mezzo omogeneo

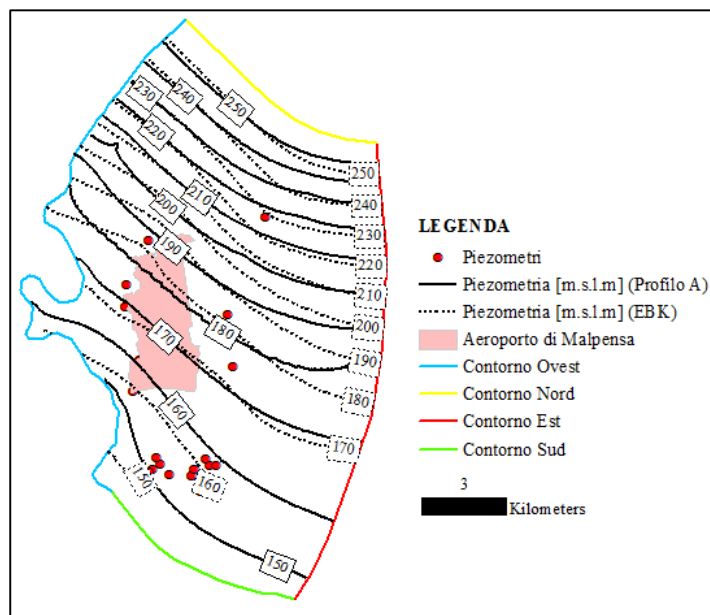


Figura 4-6: Andamenti freaticometrici di modello (profilo A) a confronto con le ricostruzioni effettuate al Paragrafo 2.2.3

Un importante termine di controllo, per verificare la veridicità dei risultati ottenuti, è il bilancio idrogeologico di massa netto all'interno del bacino riportato in Figura 4-7 e nelle Tabelle 4-3, 4-4 e 4-5 per le diverse condizioni al contorno utilizzate.

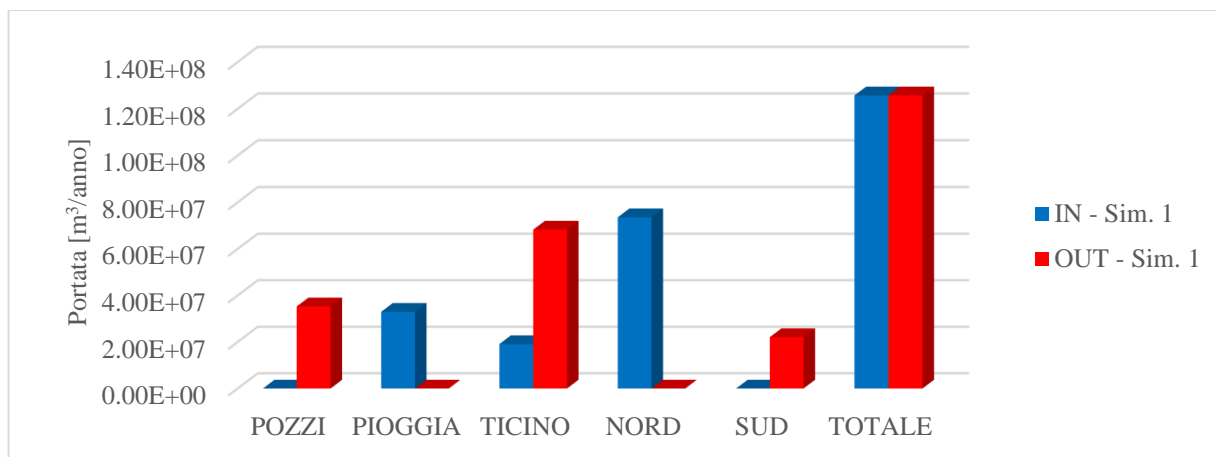


Figura 4-7: Bilancio di massa del modello di flusso (Profilo A)

	POZZI	PIOGGIA	TICINO	NORD	SUD	TOTALE
IN	0	3.30E+07	1.89E+07	7.40E+07	0	1.26E+08
OUT	3.53E+07	0	6.98E+07	0	2.09E+07	1.26E+08

Tabella 4-3: Bilancio di massa del modello di flusso [m³/anno] (Profilo di fondo alveo)

	POZZI	PIOGGIA	TICINO	NORD	SUD	TOTALE
IN	0	3.30E+07	1.91E+07	7.36E+07	0	1.26E+08
OUT	3.53E+07	0	6.83E+07	0	2.21E+07	1.26E+08

Tabella 4-4: Bilancio di massa del modello di flusso [m<sup>3</sup>/anno] (Profilo A)

	POZZI	PIOGGIA	TICINO	NORD	SUD	TOTALE
IN	0	3.30E+07	2.12E+07	7.25E+07	0	1.27E+08
OUT	3.53E+07	0	6.33E+07	0	2.81E+07	1.27E+08

Tabella 4-5: Bilancio di massa del modello di flusso [m<sup>3</sup>/anno] (Profilo B)

Come è possibile osservare dalle tabelle sopra riportate il Ticino esercita per lo più un'azione drenante nei confronti della falda con un tasso decrescente all'aumentare della condizione di carico. Il valore di drenaggio medio ottenuto è di, circa 4.74E7 m<sup>3</sup>/anno.

#### 4.4.2 Simulazioni 2

Il secondo modello di flusso analizzato considera la condizione al contorno esercitata dal fiume Ticino come ricarica negativa. Tale approccio tende a ridurre l'effetto delle condizioni al contorno (impose sul Ticino) sui livelli di falda, rispetto ad una condizione di carico imposto.

Si è eseguita un'analisi di sensitività variano il volume totale drenato dal Ticino come: 0 mm/anno, 3.61E5 m<sup>3</sup>/anno (corrispondenti ad una ricarica negativa pari a -100 mm/anno), 3.61E6 m<sup>3</sup>/anno (corrispondenti ad una ricarica negativa pari a -1,000 mm/anno) e 4.59E7 m<sup>3</sup>/anno (corrispondenti ad una ricarica negativa pari a -15,000 mm/anno).

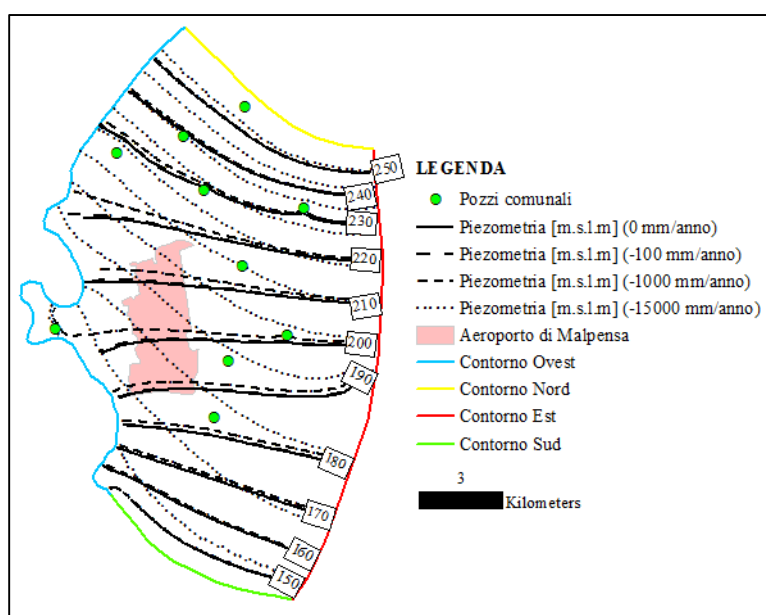


Figura 4-8: Andamenti freaticimetrici di modello a confronto con i differenti valori di ricarica



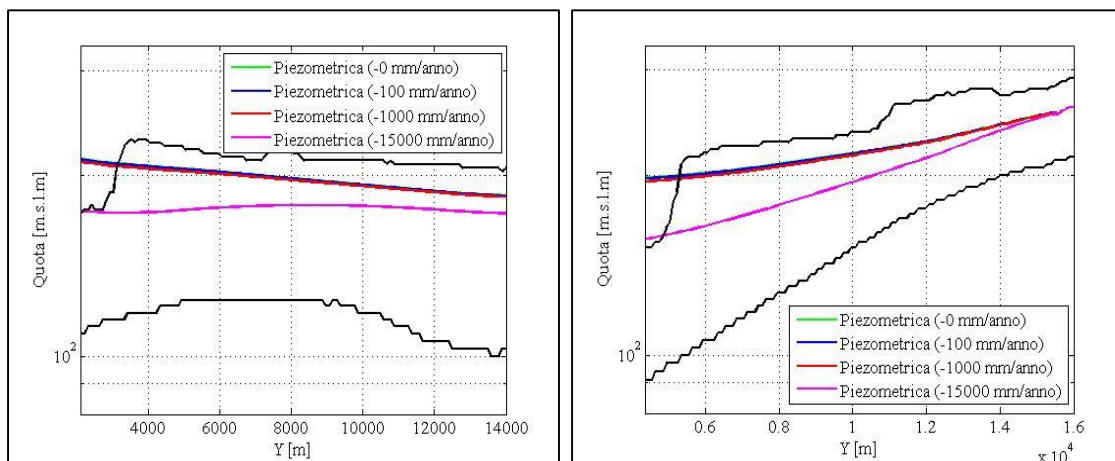


Figura 4-9: Andamento freaticometrico nelle quattro condizioni di ricarica del fiume Ticino nella sezione A-A' (a) e B-B' (b)

Dai risultati ottenuto in Figura 4-8-4-9 e dai residui di calibrazione (vd Tabella 4-6) emerge che una ricarica di -15,000 mm/anno sia compatibile con i risultati sperimentali e analoga alla Simulazione 1 (Profilo A).

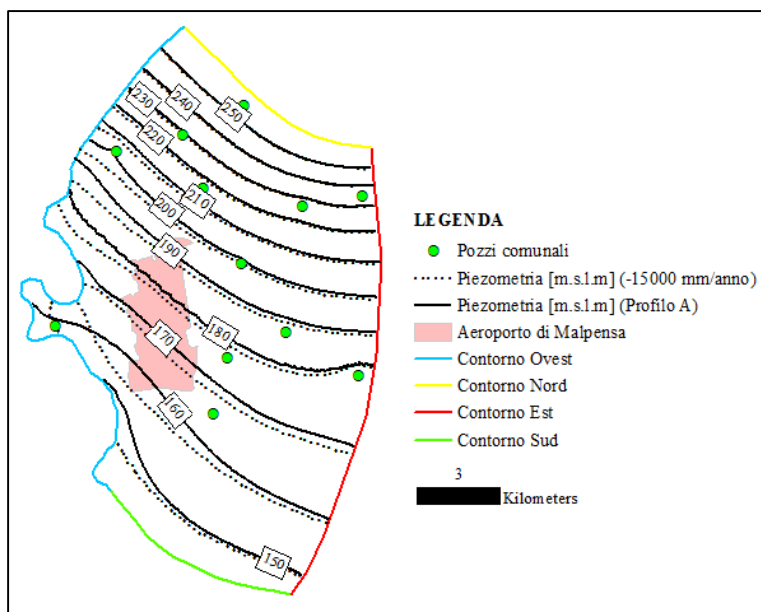


Figura 4-10: Andamenti freaticometrici di simulazione 1 (Profilo A) e 2 (-15000 mm/anno)

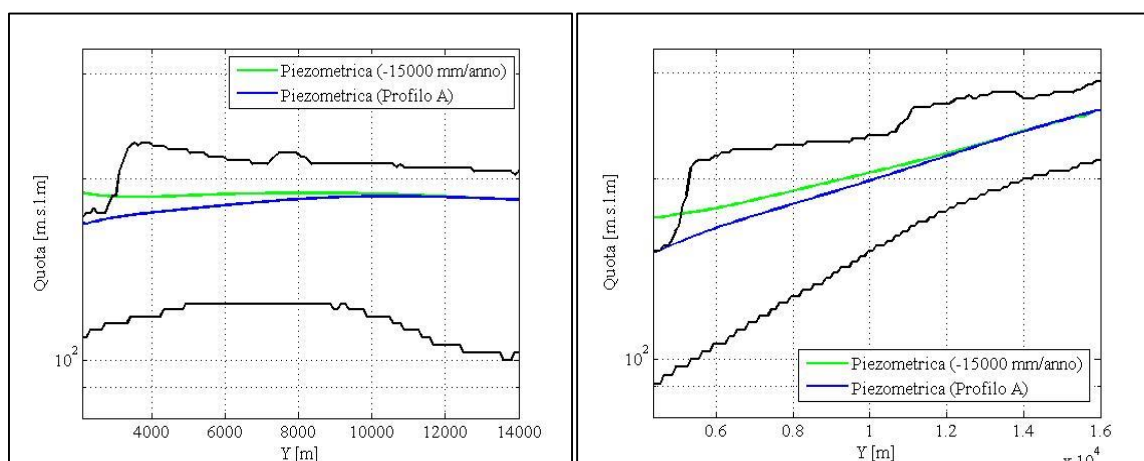


Figura 4-11: Andamenti freaticometrici di simulazione 1 (Profilo A) e 2 (-15000mm/anno) nelle sezioni A-A'(a) e B-B'(b)

Tale risultato è difatti analogo al tasso di drenaggio stimato nella *Simulazione 1* rapportato all'area lungo la quale si è imposta la condizione al contorno di carico.

Num. Punti	23
Errore st. della Stima [m]	0.761
RMS [m]	3.689
RMS normalizzata [%]	4.601
Coefficiente di correlazione [-]	0.976

Residuo massimo [m]	-12.978
Residuo minimo [m]	0.043
Residuo medio [m]	-0.924
Residuo medio ass. [m]	2.382

Tabella 4-6: Risultati di calibrazione per una ricarica del Ticino di -15000 mm/anno

Si riporta per il caso in oggetto, il bilancio di massa effettuato lungo i contorni nei quali si sono imposte le principali condizioni al contorno (Nord, Sud, Ovest A) trascurando i risultati associati a ricariche minori poiché influenti.

	POZZI	PIOGGIA	TICINO	NORD	SUD	TOTALE
IN	0	3.27E+07	0	7.25E+07	0	1.06E+08
OUT	3.53E+07	0	4.59E+07	0	2.45E+07	1.06E+08

Tabella 4-7: Bilancio di massa [m<sup>3</sup>/anno] con ricarica -15000 mm/anno

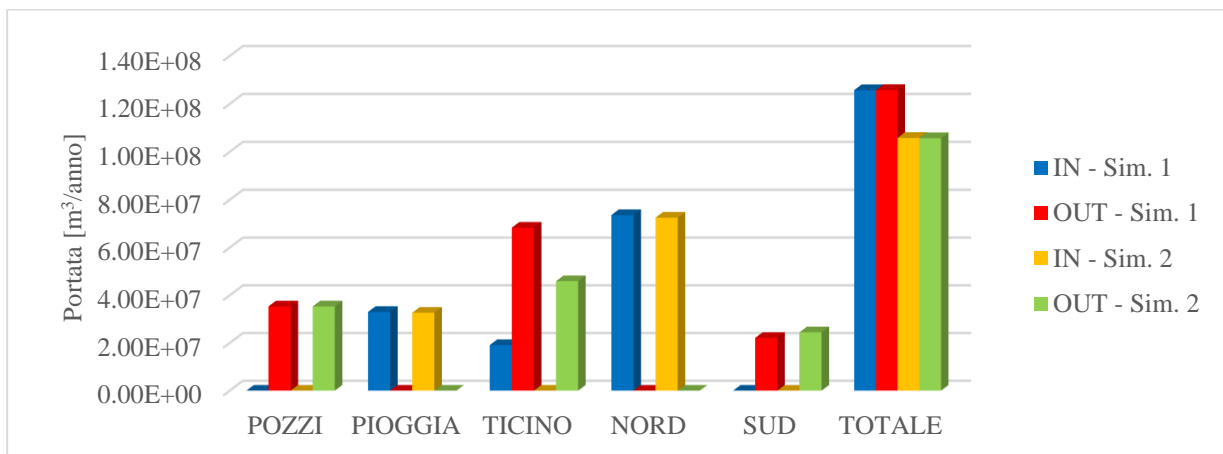


Figura 4-12: Confronto tra i bilanci di massa della Simulazione 1 (Profilo A) e Simulazione 2 (-150000 mm/anno)

Confrontando i risultati di *Tabella 4-12* con i medesimi di *Simulazione 1* (vd *Tabella 4-4* (Profilo A)) è possibile osservare che il tasso di drenaggio del fiume Ticino risulta lo stesso ma che nel caso di carico imposto il Ticino esercita una non trascurabile ricarica della falda dell'ordine di  $2.00E7 \text{ m}^3/\text{anno}$ .

## 5 Conclusioni

Le problematiche connesse con l'interazione tra la falda acquifera e le infrastrutture sono di notevole rilevanza e di grande attualità nell'ambito dell'Ingegneria Idraulica, in relazione alla crescente attenzione che viene posta alla sostenibilità nell'utilizzo della risorsa idrica. In quest'ambito, nel presente lavoro di tesi si è affrontato il problema della caratterizzazione e modellazione della falda acquifera in una zona fortemente urbanizzata. L'acquifero oggetto dello studio si colloca nell'area dell'aeroporto di Milano Malpensa.

Questa zona è, dal punto di vista socio-economico, altamente strategica per l'Italia ed il Sud Europa. L'obiettivo di questo studio consiste nel valutare come diverse concettualizzazioni del sito influiscano sui risultati forniti dalla modellazione del flusso idrico sotterraneo.

Il lavoro è stato organizzato nelle seguenti fasi:

- Ricerca di dati litostratigrafici, piezometrici, pluviometrici e idrometrici presso enti territoriali;
- Organizzazione dei dati in ambiente ArcGIS;
- Elaborazione dei dati con diverse aggregazioni spaziali-temporali;
- Sviluppo del modello concettuale dell'area in esame;
- Ricostruzione litostratigrafica utilizzando due modelli stocastici (modello composito e modello a continui multipli);
- Sviluppo del modello in ambiente MODFLOW2005.

La falda idrica nel bacino idrogeologico di interesse è soggetta ad una variabilità temporale e spaziale governata in larga parte dalla pluviometria. Le variazioni medie annue di pioggia riscontrate nel decennio 2005-2015 confrontate con gli andamenti freaticometrici dell'area d'indagine inducono una sostanziale fluttuazione dei carichi piezometrici della falda con un tempo di trasferimento compreso tra 8-12 mesi. I prelievi sono relativamente costanti nel periodo indagato. Si sono inoltre valutate le aree a maggior effetto antropico sulla falda.

Correlando i dati piezometrici dell'area indagata con i livelli del fiume Ticino si è osservato l'effetto sostanzialmente drenante del fiume. La massiccia presenza di derivazioni e sbarramenti lungo il corso dell'alveo condiziona il deflusso fluviale mantenendo per il tratto analizzato una portata media pari quella di DMV ed un livello debolmente variabile (escursioni massime di circa 2 m).

Analizzando le ricostruzioni isofreatimetriche medie annuali nel corso dell'ultimo decennio si osserva una direzione di flusso relativamente costante. La sovrapposizione di tali mappe ha permesso di individuare chiare condizioni al contorno stabili da utilizzare per la definizione del dominio del modello concettuale e numerico del sito.

---

Dai dati geologici e litostratigrafica, attraverso metodologie stocastiche si è stimata la posizione della base della falda superficiale situata ad una quota media di 160 m.s.l.m., il sottostante acquifero ed il suo spessore. La ricostruzione della distribuzione spaziale dei geomateriali nella zona di interesse è stata effettuata attraverso due modelli (1) mezzo composito, in cui ogni cella del dominio è occupata da un unico materiale (2) mezzo a continui multipli, in cui in ogni cella del dominio possono essere presenti una molteplicità di materiali sovrapposti. Entrambi i modelli hanno fornito risultati coerenti con i dati e le ricostruzioni stratigrafiche disponibili nell'area in esame.

Il modello di flusso sviluppato è stato calibrato sulla base di dati freaticometrici disponibili. L'obiettivo del modello di flusso sviluppato è quello di ottenere un strumento affidabile per analizzare gli effetti di alterazioni naturali (e.g. pluviometria, condizioni al contorno) ed antropiche (e.g. emungimenti, variazioni delle superfici impermeabili) sulla falda. In particolare si è studiato l'effetto del fiume Ticino, le cui condizioni sono altamente incerte, sul flusso sotterraneo. A questo scopo diversi modelli sono stati implementati variando le condizioni di carico o flusso imposte lungo l'asta fluviale.

Sviluppi futuri del lavoro includono lo sviluppo e l'utilizzo del modello implementato all'interno di un framework stocastico per (i) analisi di rischio legate a contaminazioni locali o diffuse (ii) ottimizzazione della risorsa idrica sotterranea per uno sviluppo sostenibile.

## Appendici

### I. Appendice I: Analisi in moto uniforme del fiume Ticino

Note le sezioni AIPo del fiume Ticino si è stimata per alcune di queste, ritenute rappresentative (vd *Figura I-1 – I-3*), la scabrezza con il metodo globale secondo Manning. Tale metodo permette di calcolare il coefficiente di scabrezza ( $k_s = 1/n$ ) di una sezione andando a sommare tra loro gli effetti di tutti i fattori che ostacolano la corrente.

$$n=(n_0+n_1+n_2+n_3+n_4) \cdot m_5 \quad (I.1)$$

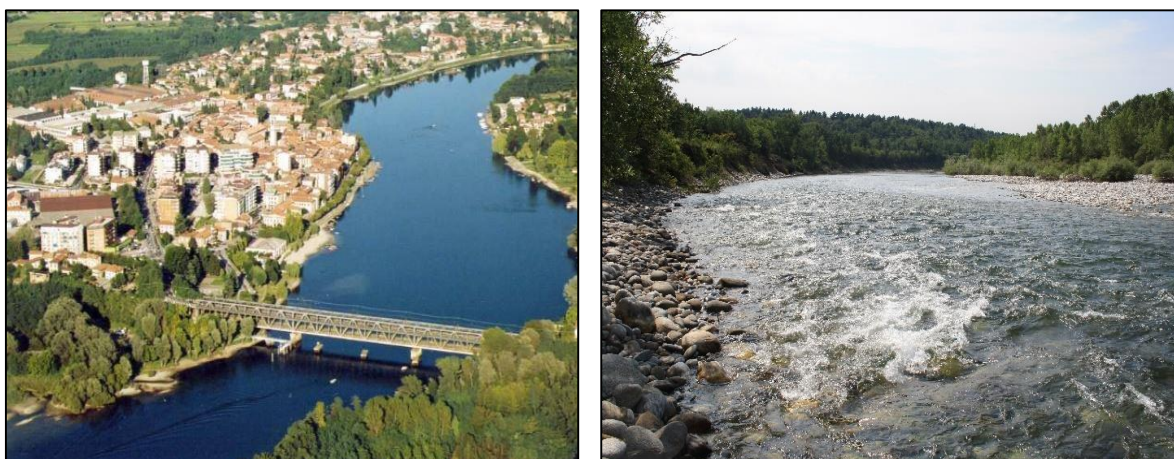
dove i parametri presenti sono legati a:

- $n_0$  : materiale d'alveo;
- $n_1$  : irregolarità della superficie;
- $n_2$  : grado di uniformità di forma e dimensione della sezione trasversale;
- $n_3$  : effetto delle ostruzioni;
- $n_4$  : effetto della vegetazione;
- $m_5$ : grado di sinuosità dell'alveo.

Tali valori sono desumibili dalla *Tabella I-1* dei coefficienti di scabrezza di Cowan:

Materiale	Terra	$n_0$	0.02
	Roccia		0.025
	Alluvionale grossolana		0.028
	Alluvionale fine		0.024
Irregolarità	Trascurabile	$n_1$	0
	Bassa		0.005
	Moderata		0.01
	Elevata		0.02
Variazione forma e dimensione	Graduale	$n_2$	0
	Variazione occasionale		0.005
	Variazione frequente		0.012
Effetto ostruzioni	Trascurabile	$n_3$	0
	Modesto		0.012
	Apprezzabile		0.025
	Elevato		0.05
Effetto vegetazione	Basso	$n_4$	0.007
	Medio		0.018
	Alto		0.040
	Molto alto		0.075
Sinuosità	Modesto	$m_5$	1.000
	Apprezzabile		1.150
	Elevato		1.300

*Tabella I-1: Coefficienti di Manning*



*Figura I-1: Sezioni AIPo n°82 e n°69*



*Figura I-2: Sezioni AIPo n°68 e n°60*



*Figura I-3: Sezione AIPo n°57*

Nonostante il metodo proposto permetta di soppesare singolarmente differenti caratteristiche dell'alveo, risulta grossolano e soggettivo. Nella Tabella, riportiamo i singoli contributi di



Manning (n) e il coefficiente di Strikler (ks) ottenuti per le sezioni in oggetto e relativi intervalli di validità.

Sezione	n0	n1	n2	n3	n4	m5	n	Ks	Sez. validità
82	0.025	0.005	0.005	0.012	0.007	1.000	0.054	18.52	84.1 - 74
69	0.025	0.02	0.012	0.012	0.007	1.000	0.076	13.16	73 - 69
68	0.025	0.01	0.012	0.012	0.007	1.300	0.0858	11.66	68 -62
60	0.028	0.02	0.012	0.012	0.007	1.000	0.079	12.66	61 - 58
57	0.028	0.005	0.005	0.012	0.007	1.000	0.057	17.54	57 - 55

Tabella I-2: Coefficienti di Manning

Il tracciamento dei profili di moto nelle differenti condizioni di flusso è avvenuta con l'applicazione di un modello monodimensionale in moto permanente; il tracciamento dei profili viene eseguito attraverso l'integrazione di un sistema di equazioni costituito da:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (I.2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -J \quad (I.3)$$

$$H = z + \frac{V^2}{2g} \quad (I.4)$$

Trovandoci in alveo naturale, la cadente J è stata determinata mediante la formulazione di Chezy:

$$J = \frac{V^2}{\chi^2 R} \quad (I.5)$$

in cui  $\chi$  rappresenta il coefficiente di resistenza al moto esprimibile secondo Manning come:

$$\chi = \frac{R^{1/6}}{n} \quad (I.6)$$

Nota le caratteristiche idrauliche del corso d'acqua, si è deciso di imporre come condizione di monte e valle una pendenza dell' 1‰. Si riporta in *Tabella I-3* i regimi fluviali imposti.

Sezione AIPo	Q [m <sup>3</sup> /s]	Sezione AIPo	Q [m <sup>3</sup> /s]
84.1 - 78	300	84.1 - 55	2000
77.1 - 74	230		
73 - 55	27		

Tabella I-3: Regimi di portate imposte per il profilo A (a) e B (b)



<i>Sezione AIPO</i>	<i>Fondo Alveo [m s.l.m]</i>	<i>Profilo A [m s.l.m]</i>	<i>Profilo B [m s.l.m]</i>	<i>Prograssiva [km]</i>	<i>Pendenza [-]</i>
84.1	185.54	193.43	198.01	28496	0
84	189.04	193.37	197.82	28.002	0.007085
83.1	188.78	193.22	197.56	27.339	-0.00039
83	189.46	193.15	197.43	27.083	0.002656
82	186.83	192.96	196.99	26.344	-0.00356
81.1	189.45	192.83	196.7	25.979	0.007178
81	191.14	192.73	196.59	25.872	0.015794
80.1	190.89	192.62	196.53	25.820	-0.00481
80	186.95	191.16	195.52	24.972	-0.00465
79.2	187.13	190.83	195.14	24.740	0.000776
79.1	186	189.7	193.77	23.864	-0.00129
79	185.57	188.64	192.49	22.945	-0.00047
78	184.8	187.02	191.01	21.904	-0.00074
77.1	182.9	186.24	190.37	21.462	-0.0043
77	181.42	184.66	188.65	20.373	-0.00136
76	181.16	183.33	188	19.993	-0.00068
75	177.45	182.82	186.81	19.172	-0.00452
74	179.89	181.92	184.35	18.548	0.00391
73	177.94	179.35	184.29	18.432	-0.01681
72	172.96	175.72	182.37	17.396	-0.00481
71	173.68	175.48	180.81	16.676	0.001
70	172.36	173.56	178.09	15.500	-0.00112
69	167.65	168.32	175.18	14.438	-0.00444
68	165.34	167.14	174.7	14.064	-0.00618
67	164.2	164.87	172.2	12.325	-0.00066
66	161.47	163.86	170.13	11.445	-0.0031
65	161.83	163.52	168.89	10.719	0.000496
64	160.26	161.8	167.51	9.781	-0.00167
63	158.17	159.21	165.99	8.918	-0.00242
62	153.82	156.53	163.47	7.986	-0.00467
61	152.61	154.6	159.83	6.469	-0.0008
60	151.63	152.61	157.94	5.303	-0.00084
59	149.24	150.34	156.25	4.288	-0.00235
58	145.78	148.97	154.71	3.297	-0.00349
57	146.16	147.06	152.31	1.788	0.000252
56	144.66	145.27	150.56	975	-0.00185
55	141.51	143.18	149.05	0	-0.00323

*Tabella I-4: Profili A e B di pelo libero del fiume Ticino*

## II. Appendice II: Andamento dei pozzi di emungimento

Si riportano di seguito gli andamenti di emungimento in termini quantitativi e percentuali, suddivisi in base all'uso, dei restanti comuni presenti nel dominio di modellazione nella provincia di Varese (Albaizzate, Arsago Seprio, Besnate, Cassano Magnago, Castronno, Gallarate, Mornago, Cavaria con Premezzo).

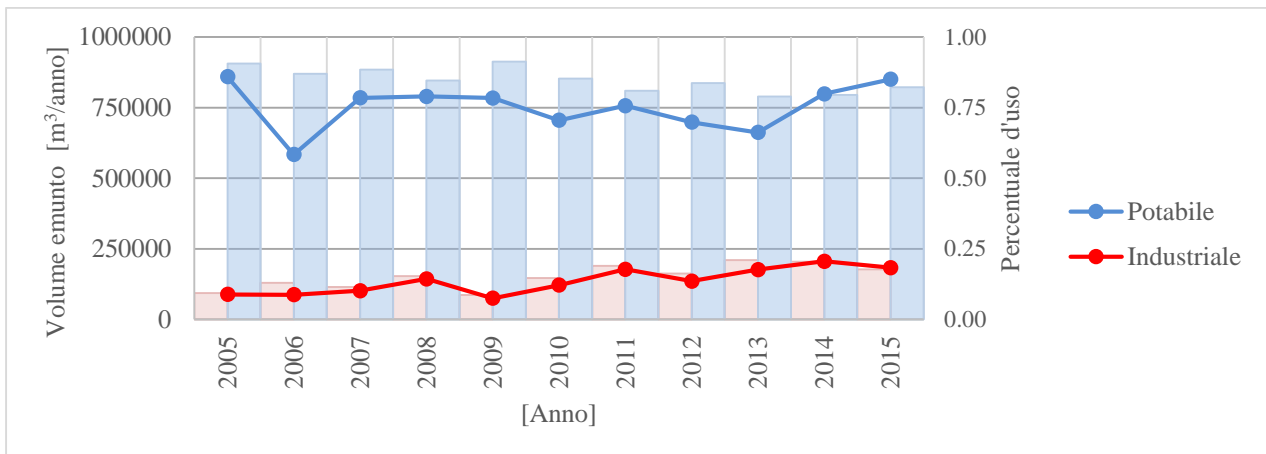


Figura II-1: Portate emunte annualmente dal comune di Albaizzate nel periodo 2005-2015

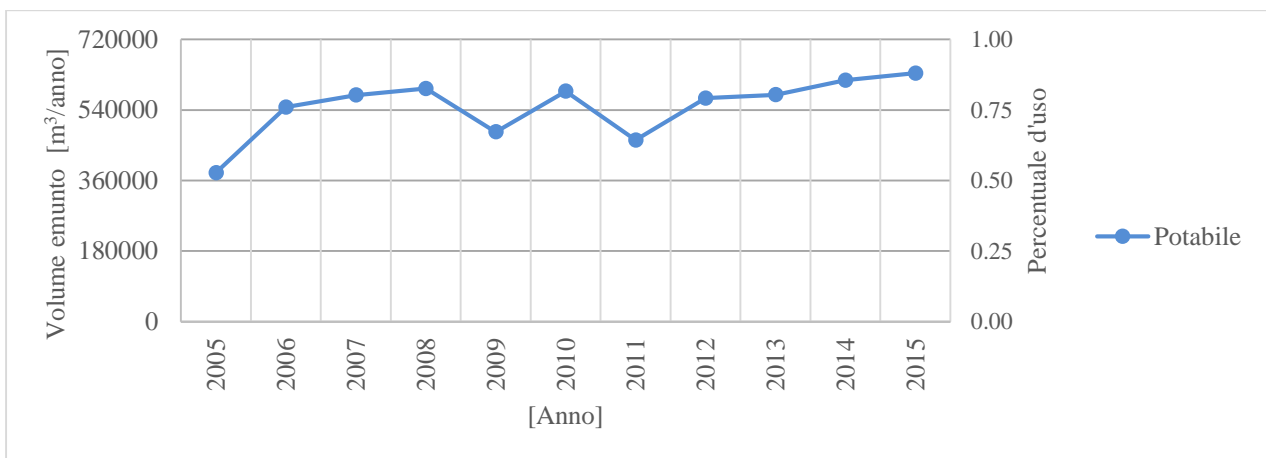


Figura II-2: Portate emunte annualmente dal comune di Arsago Seprio nel periodo 2005-2015

Appendice II: Andamento dei pozzi di emungimento

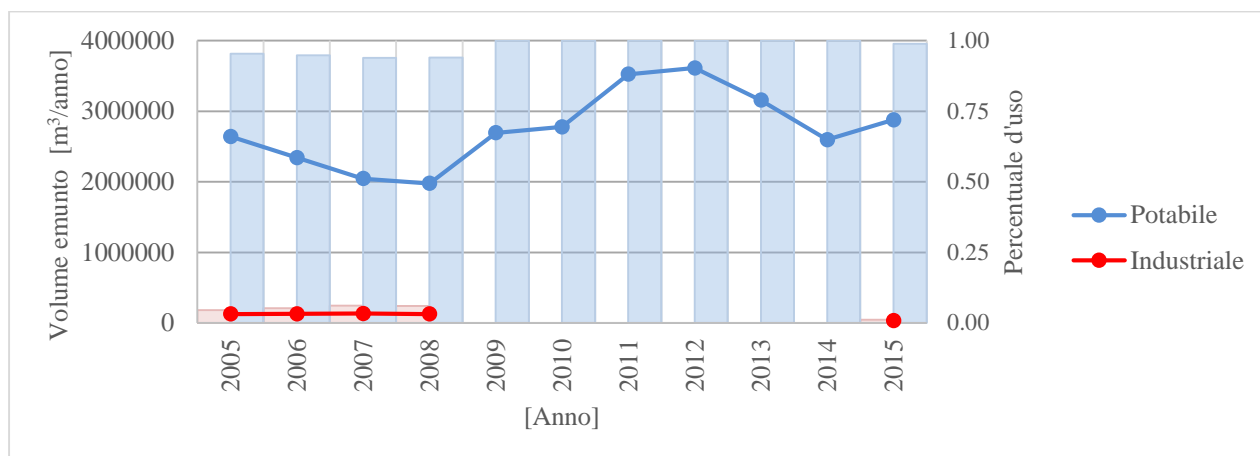


Figura II-3: Portate emunte annualmente dal comune di Besnate nel periodo 2005-2015

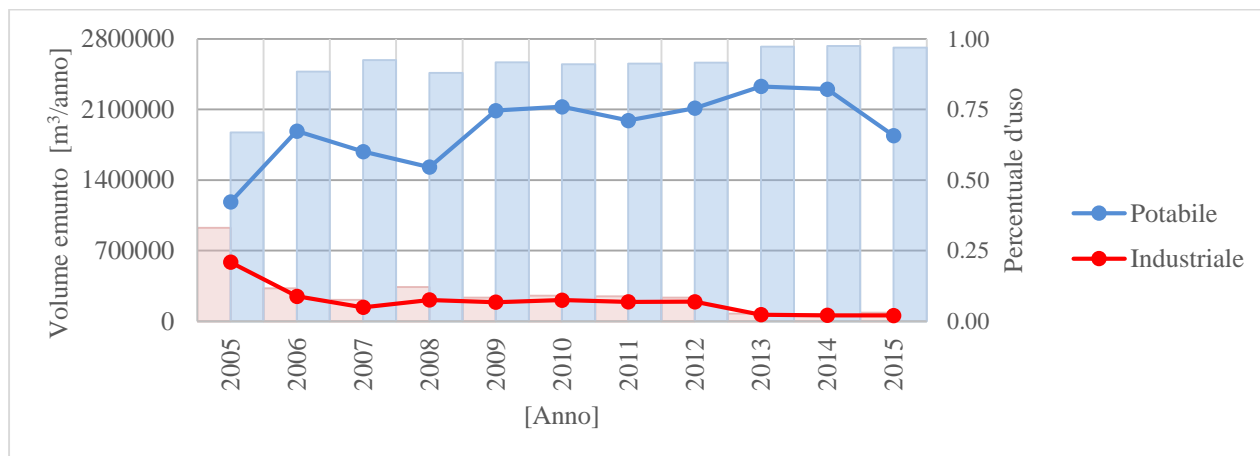


Figura II-4: Portate emunte annualmente dal comune di Cassano Magnago nel periodo 2005-2015

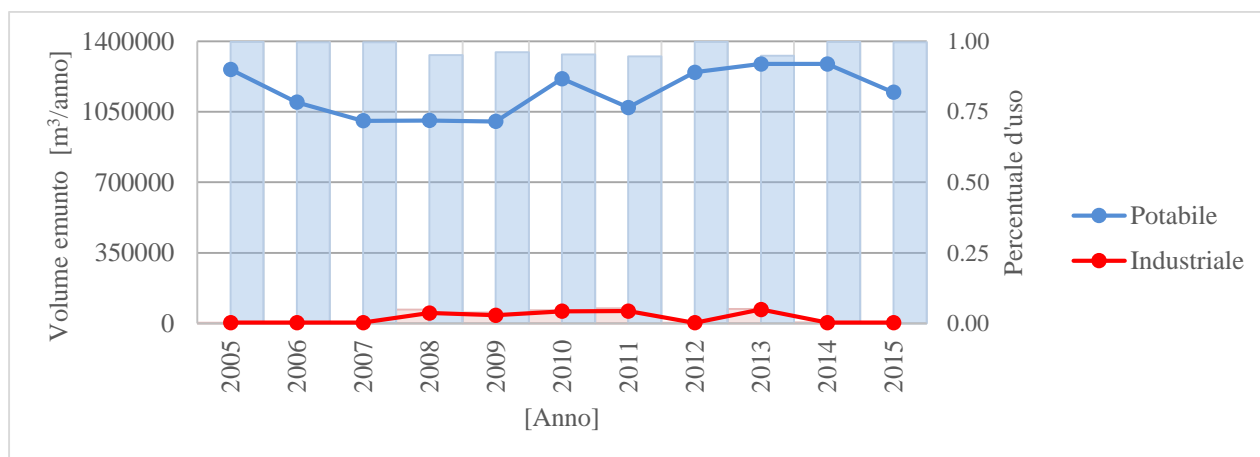


Figura II-5: Portate emunte annualmente dal comune di Castronno nel periodo 2005-2015

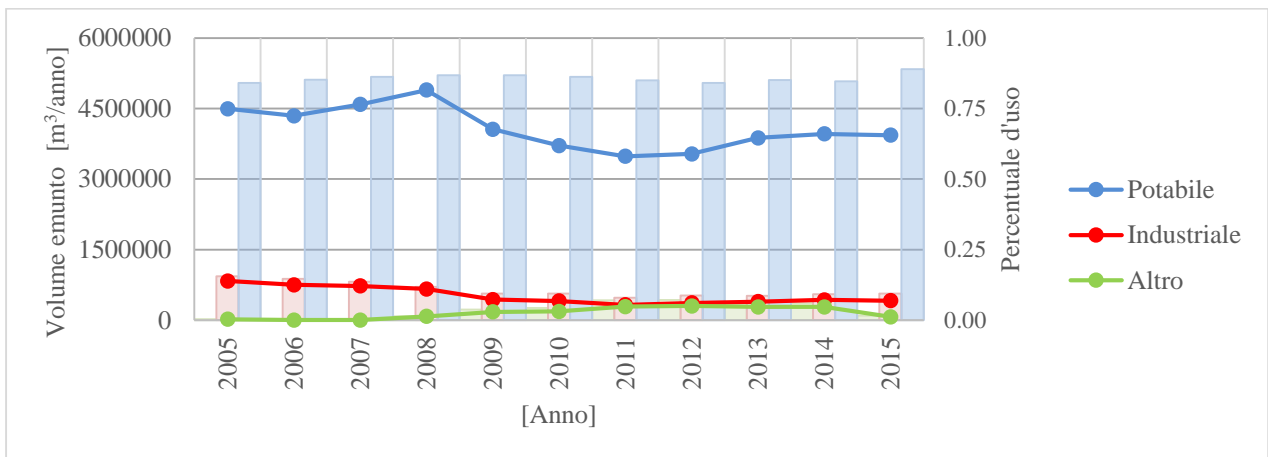


Figura II-6: Portate emunte annualmente dal comune di Gallarate nel periodo 2005-2015

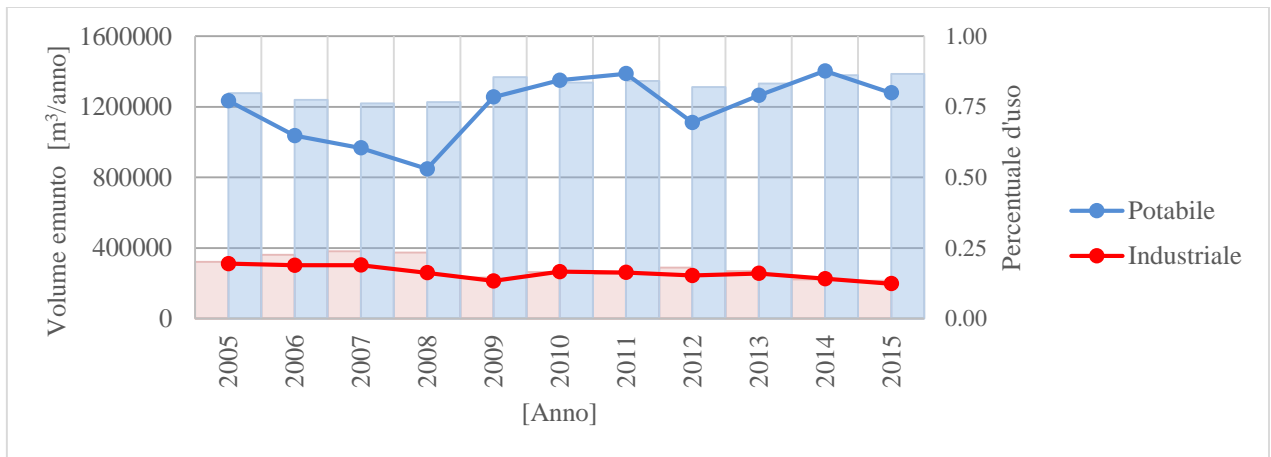


Figura II-7: Portate emunte annualmente dal comune di Mornago nel periodo 2005-2015

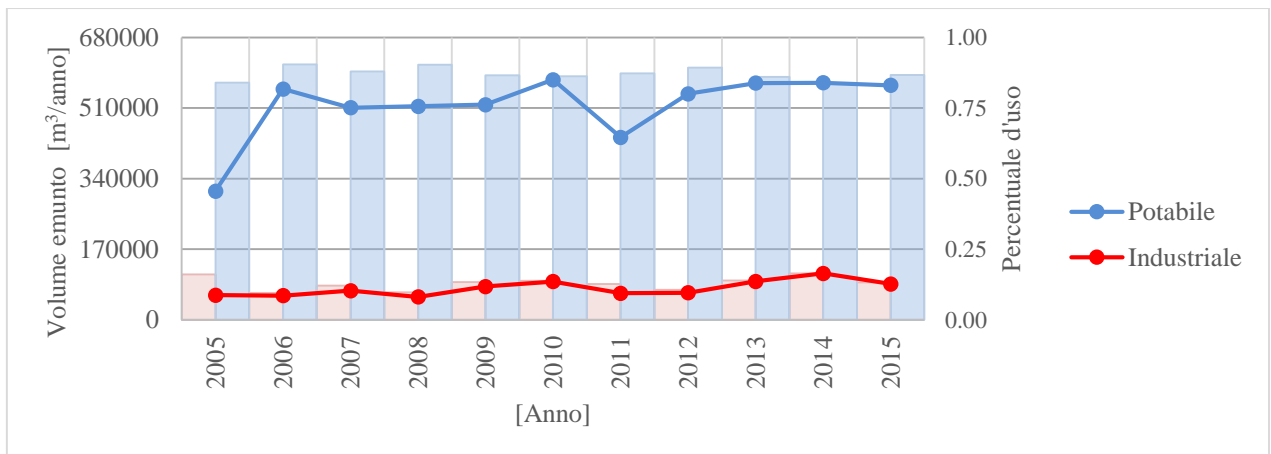


Figura II-8: Portate emunte annualmente dal comune di Cavaria con Premezzo nel periodo 2005-2015



### III. Appendice III: Confronto andamenti freaticometrici

Si riportano di seguito ulteriori analisi relative gli andamenti piezometrici dell'area d'indagine, raggruppati secondo l'ente dal quale provengono.

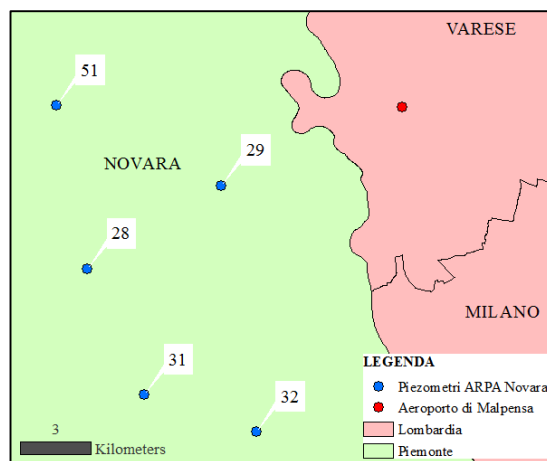


Figura III-1: Piezometri ARPA della provincia di NOVARA

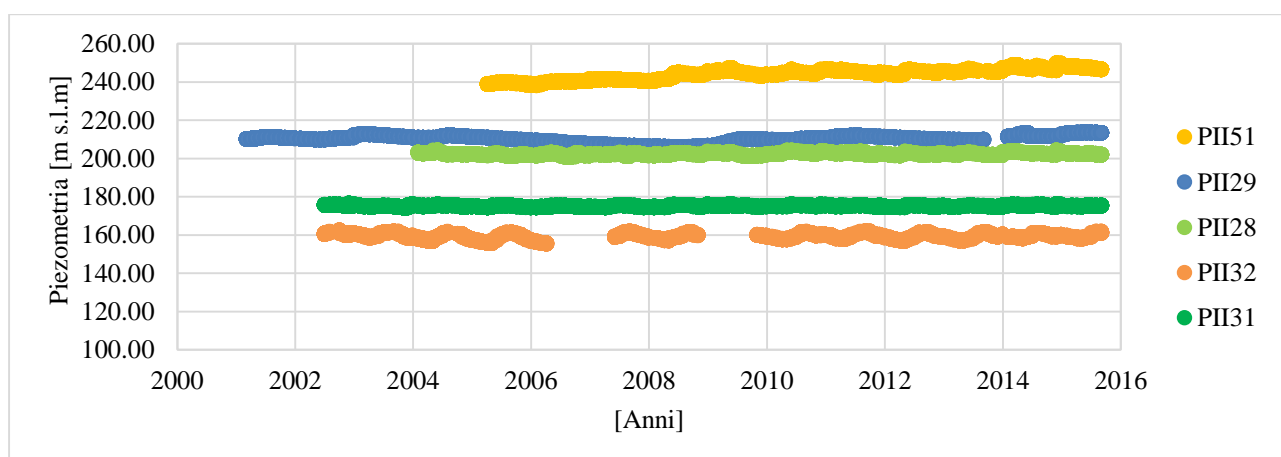


Figura III-2: Andamento piezometrico superficiale monitorato dalle stazioni ARPA (NO)

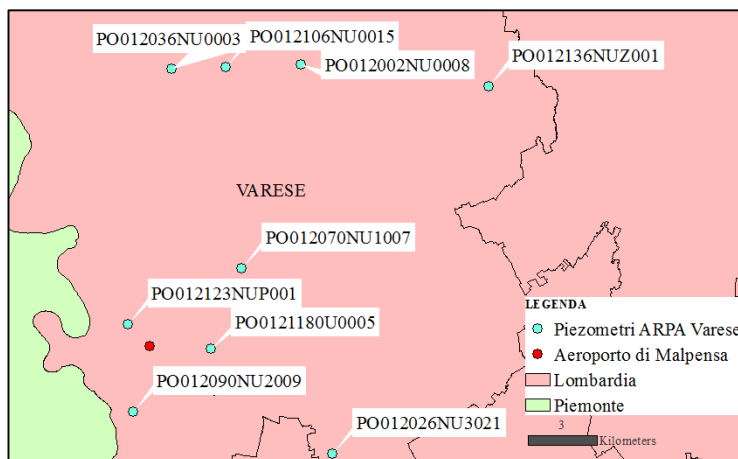


Figura III-3: Piezometri ARPA Varese in falda A

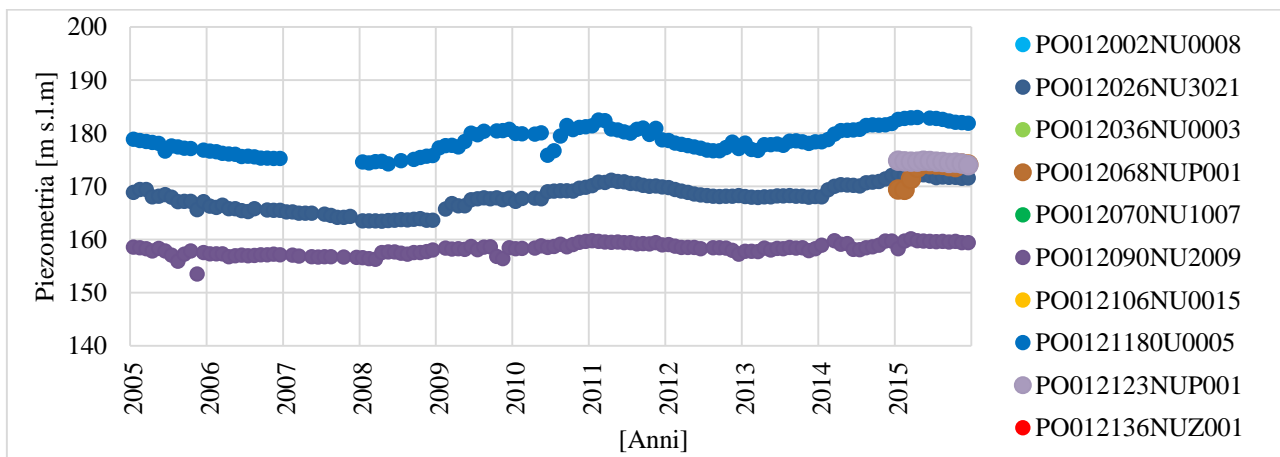


Figura III-4: Andamento piezometrico in falda A monitorato dalle stazioni ARPA Varese

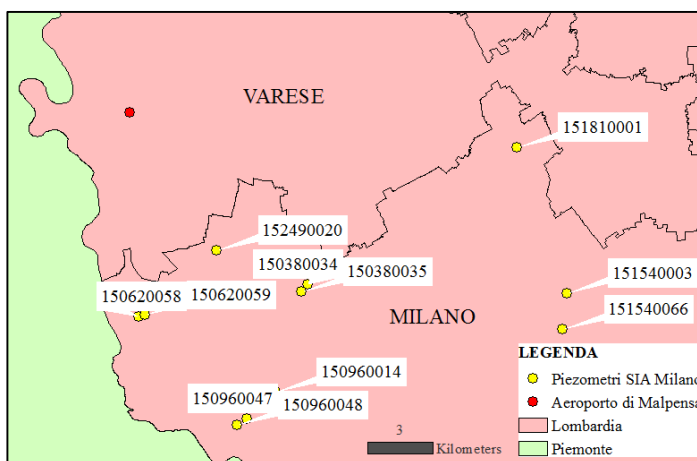


Figura III-5: Piezometri SIA Città Metropolitana di Milano

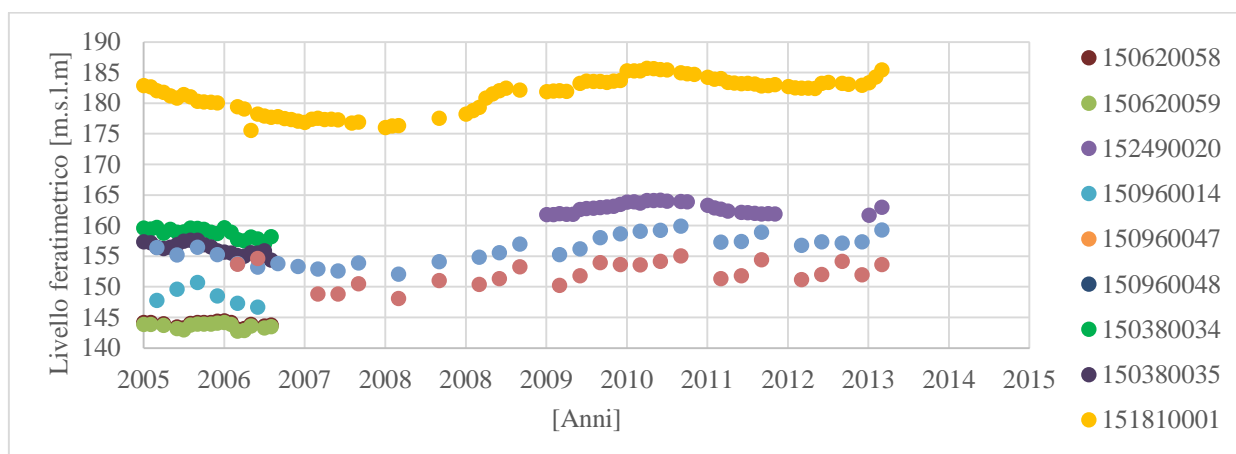


Figura III-6: Andamento piezometrico in falda A monitorato dalle stazioni SIA Città metropolitana milanese





## IV. Appendice IV: Analisi freatiche

Nella seguente appendice vengono riportate le analisi effettuate sui restanti piezometrici ARPA Varese nel periodo 2005-2015 ricadenti nell'area d'indagine come illustrate al *Paragrafo 2.3.2.*

Non sono presenti i risultati associati ai piezometri PO012123NUP001 e PO012068NUP001 poiché le registrazioni temporali sono presenti a partire dall'anno 2015 e di fatto poco indicative.

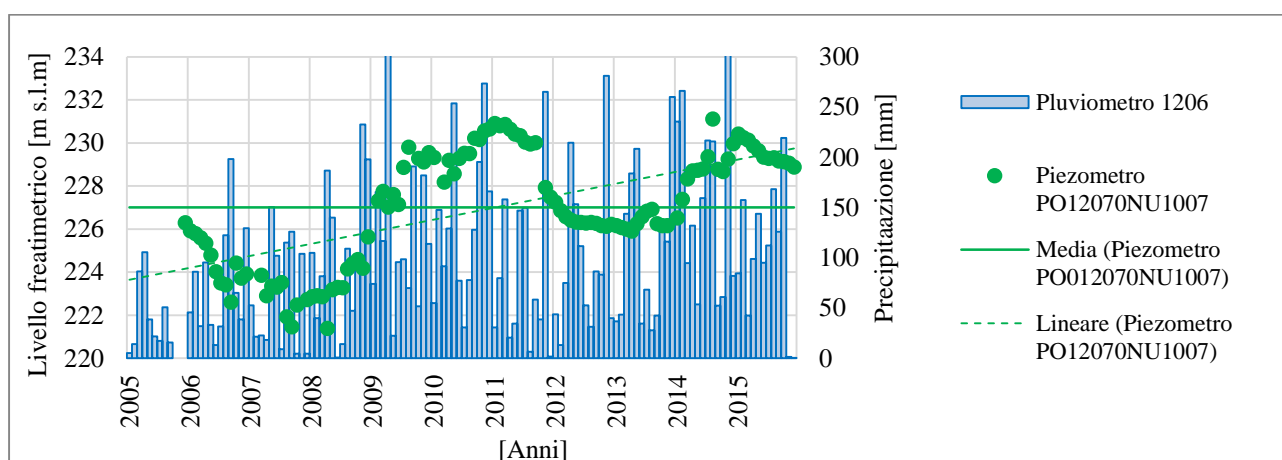


Figura IV-1: Andamento freatico piezometro PO012070NU1007 e precipitazione cumulata mensile (pluviometro 1206)

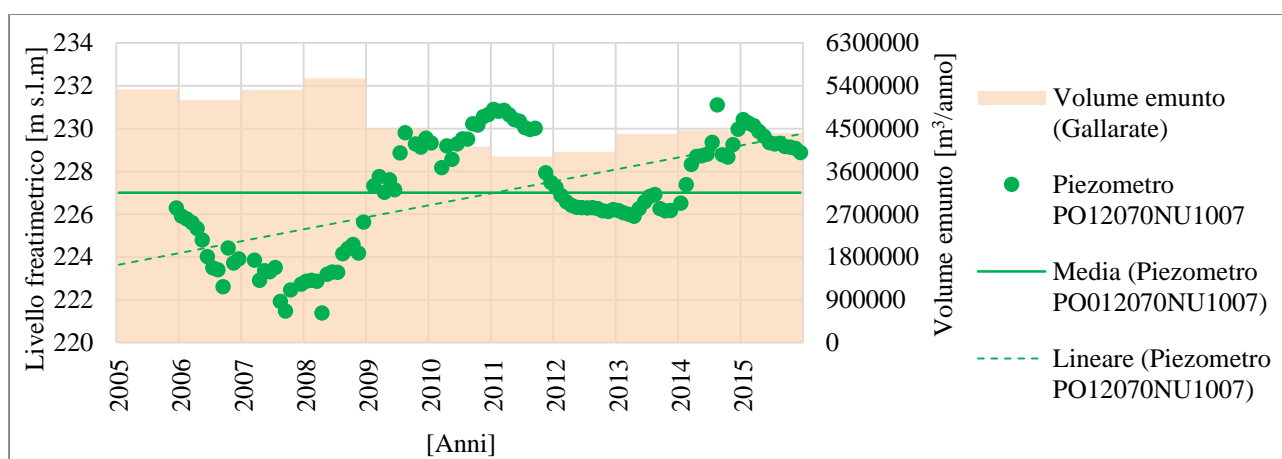


Figura IV-2: Andamento freatico piezometro ARPA PO012070NU1007 e volume emunto nel comune di Gallarate [m³/anno]

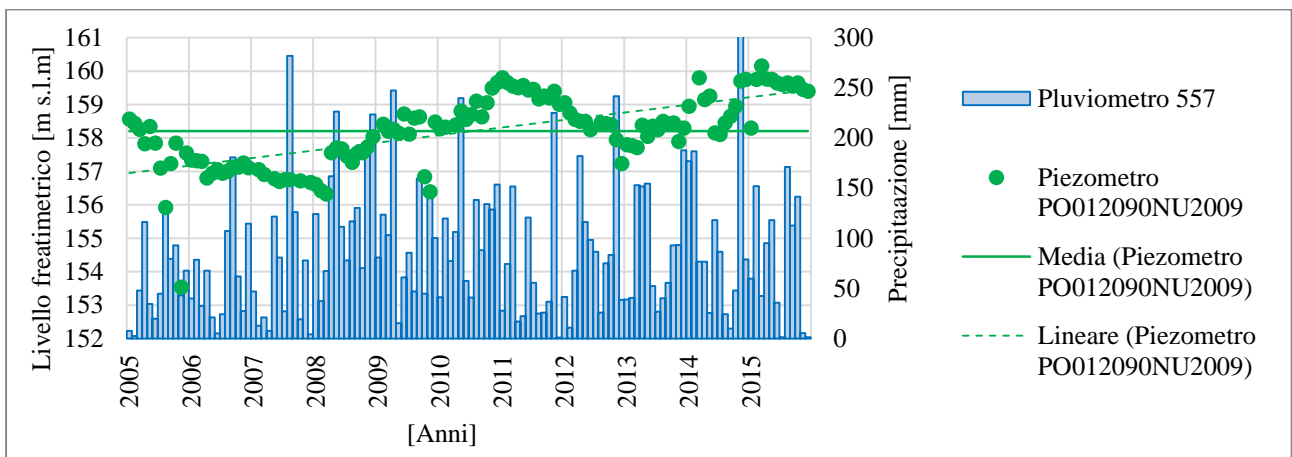


Figura IV-3: Andamento freatico piezometro PO012090NU2009 e precipitazione cumulata mensile (pluviometro 557)

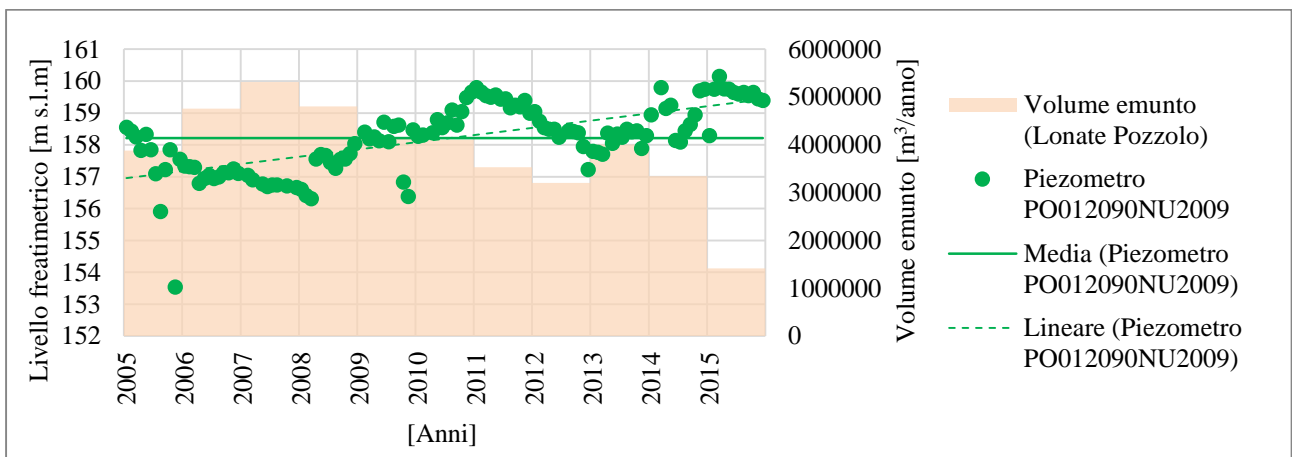


Figura IV-4: Andamento freatico piezometro ARPA PO012090NU2009 e volume emunto nel comune di Lonate Pozzolo [m³/anno]

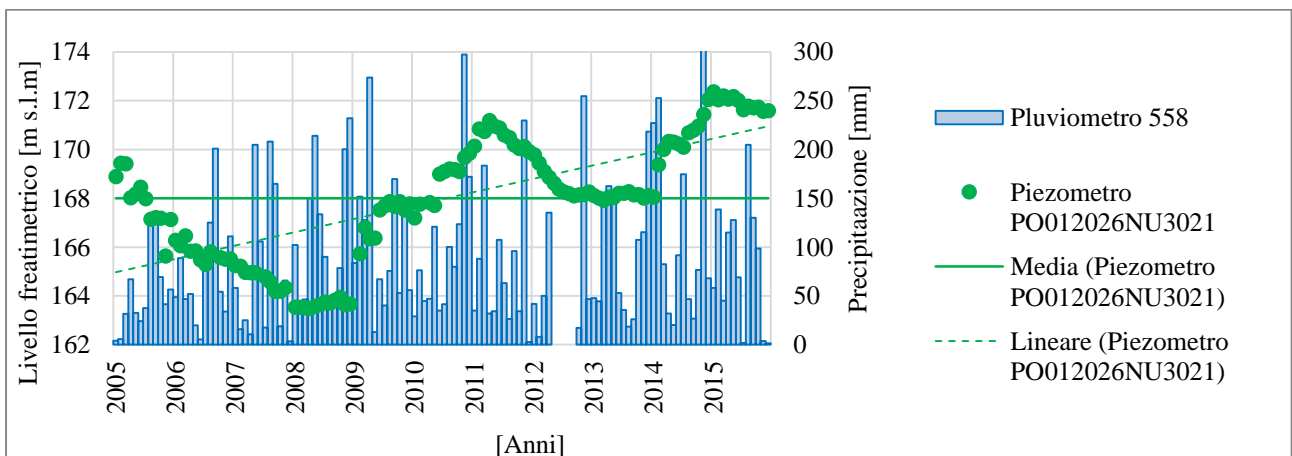


Figura IV-5: Andamento freatico piezometro PO012026NU3021 e precipitazione cumulata mensile (pluviometro 558)

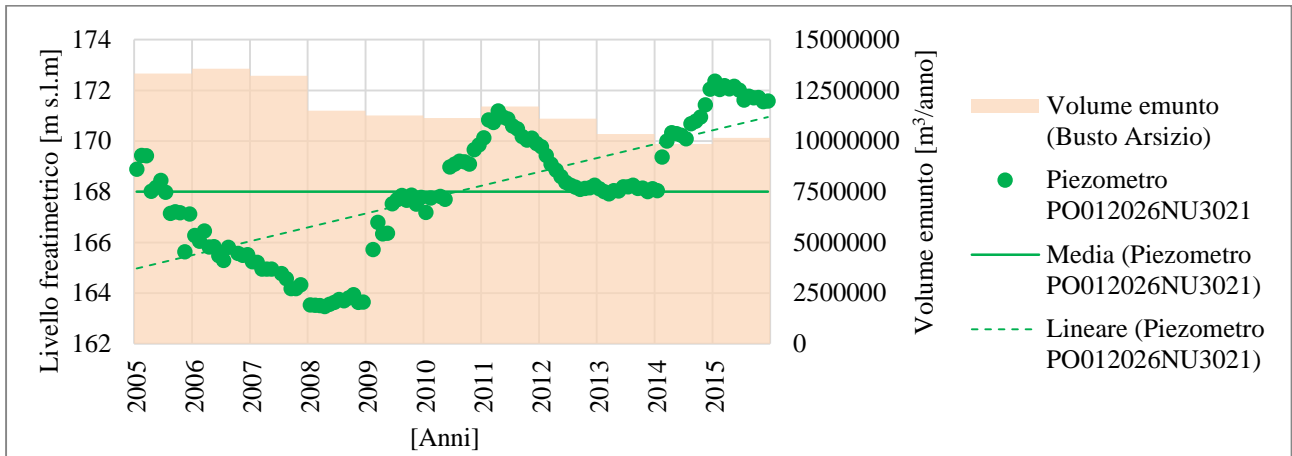


Figura IV-6: Andamento freaticco piezometro ARPA PO012026NU3021 e volume emunto nel comune di Busto Arsizio [m³/anno]

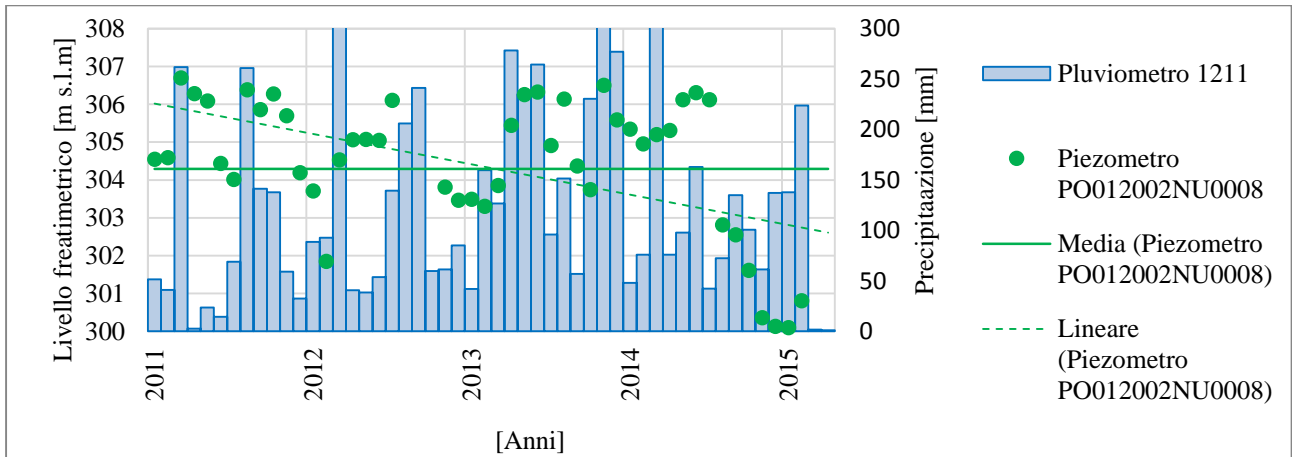


Figura IV-7: Andamento freaticco piezometro PO012002NU0008 e precipitazione cumulata mensile (pluviometro 1211)

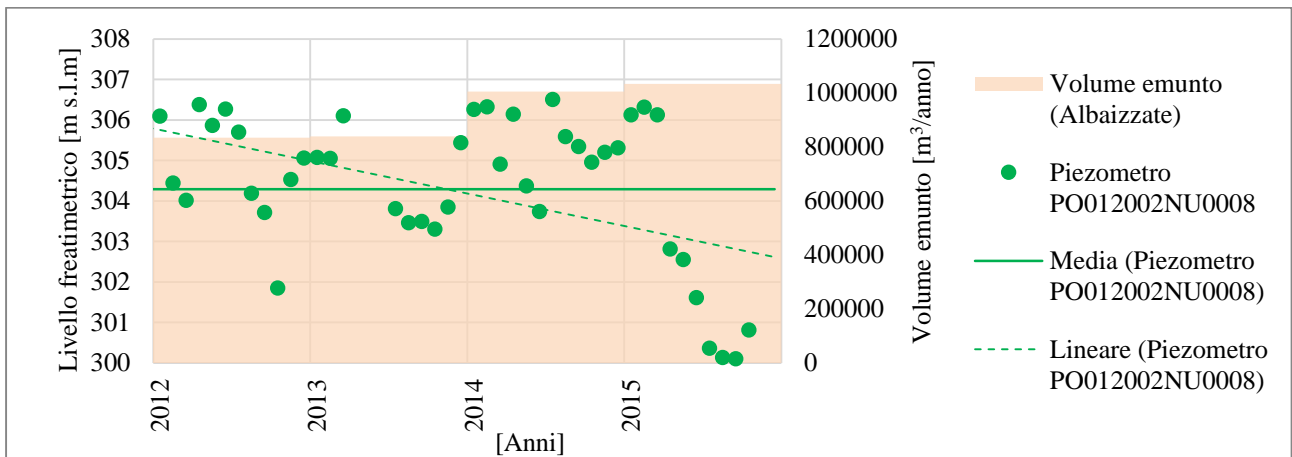


Figura IV-8: Andamento freaticco piezometro ARPA PO012002NU0008 e volume emunto nel comune di Albaizzate [m³/anno]

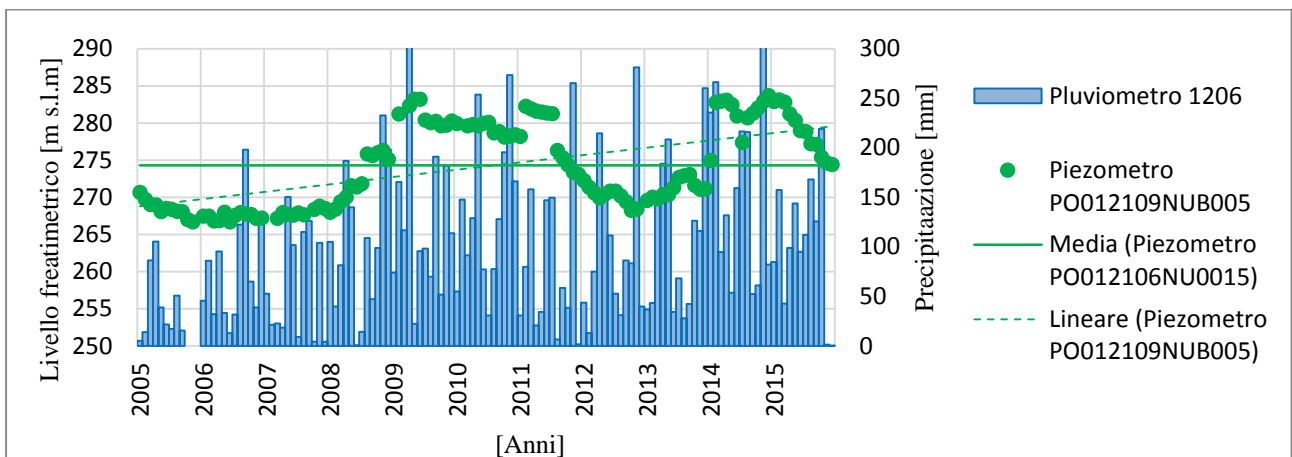


Figura IV-9: Andamento freatico piezometro PO012106NU0015 e precipitazione cumulata mensile (pluviometro 1206)

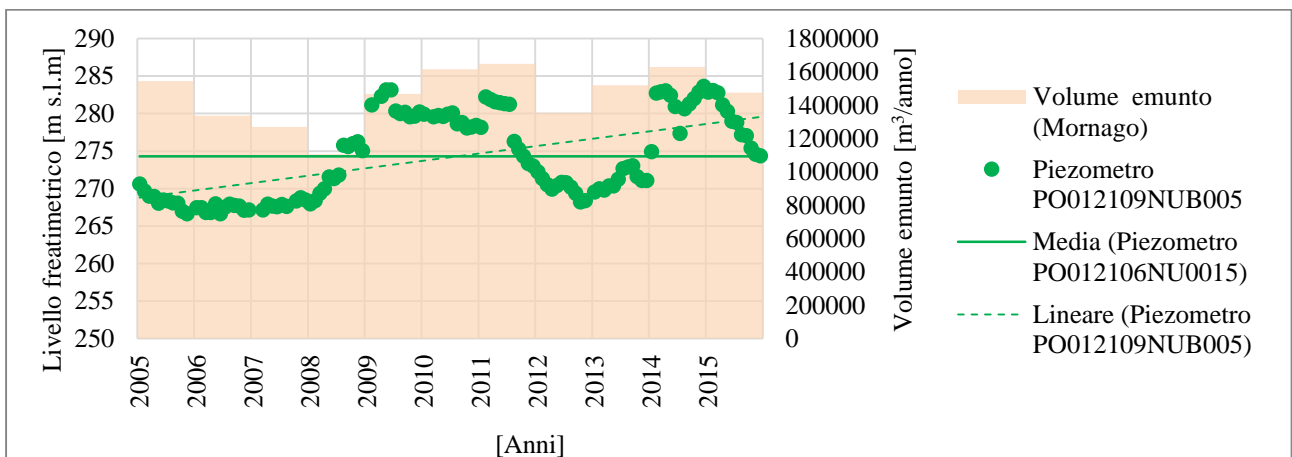


Figura IV-10: Andamento freatico piezometro ARPA PO012106NU0015 e volume emunto nel comune di Mornago [m³/anno]

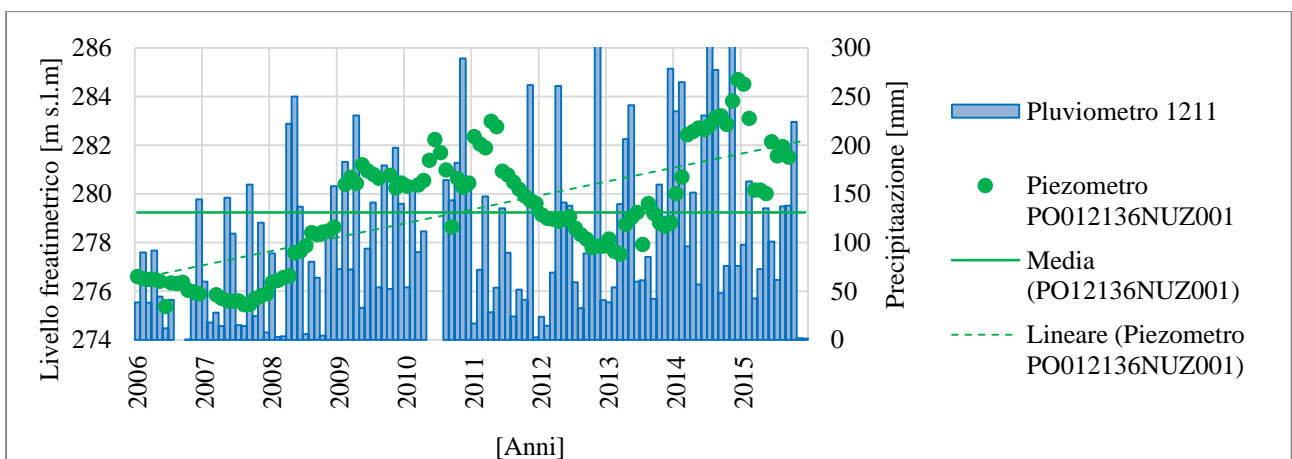


Figura IV-11: Andamento freatico piezometro PO012136NUZ001 e precipitazione cumulata mensile (pluviometro 1211)

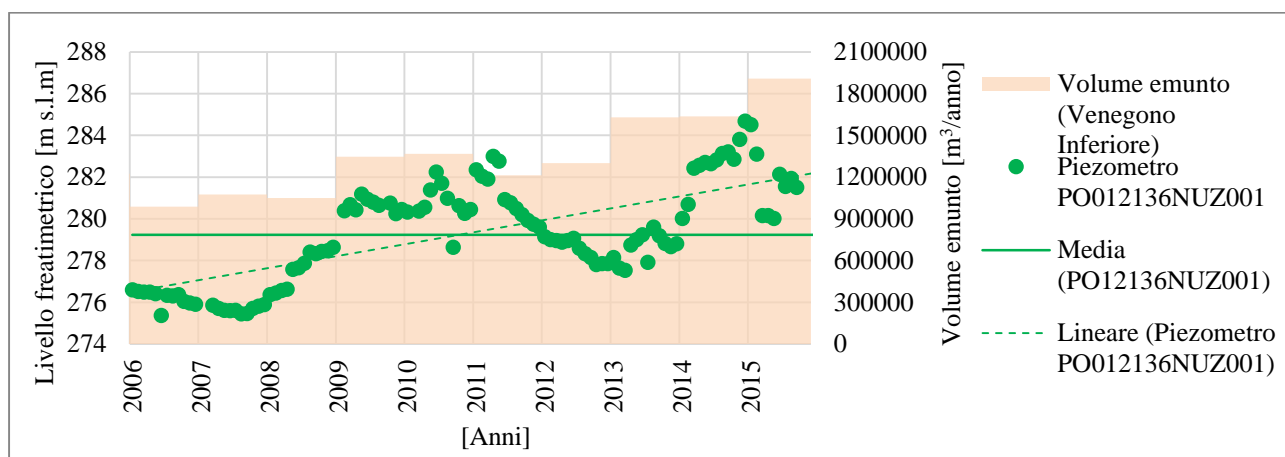


Figura IV-12: Andamento freaticometrico piezometro ARPA PO012136NUZ0011 e volume emunto nel comune di Venegono Inferiore [m³/anno]

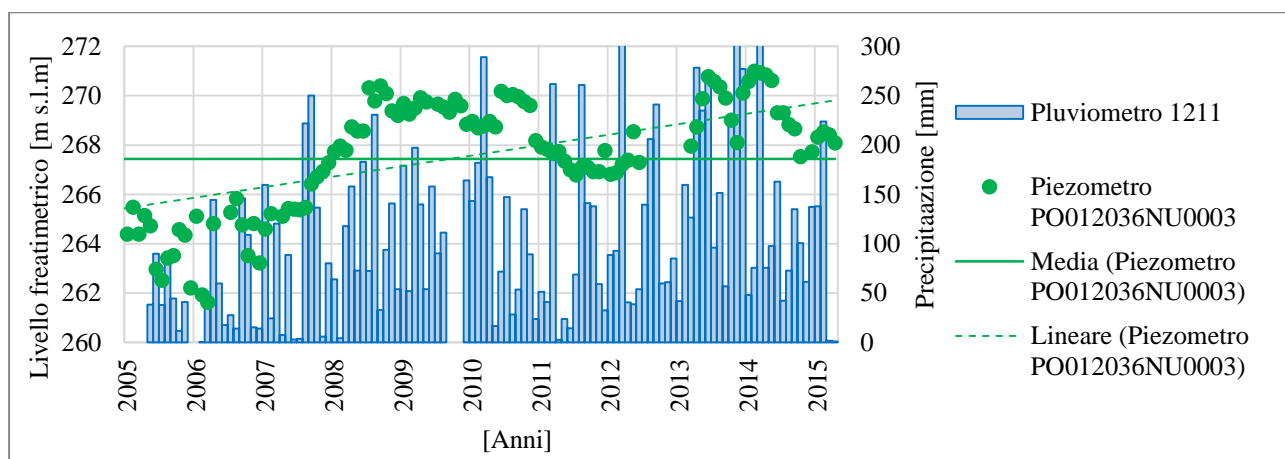


Figura IV-13: Andamento freaticometrico piezometro PO012036NU0003 e precipitazione cumulata mensile (pluviometro 1211)

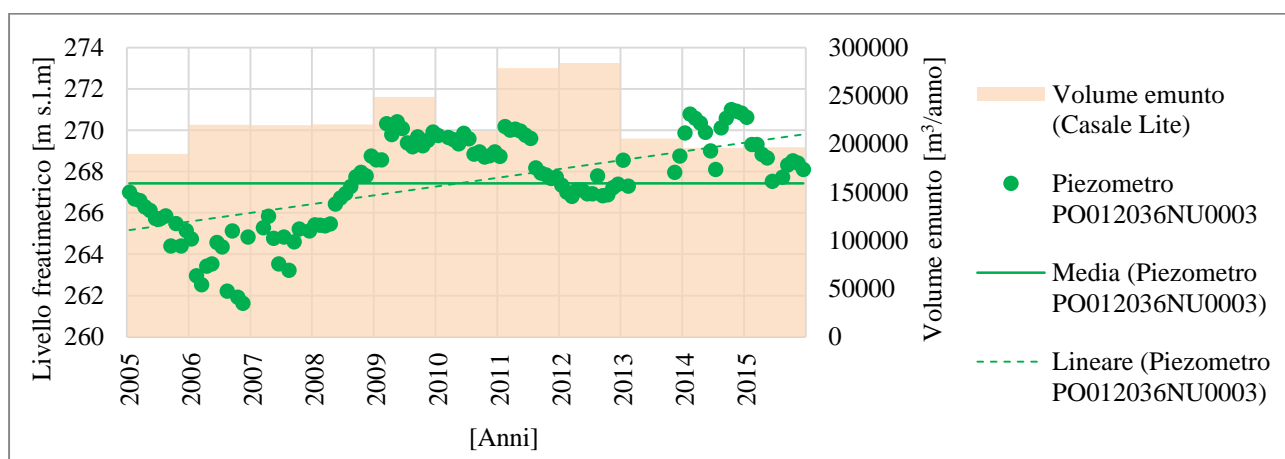


Figura IV-14: Andamento freaticometrico piezometro ARPA PO012036NU0003 e volume emunto nel comune di Casale Lite [m³/anno]



## V. Appendice V: Cenni di Geostatistica

### V.1 Fondamenti teorici

I parametri idrodinamici di un acquifero sono trattabili come delle “Variabili Regionali” [VR] quindi come grandezze che evidenziano una distribuzione spaziale non del tutto casuale, ma obbediente ad una qualche struttura. Le VR sono funzioni  $z(x)$  definite su un dominio spaziale  $D$  che assumono valori al variare del vettore posizione  $x \equiv (x_u, x_v, x_w)$  non in modo del tutto caotico, ma in accordo con una qualche “legge spaziale”.

Sulla base della teoria delle variabili aleatorie, il valore in un punto  $x_0 \in D$  di una generica VR è una realizzazione particolare di una variabile aleatoria VA che dipende dal punto e le infinite VA associate a tutti i punti  $x$  del dominio costituiscono una funzione aleatoria FA. Una VR  $z(x)$ , associata al parametro idrodinamico che si vuole studiare, è una particolare realizzazione di una FA  $Z(x)$ . Il primo obiettivo della geostatistica è l’individuazione della “legge spaziale” che governa la variabile di interesse nel dominio di studio. Sulla base dell’inferenza statistica è possibile studiare le auto e le mutue correlazioni spaziali della variabile di interesse a partire da un campione di osservazioni sperimentali. Questa viene poi utilizzata nell’algoritmo di interpolazione di kriging finalizzato alla stima sistematica della variabile di interesse, in un reticolo regolare o irregolare di punti in cui essa non è stata misurata sperimentalmente. All’algoritmo di kriging non occorre l’inferenza dell’intera legge spaziale  $Z(x)$ , ma unicamente la stima del valore atteso, della varianza e dei momenti bivariati (covarianza e/o variogramma) di  $Z(x)$ .

Le ipotesi fondamentali della geostatistica sono due, strettamente integrate l’una con l’altra:

- *Ipotesi di ergodicità*: un processo si definisce ergodico se l’unica realizzazione disponibile si comporta spazialmente con la stessa pdf dell’insieme delle possibili realizzazioni.
- *Ipotesi di stazionarietà*: un processo si definisce stazionario se la sua legge di probabilità è invariante per traslazione cioè se le VA  $\{Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_k)\}$  e  $\{Z(x_1 + h), Z(x_2 + h), \dots, Z(x_k + h)\}$ , con  $h$  generico vettore tale che  $x_1 + h, x_2 + h, \dots, x_k + h \in D$ , hanno la stessa pdf (probabilistic density function)  $k$ -variata. In genere è sufficiente che la stazionarietà del processo riguardi solo i primi due momenti della  $Z(x)$  (stazionarietà debole).

Le ipotesi di ergodicità e di stazionarietà consentono di accedere all’inferenza della legge spaziale della FA  $Z(x)$  a partire dall’unica realizzazione possibile.



## V.2 Calcolo dei variogrammi sperimentali

Lo strumento necessario per la descrizione della struttura della distribuzione spaziale di elemento che si vuole studiare è il variogramma (o la covarianza). La stima della funzione semivariogramma viene effettuata sulla base dei dati provenienti dal campionamento del fenomeno di studio. Dalle osservazioni sperimentali si stimano alcuni punti del variogramma attraverso la relazione seguente:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (\text{V.1})$$

dove  $N(h)$  è il numero di coppie di dati all'interno di  $D_s$  approssimativamente distanti  $|h|$  (vettore che definisce la distanza di separazione denominato generalmente lag incrementale) lungo la prefissata direzione di indagine  $\Phi$ . Il numero di coppie per  $n$  punti campionari è dato dalla relazione  $N(h) = n(n-1)/2$ . Le coppie raramente saranno esattamente distanti  $h$  e allineate secondo la direzione  $\Phi$ . È allora necessario introdurre una tolleranza  $\Delta h$  sulla distanza ed una tolleranza angolare  $\Delta\Phi$ , in modo che contribuiscano al calcolo di  $\gamma^*(h)$  del semi-variogramma direzionale  $\Phi$  le coppie di dati avente distanza compresa nell'intervallo  $[h-\Delta h, h+\Delta h]$  e allineate secondo una direzione compresa nell'intervallo  $[\Phi - \Delta\Phi, \Phi + \Delta\Phi]$ . I valori delle tolleranze  $\Delta\Phi$  e  $\Delta h$  da adottare dipendono ovviamente dalla quantità di campioni di cui si dispone e dalla scala del problema. Maggiore è il campione, più piccole possono essere le tolleranze, consentendo con ciò maggiore precisione nel calcolo dei semivariogrammi. È comunque di uso abbastanza frequente calcolare i semivariogrammi sperimentali per distanze multiple di una distanza di base, chiamata passo, con un valore di  $\Delta h$  pari proprio a metà del passo e secondo otto direzioni, a  $45^\circ$  tra di loro, quindi con un valore di  $\Delta\Phi$  di  $22.50^\circ$ . Nel considerare la tolleranza angolare va definito un ulteriore parametro, la bandwidth, che permette di considerare nel calcolo del semivariogramma sperimentali tutti i punti ricadenti all'interno di una banda larga proprio quanto questo termine.

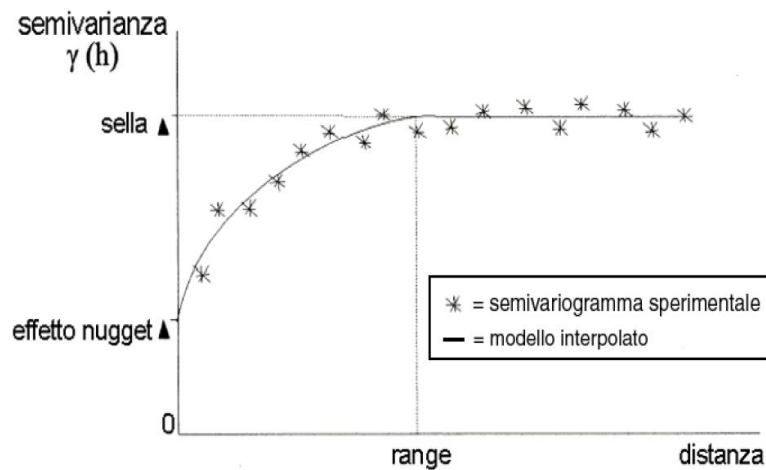


Figura V-1: Esempio di semivariogramma sperimentale e fitting di un modello di semivariogramma

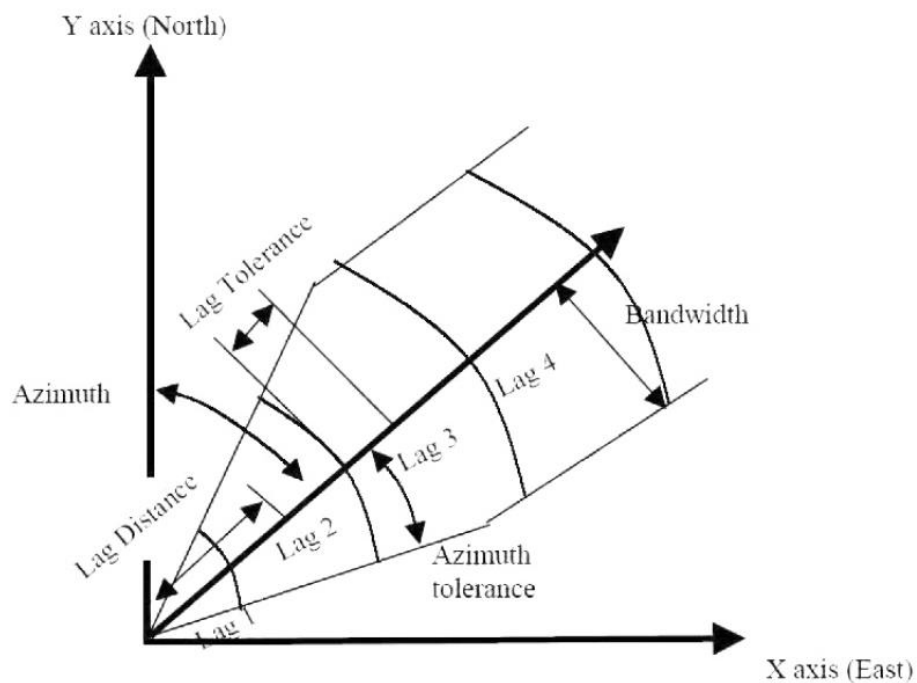


Figura V-2: Elementi che intervengono nel calcolo di un semivariogramma sperimentale

Nell'andamento del semivariogramma sperimentale possono essere individuate tre caratteristiche:

- *Range*: all'aumentare della distanza di separazione tra le coppie di punti diminuisce la correlazione tra questi ed il corrispondente valore di semivariogramma tenderà generalmente ad aumentare. Nel caso in cui si osservi che ad un incremento della distanza di separazione non corrisponda più un aumento della differenza media al

quadrato tra le coppie di valori, allora il semivariogramma raggiunge il massimo. La distanza alla quale il semivariogramma raggiunge questo valore è chiamata *range*.

- *Sill*: il valore massimo raggiunto dal semivariogramma in prossimità del range è chiamato *sill*.
- *Nugget*: sebbene il valore del semivariogramma per una distanza  $h=0$  sia strettamente pari a 0, alcuni fattori, come gli errori di campionamento o la presenza di piccole scale di variabilità al di sotto del volume di supporto della misura, possono causare valori sperimentali che portano una discontinuità nell'origine. Il salto verticale dal valore 0 dell'origine al valore della più piccola distanza di separazione del semivariogramma è chiamato *effetto nugget*.

Si può anche affermare che il range è proporzionale alla dimensione media dei corpi eterogenei mentre il sill valuta la magnitudine dei cambiamenti tra un corpo eterogeneo ed un altro.

Importante, nella stima del semivariogramma, è la presenza di particolari anisotropie del sistema, in particolar modo quando si cerca di descrivere la struttura spaziale nelle direzioni orizzontale e verticale. Si possono distinguere due tipologie di anisotropia: (1) anisotropia geometrica, quando è diverso il valore del range, ma rimane invariato il sill; (2) anisotropia zonale, quando il range rimane costante mentre il sill cambia con la direzione ed essa è caratterizzata dall'aver una direzione in cui la variabilità è massima. L'anisotropia geometrica in un piano, quello orizzontale ad esempio, è espressa dal fatto che, in funzione della direzione, il range varia come il raggio vettore di un'ellisse. Gli assi maggiore e minore dell'ellisse sono dati appunto dal massimo e minimo range rispettivamente. Importante, in questo caso, è l'angolo in cui si manifesta il massimo range rispetto alla direzione principale (nel caso di piano orizzontale può essere presa come la direzione nord – sud) ed il rapporto di anisotropia. L'anisotropia zonale invece mostra una variabilità spaziale più accentuata in una direzione, detta di zonalità. In tale caso questa può essere vista come un'anisotropia geometrica caratterizzata da un'ellisse il cui asse minore è trascurabile rispetto a quello maggiore, quindi interessa solo la conoscenza dell'angolo che individua la direzione di zonalità.

### V.3 Interpretazione dei variogrammi sperimentali

Sulla base delle indicazioni dell'analisi strutturale, si deve operare un aggiustamento (fitting) tra una funzione analitica  $\gamma(h)$  ed i risultati  $\gamma^*(h)$  dei variogrammi sperimentali. Questa funzione analitica permette di fornire un valore del modello di variabilità spaziale della VA considerata, in funzione della distanza e dell'orientamento di una qualsiasi coppia di punti nello spazio.

I differenti modelli di variogramma utilizzati per interpretare i semivariogrammi sperimentali sono:

- Modello di variogramma sferico

$$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c_1 \left[ 1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{se } h \leq a \\ c_0 + c_1 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (\text{V.2})$$

- Modello di variogramma esponenziale

$$\gamma(h) = c_0 + c_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{3h}{a}\right) \right] \quad (\text{V.3})$$

Per questo modello il valore del sill è raggiunto asintoticamente, quindi, per avere una misura della distanza entro cui si manifesta la correlazione, viene introdotto un range pratico definito come la distanza alla quale viene raggiunto il 95% del sill.

- Modello di variogramma Gaussiano

$$\gamma(h) = c_0 + c_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{a^2}\right) \right] \quad (\text{V.4})$$

Nelle equazioni (V.2) – (V.4),  $c_0$  è il nugget,  $c_i$  e  $a_i$  ( $i = 1, 2$ ) rappresentano rispettivamente il sill ed il range,  $h$  è la distanza di separazione.

#### V.4 Algoritmo di Ordinary Kriging

L'algoritmo di kriging è in grado di fornire una mappatura a curve di livello della variabile di studio  $Z(x)$ . Questo non si ottiene direttamente, ma successivamente alla costruzione di un fitto e regolare grigliato di valori della variabile, attraverso una ripetuta operazione di stima. Questo è in grado anche di valutare l'incertezza e l'attendibilità delle stime attraverso la mappatura della varianza estimativa.

Il kriging è noto in geostatistica con l'appellativo "BLUE", acronimo di Best Linear Unbiased Estimator:

- lineare (linear) perché la stima di  $Z^*(x_0)$  del valore di  $Z(x)$  in un generico punto  $x_0$  è espressa come combinazione lineare dei valori noti del campione di  $n$  osservazioni sperimentali attraverso  $n$  coefficienti  $\lambda_i$  detti ponderatori;

$$z_0^* = \sum_j \lambda_j z_j \quad (\text{V.5})$$

- corretto (non distorto) perché rispetta la condizione di correttezza per cui lo scarto medio tra valori stimati e valori reali, cioè l'errore di stima medio, deve essere nullo;

$$E[Z^*(x) - Z(x)] = 0 \quad (\text{V.6})$$

- ottimale perché rispetta la condizione di ottimalità della stima secondo cui la varianza estimativa, quindi la varianza dell'errore di stima, deve essere la minima possibile;

$$\text{Var}[Z^*(x) - Z(x)] = \min \quad (\text{V.7})$$

Imponendo e sviluppando analiticamente la condizione di correttezza si ottiene

$$\sum_j \lambda_j \quad (\text{V.8})$$

La condizione di ottimalità conduce alla formulazione di un classico problema di minimizzazione di una funzione che, come noto, è risolvibile imponendo la condizione che sia nulla la derivata della funzione rispetto alla variabile indipendente. Nel caso della funzione che esprime la varianza estimativa, le variabili indipendenti sono gli  $N$  ponderatori  $\lambda_i$  dello stimatore. Effettuando le derivate parziali, e utilizzando il formalismo matematico dei moltiplicatori di Lagrange, si ottengono  $N$  equazioni in  $N$  incognite:

$$\sum_j^N \gamma_{ij} \lambda_j + \mu = \gamma_{i0} \quad \text{per } i = 1, 2, \dots, N \quad (\text{V.9})$$

dove per l' $i$ -esima equazione

- $\gamma_{ij} = \gamma(h)$  con  $h = x_i - x_j$ , esprime il grado di non correlazione spaziale tra il punto  $x_i$  e gli altri punti di misura  $x_j$ ;
- $\gamma_{i0} = \gamma(h_0)$  con  $h_0 = x_i - x_0$ , esprime il grado di non correlazione spaziale tra il punto di misura  $x_i$  ed il punto  $x_0 \in D$  in cui si vuole effettuare la stima di  $Z(x)$ ;
- $\mu$  è il moltiplicatore Lagrangiano incognito.

Operando alcune sostituzioni si giunge all'espressione della varianza estimativa in funzione dei ponderatori  $\lambda_i$ :

$$\sigma_{Ki} = \sum_j^N \gamma_{ij} \lambda_{j0} + \mu \quad \text{per } i = 1, 2, \dots, N \quad (\text{V.10})$$

In forma matriciale, il complesso di  $N+1$  equazioni in  $N+1$  incognite, derivanti dalle condizioni di correttezza ed ottimalità della stima, si scrive come la (V.11):

$$\begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{1N} & 1 \\ \gamma_{N1} & \gamma_{NN} & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_N \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \gamma_{N0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{V.11})$$

La risoluzione di tale sistema di equazioni lineari fornisce i valori dei ponderatori  $\lambda_i$ , ossia il peso che bisogna attribuire ad ogni dato sperimentale disponibile, nel processo di stima del valore di  $Z(x)$  in un generico punto  $x_0$ .

Si può notare che:

- il peso di un generico ponderatore attribuito al generico dato sperimentale  $z_i$  sarà maggiore o minore a seconda che sia maggiore o minore il grado di correlazione spaziale tra il punto di misura  $x_i$  e  $x_0$ ;
- il grado di correlazione spaziale tra  $x_i$  e  $x_0$  prescinde dai valori che  $Z(x)$  assume in essi e dipende unicamente dalla loro reciproca posizione nello spazio.

### V.5 Kriging ad indicatori

L'indicator kriging è un particolare metodo geostatistico, non parametrico, per la stima della probabilità di un valore  $z_k$  in una data locazione. Nell'indicator kriging, la variabile stocastica  $Z(u)$  è trasformata in una variabile a indicatori con una distribuzione binaria che può essere esplicitata come di seguito:

$$I(u; z_k) = \begin{cases} 1, & \text{se } Z(u) \leq z_k \quad k = 1, 2, \dots, m \\ 0, & \text{altrove} \end{cases} \quad (\text{V.12})$$

Il valore atteso di  $I(u; z_k)$ , condizionato dagli  $n$  dati circostanti, può essere espresso come,

$$E[I(u; z_k | (n))] = \text{Prob}\{Z(u) \leq z_k | (n)\} = F(u; z_k | (n)) \quad (\text{V.13})$$

$$P(u; z_k | (n)) = 1 - F(u; z_k | (n)) \quad (\text{V.14})$$

dove  $F(u; z_k | (n))$  è la funzione di distribuzione cumulativa condizionata di  $Z(u) \leq z_k$ , mentre  $P(u; z_k | (n))$  è la probabilità che  $Z(u) \leq z_k$ . In un punto non campionato  $u_0$ , la stima dell'indicatore  $I^*(u_0; z_k)$  deve utilizzare l'indicator kriging (stimatore a indicatori) in accordo con la seguente relazione:

$$I^*(u_0; z_k) = \sum_{j=1}^n \lambda_j(z_k) I(u_j; z_k) \quad (\text{V.15})$$

dove  $I(u_j; z_k)$  rappresenta il valore dell'indicatore nel punto di misura  $u_j$  con  $j = 1, 2, \dots, n$ , e  $\lambda_j$  è il fattore di peso di  $I(u_j; z_k)$  nella stima di  $I^*(u_0; z_k)$ .

Quindi, nella distribuzione delle formazioni nel sottosuolo, l'indicator kriging fornisce in ogni cella la probabilità che sia presente il materiale associato all'indicatore 1. La stima attraverso

l'indicator kriging risulta non condizionata e con la minima varianza degli errori di stima e allo stesso modo dell'algorithmo di ordinary kriging, si può scrivere che:

$$E[I^*(u_0; z_k) - I(u_0; z_k)] = 0 \quad (V.16)$$

$$\text{Var}[I^*(u_0; z_k) - I(u_0; z_k)] \text{ è minima} \quad (V.17)$$

I pesi  $\lambda_j$  sono la soluzione del seguente sistema:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j(z_k) \gamma_I(u_i - u_j; z_k) - \mu(z_k) = \gamma_I(u_i - u_0; z_k), & \text{to } n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j(z_k) = 1 \end{cases} \quad (V.18)$$

dove  $\mu(z_k)$  è il moltiplicatore di Lagrange,  $\gamma_I(u_i - u_0; z_k)$  specifica il valore del variogramma tra la variabile indicatore nel  $j$ -esimo punto di campionamento;  $\gamma_I(u_i - u_0; z_k)$  è il valore del variogramma tra la variabile indicatore nell' $i$ -esimo punto di campionamento  $u_0$ .

## VI. Appendice VI: Codice MATLAB per la ricostruzione della superficie di separazione

In questa appendice si riportano dettagli sulla struttura del codice MATLAB implementato per la definizione dei punti necessari alla ricostruzione della superficie di separazione dell'acquitardo.

Si riportano a seguire i passi principali del main creato:

### 0) Pulizia Workspace

#### 1) Caricamento serie Dati

```
Codice della stratigrafia: Codpozzo.mat
Comune: Comune.mat
Descrizione stratigrafica: Descrizione.mat
Coordinata Gauss-Boaga Est: GausEST.mat
Coordinata Gauss-Boaga Nord: 'GausNORD.mat
Letto [m]: Letto.mat
Letto [m.s.l.m]: Lettomslm.mat
Tetto [m]: Tetto.mat
Tetto [m.s.l.m]: Tettomslm.mat
Quota [m.s.l.m]: Quota.mat
Spessore [m]: Spessore.mat
Materiale prevalente nello strato: UNIQUE.mat
(es. "Ghiaia" o "Argilla")
Strati costituiti da Argilla/Limo: LIMOARGILLA.mat
(Là dove è presente uno strato di Argilla il vettore riporta 1, in caso contrario 0)
```

La totalità dei vettori sopra importati costituirà l' "Tot\_Input" e l' "Tot\_Output" delle funzioni sotto implementate.

#### 2) Definizione di un'area di analisi

Attraverso l'imposizione delle coordinate di una specifica area si circoscrivono le stratigrafie da analizzare.

```
Xmax=1486325.02;
Xmin=1471835.37;
Ymax=5060160.4;
Ymin=5044258.47;
cercaXmax=find(GausEST<Xmax);
cercaXmin=find(GausEST>Xmin);
cercaYmax=find(GausNORD<Ymax);
```



```
cercaYmin=find(GausNORD>Ymin);
```

### 3) Individuazione di tutti gli strati di Argilla e Limo di ogni stratigrafia

Di fatto, si riduce ogni indagine verticale ai soli strati di Argilla/Limo sfoltendo la stratigrafia da tutti gli elementi litologici con permeabilità elevata, quali Ghiaia e sabbia non costituenti l'acquitrando.

```
cercaArgilla = find (LIMOARGILLA==1);
```

### 4) Definizione della fascia di analisi

Sulla base di elaborati pregressi, trattanti il medesimo acquifero, si è stimato che il tetto dell'acquitrando sia situato ad una profondità variabile dal piano campagna di circa 80-110m.

La finalità di questo filtro è quella di spuntare ulteriormente le stratigrafie prendendo in esame i soli strati di materiale argilloso aventi Tetto [m] compreso in un intervallo variabile definito da un limite superiore ed inferiore dalla quota campagna.

```
limitesup=50;  
cercaProfonditaSup=find((Quota-Tettoms1m)>=limitesup);  
limiteinf=150;  
cercaProfonditaInf=find((Quota-Tettoms1m)<=limiteinf);
```

### 5) Funzione: riduci\_stratigrafie

```
cercaUNIQUE = unique([cercaArgilla;cercaProfonditaSup;  
cercaProfonditaInf;cercaXmax;cercaXmin;cercaYmax;cercaYmin]);  
[Output] = riduci_stratigrafie [Tot_Input,cercaUNIQUE]
```

La funzione prende in ingresso tutti i dati di input (1194) e il vettore cercaUNIQUE, contenente gli indici degli strati aventi verificato i punti (2-3-4); in uscita otterremo una parte delle stratigrafie (187), ciascuna delle quali è costituita da uno o più strati di argilla.

Dovendo ottenere per ogni stratigrafia un singolo strato di argilla, costituente l'acquitrando, sono introdotti ulteriori filtri.

### 6) Funzione: unisci\_strati

Data la presenza di più strati successivi di materiale argilloso/limoso presenti nella stessa stratigrafia, si è deciso di unirli rendendoli uno strato unico di materiale.

Per quanto banale possa sembrare tale passaggio, vi è di fondo la necessità di evitare la perdita di informazioni stratigrafiche legate all'esiguo spessore (vd punto (8)) dei singoli strati che, una volta uniti, costituirebbero un unico elemento non più trascurabile.

```
[Tot_Output] = unisci_strati [Tot_input]
```

La funzione, analizza una ad una le stratigrafie precedentemente rielaborate, valutando tra i singoli strati di argilla che costituiscono una singola indagine, se ve ne siano alcuni che tra loro sono adiacenti verticalmente.

In caso affermativo la funzione compatta gli strati ricalcolando lo spessore e le nuove quote di tetto e letto associate.

#### 7) Funzione: Compatta\_strati

In maniera analoga a quanto eseguito al punto (6), la funzione qui implementata vuole ridurre ulteriormente il numero di strati di argilla presenti in una singola stratigrafia.

In particolare, si è cercato di compattare gli strati argillosi intervallati da possibili lenti di materiale tra due strati argillosi-limosi.

```
spessorelimite=0.5  
[Tot_Output] = Compatta_strati [Tot_Input, spessorelimite]
```

La funzione analizza in successione gli strati di argilla costituenti ogni singola stratigrafia; nel caso in cui la differenza tra il letto e il tetto di due strati risultasse inferiore allo spessore limite il codice compatterebbe gli strati costituendone uno solo, analogamente a quanto fatto al punto (7).

Ovviamente, sono state eseguite diverse analisi di sensitività dalle quali è emerso che: l'applicazione di questa funzione non ha generato grandi ripercussioni sui dati, difatti variando lo spessore limite tra 0.5 e 2 m si è ridotto il numero di stratigrafie aventi più di uno strato di argilla del 1-3%.

#### 8) Funzione: Spessore\_strati

Tale filtro risulta il più restrittivo adottato, poiché trascura di ogni stratigrafia gli strati di materiale aventi spessore inferiore ad una certa metratura.

Nell'analisi proposta si è deciso di discriminare gli strati aventi spessore inferiore a 5 m; poiché insufficiente per poter costituire uno strato consistente di acquitrando tale da separare in maniera netta l'acquifero superficiale da quello profondo.

```
spessorelimite=5;  
[Tot_Output] = Spessore_strati [Tot_Input, spessorelimite]
```

La funzione prendendo in ingresso tutto le stratigrafie, confrontando ogni singolo strato con il parametro discriminante. Nel caso in cui lo spessore dovesse risultare inferiore si eliminerà lo strato lasciando e nel caso la stratigrafia ad esso associata.

Nonostante i filtri fino ad ora introdotti, sono ancora presenti diverse stratigrafie aventi più strati di argilla tali da poter costituire l'acquitardo.

Per poter trattare definitivamente questa parte di dati sono state scritte due varianti di codice:

A) Funzione: Primo\_strato

```
[Tot_Output]= Primo_strato [Tot_Input]
```

La variante di codice qui implementata, prenderà di ciascuna stratigrafia avente più di uno strato, quello con quota maggiore considerando di fatto la prima superficie di separazione utile per la definizione dell'acquitardo.

B) Funzione: Spessore\_massimo

```
[Tot_Output]= Spessore_massimo [Tot_Input]
```

Il secondo metodo, anch'esso molto brutale, confronterà di ciascuna stratigrafia gli strati di cui è composta lasciando solo quello con spessore maggiore ed eliminando i restanti.

Note le criticità associate a ciascuna variante di codice, si è deciso di confrontare i risultati ottenuti con le varianti di codici A – B.

9) Funzione: Approccio\_visivo

```
[Tot_Output]=approccio_visivo[Tot_Input_A;Tot_Input_B;Tot_Input_C]
```

La funzione di confronto, prende in ingresso la totalità dei vettori tratti con le diverse varianti di codici A-B.

A parità di stratigrafie, si è confrontata la quota di Tetto [m.s.l.m] individuata da ciascun codice così come lo spessore e le altre informazioni associate.

Su di un totale di 142 stratigrafie in ingresso alle funzioni 8 e 9, il 69% (98 stratigrafie) risultava avere lo stesso valore di Tetto [m.s.l.m]. Le restanti 44 sono state analizzate manualmente effettuando confronti visivi, definendo così la nuvola di punti finale impiegata nel *Paragrafo 3.2*.

## VII. Appendice VII: Criteri di selezione di un modello in un'analisi multi-modello

### VII.1 Crossvalidazione

Una delle tecniche di validazione utilizzate per verificare l'attendibilità del modello di variogramma scelto è la cross-validazione [Isaaks e Srivastava, 1989]. In accordo con una procedura geostatistica standard, un modello di variogramma è cross-validato se: (1) la distribuzione degli errori di stima è simmetrica, centrata attorno allo zero e con dispersione minima; (2) il grafico della corrispondenza tra gli errori di stima ed i valori stimati è centrato attorno alla linea dello zero; (3) gli errori di stima non manifestano correlazione spaziale. A titolo di esempio, la *Figura VII-2* mostra i risultati ottenuti per il caso in cui il sistema è modellato come costituito da una "unica facies", utilizzando un modello di semivariogramma sferico. Nel dettaglio, si è riportata la distribuzione dell'errore (*Figura VII-2a*), la stima dell'errore in funzione del valore stimato (*Figura VII-2b*) e la stima di Y in funzione del valore reale misurato (*Figura VII-2c*) e la stima di Y in funzione del valore reale misurato (*Figura VII-2d*).

Come è noto, questi risultati non dovrebbero essere interpretati come statistiche test sulla base delle quali condurre la verifica di un'ipotesi, ma, piuttosto, dovrebbero essere esaminati nel loro complesso in modo tale da confrontare gli effetti della scelta di diverse strutture (e relativi parametri) di variogramma. Su queste basi, si conclude assumendo i modelli ed i parametri usati come adatti a fornire una rappresentazione adeguata della variabilità strutturata dei parametri di interesse nell'area in esame.

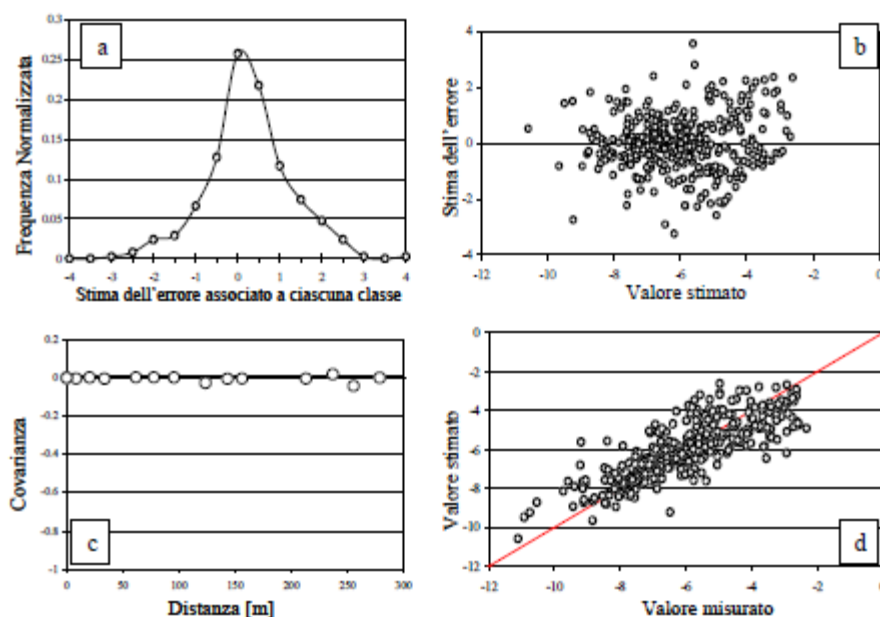


Figura VII-1: Validazione del variogramma di Y nel caso di sistema "unica facies"

## VII.2 Model Validation Criteria (KIC, BIC, AIC, AICc)

I sistemi idrologici sono aperti e complessi, rendendo quindi la loro interpretazione propensa verso approcci multi - modello e a descrizioni di tipo matematico, non curanti della quantità e della qualità dei dati disponibili. È presente una crescente tendenza di postulare differenti modelli idrologici alternativi per il sito interessato e usare a posteriori dei criteri di selezione tra questi (*model selection criteria* anche detti *model discrimination* o *information theoretic criteria*) affinché si possano classificare in ordine di importanza i modelli, eliminare alcuni di questi e/o pesare e mediare i risultati ed i dati statistici generati dai diversi modelli. I criteri di discriminazione più comuni sono ad esempio *AIC* [Akaike, 1974], *AICc* [Hurvich and Tsai, 1989], *BIC* [Schwartz, 1978], *KIC* [Kashyap, 1982]. Tali criteri discriminano tra diversi modelli sulla base di come meglio questi riproducono le osservazioni idrologiche usando il maximum likelihood delle stime dei parametri del modello (favorendo il modello che riproduce il comportamento osservato in maniera migliore) e su quanti parametri questi contengono (penalizzando i modelli che ne contengono di più). In aggiunta il *KIC* considera il likelihood delle stime dei parametri alla luce dei loro valori di primo tentativo (quando questi sono disponibili) e contiene un termine che è la matrice di informazione di Fisher (Fisher information matrix term), non presente per gli altri criteri.

I modelli che presentano un valore più piccolo di un dato criterio sono più affidabili rispetto a quelli a cui è associato un valore più alto. Diventa irrilevante il valore assoluto del valore del criterio.

Considerando un insieme  $M$  di  $k$  diversi modelli interpretativi,  $M_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ , i parametri *AIC*, *AICc*, *BIC*, *KIC* sono definiti per il modello  $M_k$  come di seguito:

$$AIC_k = -2\ln[L(\hat{\beta}_k|z^*)] + 2N_k \quad (VII.1)$$

$$AICc_k = -2\ln[L(\hat{\beta}_k|z^*)] + 2N_k + \frac{2N_k(N_k+1)}{N_z - N_k - 1} \quad (VII.2)$$

$$BIC_k = -2\ln[L(\hat{\beta}_k|z^*)] + N_k \ln N_z \quad (VII.3)$$

$$KIC_k = -2\ln[L(\hat{\beta}_k|z^*)] + 2\ln p(\hat{\beta}_k) + N_k \ln \frac{N_z}{2\pi} + \ln |\overline{F}_k| \quad (VII.4)$$

Dove  $\hat{\beta}_k$  è il maximum likelihood (*ML*) stimato di un vettore  $\hat{\beta}_k$  degli  $N_k$  parametri da valutare del modello  $M_k$  (che potrebbe includere parametri statistici dei dati di calibrazione);  $z^*$  è un vettore delle osservazioni di  $N_k$  variabili (idrologiche) casuali  $z$  del sistema, nello spazio e nel tempo;  $-2\ln[L(\hat{\beta}_k|z^*)]$  è il minimo della funzione *negative log-likelihood* (*NLL*)

$-\ln[L(\beta_k|z^*)]$  che ricorre, per definizione, a  $\hat{\beta}_k$ ;  $p(\hat{\beta}_k)$  è la probabilità a priori di  $\beta_k$  valutata per  $\hat{\beta}_k$ ;  $\bar{F}_k = F_k/N_z$  è la matrice delle informazioni di Fisher normalizzata (rispetto a  $N_z$ ) e osservata (implicitamente condizionata dalle osservazioni  $z^*$  e valutata per il parametro di maximum likelihood  $\hat{\beta}_k$ ), avente elementi [Kashyap, 1982].

$$\bar{F}_{k,ij} = \frac{1}{N_z} F_{k,ij} = -\frac{1}{N_z} \frac{\partial^2 \ln -\ln[L(\beta_k|z^*)]}{\partial \beta_{ki} \partial \beta_{kj}} \Big|_{\beta_k = \hat{\beta}_k} \quad (\text{VII.5})$$

Il primo termine di ogni criterio,  $-|2\ln[L(\beta_k|z^*)]|$ , misura la bontà dell'adattamento tra i valori osservati e quelli stimati delle condizioni del sistema,  $\hat{z}$  e  $z^*$  rispettivamente; il più piccolo tra questi termini corrisponde all'adattamento migliore. I termini che contengono  $N_k$  rappresentano la misura della complessità del modello. Tali criteri considerano (a vari livelli) il principio di parsimonia, penalizzando i modelli per la presenza di un numero maggiore di parametri se questi non portano ad un corrispondente miglioramento nell'adattamento del modello.

Espressioni equivalenti alle (VII.1) – (VII.4) per il caso delle Gaussian likelihood functions, che corrispondono a schemi di stima di parametri sulla base dei minimi quadrati, sono implementati in diversi codici idrologici di inversione come ad esempio il PEST [Doherty, 2006] e il MODFLOW2000 [Hill et al., 2000].

*AIC* è basato sull'informazione di Kullback – Leibler [Akaike, 1974; Linhart and Zucchini, 1986; Bozdogan, 1987] quindi sulla misura della discrepanza tra una rappresentazione della realtà (modello) vera, ma non conosciuta, dalla quale si ricavano le osservazioni  $z^*$ , ed una rappresentazione approssimata della stessa realtà. Se  $N_z/N_k$  decresce, *AIC* diventa progressivamente più condizionato, proprietà perfezionata dall'*AICc*. È conveniente usare *AICc* quando  $N_z/N_k$  è minore di 40. *BIC* è stato derivato in un contesto Bayesiano come un'approssimazione asintotica ad una trasformazione di una probabilità a posteriori di un modello candidato. È stato notato in molti campioni [Cavanaugh and Neath, 1999] che *BIC* favorisce il modello che è a posteriori più probabile e che quindi risulta il più plausibile alla luce dei dati disponibili. Assumendo che i dati siano generati da un modello che appartiene ad un insieme di modelli candidati e che rende *BIC* consistente (la dimensione del campione  $N_z$  aumenta tendendo a  $N_k$ ), il criterio tende ad identificare questo generatore come un modello vero con probabilità uno.

Anche il *KIC* è derivato da un contesto Bayesiano come un'approssimazione asintotica al modello di likelihood. Come il *BIC*, il *KIC* è stato originariamente derivato dall'assunzione che il modello (vero), avendo generato alcuni dati, appartiene al set dei modelli candidati tra cui scegliere quello esatto. *KIC* è asintotico nel senso che l'approssimazione migliora verso  $p(z^*|\beta, M_k)$  diventando più simile a  $\hat{\beta}_k$ , che generalmente accade quando il numero  $N_z$  delle

osservazioni cresce. È stato proposto di utilizzare il *KIC* nel contesto del maximum likelihood BMA (MLBMA) [Neuman, 2003]. Si è ben stabilito che il *KIC* tende asintoticamente al *BIC* quando diventa grande nei confronti di  $N_k(N_z/N_k \rightarrow \infty)$ . Quando  $N_z$  non è grande, il *BIC* a volte preferisce i modelli con meno parametri ed in questo caso il *KIC* è il criterio più appropriato da utilizzare. È stato notato che se  $N_z > 8$ , il termine  $N_k \ln N_z$ , che penalizza il criterio *BIC*, è più grande di  $2N_k$  (VII.20), che penalizza l'*AIC*, concludendo che il primo si colloca più in rilievo nella parsimonia di quanto faccia il secondo.

Un rimprovero che è possibile fare al *BIC* (e di conseguenza al *KIC*) è che assume uno dei modelli presi in considerazione come vero, dunque il *BIC* e il *KIC* sono inappropriati nelle applicazioni in cui i modelli sono, per necessita, semplificazione della realtà.

La maggiore differenza tra *AIC*, *AICc*, e *BIC* con il *KIC* è la presenza del termine informativo di Fisher  $\ln|\bar{F}_k|$ . Per spiegare il ruolo che  $\ln|\bar{F}_k|$  gioca all'interno del *KIC*, si può considerare un vettore casuale degli scarti  $\varepsilon^* = z^* - z$  distribuito seguendo

un andamento Gaussiano con media nulla ed una matrice di covarianza  $C_z$  (le osservazioni che non seguono un andamento Gaussiano possono essere trasformati in una forma Gaussiana). Si può vedere  $z$  come il vettore stocastico o deterministico delle osservazioni vere mentre  $z^*$  come il vettore del campione dei valori stocastici di  $z$  o come il vettore dei valori reali di  $z$  corretti dagli errori. Scrivendo  $C_z = |TT^T$  dove  $T$  è una matrice triangolare superiore o inferiore (sono possibili anche altre scomposizioni), si può scrivere  $\varepsilon^* = T\xi^*$ , dove  $\xi^*$  è un vettore casuale delle mutue componenti scorrelate avente media nulla e varianza unitaria. Quindi, la somma dei quadrati pesati  $\varepsilon^{*T}C_z^{-1}\varepsilon^*$  che entra nel Gaussian likelihood

$$L(\beta|z^*) = p(z^*|\beta) = (2\pi)^{-N_z/2}|C_z|^{-1/2} \exp\left(-\frac{1}{2}\varepsilon^{*T}C_z^{-1}\varepsilon^*\right) \quad (\text{VII.6})$$

può essere rimpiazzato dalla semplice somma di quadrati  $\xi^{*T}\xi^*$  le quali componenti sono indipendenti ed identicamente distribuite. Si può quindi scrivere  $\ln|\bar{F}_k|$  come la (VII.5).

Se le informazioni contenute dalle osservazioni, come espresso dal termine  $\ln|\bar{F}_k|$ , non variano da modello a modello, il *KIC* premia i modelli in funzione della qualità dell'adattamento tra i dati stimati e quelli osservati (come misurato dal  $NLL - 2\ln[l(\hat{\beta}_K|Z^*)]$ , comune ai quattro criteri) e tra i parametri stimati a posteriori ed i valori iniziali (come misurato da  $-2\ln(\hat{\beta}_K)$ , che come detto non è incluso nel *BIC* e non appare essere una valida componente dell'*AIC* e dell'*AICc*). Allo stesso tempo il *KIC* penalizza i modelli in proporzione al loro numero di parametri  $N_K$  attraverso il termine  $N_K \ln \frac{N_z}{2\pi}$ , che differisce dai corrispondenti termini del *BIC*, *AIC* e *AICc* e dipende in maniera minore dalla dimensione del campione rispetto al *BIC* (in cui il termine corrispondente è  $N_K \ln N$ ). In più, tra i modelli aventi lo stesso numero di parametri e lo stesso valore di  $\ln|\bar{F}_k|$ , il *KIC* favorisce i modelli con un contenuto informativo, per osservazione, relativamente piccolo. Questo è consistente con il criterio di sufficienza [Fisher, 1922, p. 316]. Se all'aumento del contenuto informativo di un

modello, fallisce il miglioramento delle sue performances relativamente ad un altro modello, allora la selezione di un modello con un contenuto informativo maggiore, in accordo con il *KIC*, può essere non giustificata.

La presenza di  $\ln|\bar{F}_k|$  nel *KIC* è il motivo principale della preferenza di questo criterio rispetto agli altri perché permette la discriminazione tra i modelli non basandosi unicamente sull'adattamento alle osservazioni e su quanti parametri contiene, ma anche su quanto i parametri stimati a posteriori sono vicini ai loro valori di primo tentativo e quante informazioni attese sono contenute in ogni osservazione.

Ai fini pratici, è importante conoscere il valore del *negative log-likelihood (NLL)*. Esprimendo la matrice di covarianza degli errori sulle osservazioni come  $C_z = \sigma^2 \omega^{-1}$  [Carrera and Neuman, 1986a; Hill, 1998] dove  $\omega$  è una matrice di pesi nota  $\sigma^2$  e è la varianza degli errori, nota o non nota, si può scrivere

$$-2\ln[L(\beta_k|z^*)] = N_z \ln(2\pi) + N_z \ln \sigma^2 + \ln|\omega^{-1}| + \frac{\varepsilon^{*T} \omega \varepsilon^*}{\sigma^2} \quad (\text{VII.7})$$

Se  $\sigma^2$  è noto,  $\beta_k = \theta_k$  dove  $\theta_k$  è un vettore che contiene i  $P_k$  parametri idrologici del modello così che  $N_k = P_k$ , mentre se  $\sigma^2$  non è noto si considera un vettore  $\beta_k = \{\theta_k, \sigma^2\}$  di dimensione  $N_k = P_k + 1$ .

Considerando  $\hat{\sigma}_{ML}^2 = \frac{SSR_k}{N_z}$  con  $SSR_k$  la funzione obiettivo del modello e apportando opportune sostituzioni alla (VIII.6) [Ye et al., 2008] si ottiene

$$-2\ln[L(\beta_k|z^*)] = NLL_k = N_z \ln(2\pi) + N_z \ln \hat{\sigma}_{ML}^2 + \ln|\omega^{-1}| + N_z \quad (\text{VIII.8})$$

I termini  $N_z \ln(2\pi)$ ,  $\ln|\omega^{-1}|$  e  $N_z$  sono costanti (indipendenti dalla scelta del modello o dei parametri) quindi non influenzano la selezione del modello o il relativo peso. Sostituendo la (VII.8) e  $N_k = P_k + 1$  n (VII.1) – (VII.4) ed escludendo le costanti si arriva a

$$AIC_k = N_z \ln \hat{\sigma}_{ML}^2 + 2P_k \quad (\text{VII.9})$$

$$AICc_k = N_z \ln \hat{\sigma}_{ML}^2 + 2P_k + \frac{2N_k(N_k + 1)}{N_z - N_k - 1} \quad (\text{VII.10})$$

$$BIC_k = N_z \ln \hat{\sigma}_{ML}^2 + P_k \ln N_k \quad (\text{VII.11})$$

$$KIC_k = N_z \ln \hat{\sigma}_{ML}^2 - 2 \ln p(\hat{\theta}_k) - P_k \ln 2\pi - \ln|\Sigma_k| \quad (\text{VII.12})$$



con  $2\ln p(\hat{\theta}_k)$  trascurato quando non sono disponibili informazioni a priori riguardanti i parametri idrologici.  $J_k^T \omega J_k = \bar{F}_k$  sarebbe il termine di Fisher dove  $J_k$  è la matrice Jacobiana (sensitività) avente elementi  $J_{kij} = -\partial z_i / \partial \theta_{kj} \big|_{\theta_k = \hat{\theta}_k}$ . Considerando si ottiene

$$KIC_k = (N_z - P_k) \ln \hat{\sigma}_{ML}^2 - P_k \ln 2\pi + \ln |J_k^T \omega J_k| \quad (\text{VII.13})$$

Il termine  $\ln |\Sigma_k|$  è uno dei risultati che il codice di ottimizzazione PEST [Doherty, 2006] restituisce all'interno della sezione *Parameter covariance matrix*.

## VIII. Appendice IX: Il codice numerico MODFLOW

### VIII.1 Discretizzazione spaziale

Il programma legge da opportuni file di input le informazioni che definiscono in maniera univoca le dimensioni delle singole celle che costituiscono la griglia di calcolo. Tale griglia deve essere rettangolare lungo una qualsiasi sezione orizzontale, mentre può essere distorta lungo la direzione verticale. Le dimensioni orizzontali della griglia sono specificate dalle variabili DELR e DELC. Le colonne sono numerate a partire dal lato sinistro della griglia, mentre le righe sono numerate a partire dal lato superiore. Infine i layer sono numerati a partire dallo strato superiore verso quello inferiore. Le informazioni relative alla geometria della griglia sono completamente definite all'interno del file denominato *discretization file*.

### VIII.2 Discretizzazione temporale

L'entità principale che definisce la discretizzazione temporale è il passo di discretizzazione. Un insieme di passi di discretizzazione costituisce un periodo di discretizzazione. Per ogni periodo, devono essere specificati (a) la lunghezza totale (PERLEN), (b) il numero di passi di discretizzazione (NSTP) e (c) il fattore di moltiplicazione da applicare alla durata del successivo passo di discretizzazione (TSMULT). Si ottiene in questo modo una serie geometrica, nella quale la lunghezza del primo passo di discretizzazione è dato dalla formula:

$$\Delta t_l = PERLEN \left( \frac{TSMULT-1}{TSMULT^{NSTP}-1} \right) \quad (VIII.1)$$

MODFLOW è in grado di simulare sia le condizioni di stato stazionario sia quelle di stato transitorio. Nel caso venga simulata una situazione di flusso in condizioni stazionarie, nell'equazione del flusso il termine di accumulo è nullo; essendo questo l'unico termine nell'equazione che dipende dalla variabile temporale, nel caso di simulazione di flusso allo stato stazionario la lunghezza del periodo di discretizzazione non ha alcuna influenza sulla distribuzione dei carichi idraulici calcolata. Le informazioni relative alla discretizzazione temporale adottata sono contenute all'interno del file denominato *discretization file*. Le simulazioni, nel caso in esame, sono state condotte allo stato stazionario: si è impostato un unico passo temporale ed unico periodo.

### VIII.3 Risoluzione dell'equazione del flusso

L'equazione alle derivate parziali del flusso implementata da MODFLOW è (McDonald e Harbaugh, 1988, p. 1-2).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x(\bar{x}) \frac{\partial h(\bar{x}, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y(\bar{x}) \frac{\partial h(\bar{x}, t)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z(\bar{x}) \frac{\partial h(\bar{x}, t)}{\partial z} \right) - f(\bar{x}, t) = S(\bar{x}) \frac{\partial h(\bar{x}, t)}{\partial t} \quad (VIII.2)$$

dove  $K_x$ ,  $K_y$  e  $K_z$  sono i valori della conduttività idraulica lungo gli assi x, y e z del sistema di riferimento principale (L/T),  $h$  è il valore del carico idraulico (L),  $W$  rappresenta il flusso volumetrico di acqua per unità di volume associato a sorgenti/serbatoi presenti all'interno del sistema ( $T^{-1}$ ),  $S_s$  è il coefficiente di storattività ( $L^{-1}$ ) e infine la variabile  $t$  rappresenta il tempo (T). MODFLOW risolve l'equazione (VIII.2) utilizzando un metodo alle differenze finite applicato ad un sistema suddiviso in celle. All'interno di ogni singola cella il carico idraulico viene valutato rispetto ad unico singolo punto baricentrico, detto nodo. L'equazione alle differenze finite per una cella è (McDonald e Harbaugh, 1988, p. 2-18).

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\ & CC_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + \\ & P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k} (DEL R_j \times DEL C_j \times THICK_{i,j,k}) \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}} \end{aligned} \quad (VIII.3)$$

dove  $h_{i,j-1,k}^m$  rappresenta il carico idraulico in corrispondenza della cella  $i,j,k$  al tempo  $m$  (L),  $CV$ ,  $CR$  e  $CC$  sono le conduttività idrauliche tra i nodi  $i,j,k$  e i nodi adiacenti ( $L^2/T$ ), è la somma dei coefficienti di carico relativi ai termini di pozzo/sorgente ( $L^2/T$ ),  $Q_{i,j,k}$  è la somma delle portate relative ai termini di pozzo/sorgente ( $L^3/T$ ),  $S_s$  è il coefficiente di storattività ( $L^{-1}$ ),  $DEL R_j$  è la dimensione della colonna  $j$  in tutte le righe (L),  $DEL C_i$  è la dimensione della riga  $i$  in tutte le colonne (L),  $THICK_{i,j,k}$  è lo spessore verticale della cella  $i,j,k$  (L) e  $t^m$  è il tempo al passo temporale  $m$  (T). Per definire la conduttività idraulica fra nodi adiacenti e distinguerla dalla conduttività idraulica all'interno della cella, viene utilizzato il pedice  $\frac{1}{2}$ . Per esempio, rappresenta la conduttività tra i nodi  $i,j,k$  e  $i,j+1, k$ . La conduttività tra due nodi viene valutata attraverso la media aritmetica dei valori di conduttività associati ai nodi dei due blocchi adiacenti. Come sottolineato in precedenza, per condizioni di flusso allo stato stazionario, il termine che rappresenta l'accumulo, ossia il termine a destra del segno di uguale nell'equazione (VIII.3), si annulla.

L'applicazione dell'equazione (VIII.3) alle celle che costituiscono la griglia di calcolo definisce un sistema di equazioni che vengono risolte in corrispondenza di ogni singolo nodo. L'equazione che viene risolta dal calcolatore è:

$$\begin{aligned} & CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} h_{i,j,k-1}^m + CR_{i,j-\frac{1}{2},k} h_{i,j-1,k}^m + CC_{i-\frac{1}{2},j,k} h_{i-1,j,k}^m + \\ & \left( CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} + CR_{i,j-\frac{1}{2},k} + CC_{i-\frac{1}{2},j,k} - \right) h_{i,j,k}^m + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} h_{i,j,k+1}^m + \\ & CR_{i,j+\frac{1}{2},k} h_{i,j+1,k}^m + CC_{i+\frac{1}{2},j,k} h_{i+1,j,k}^m = RHS_{i,j,k} \end{aligned} \quad (VIII.4)$$

L'equazione (VIII.4) si applica al passo temporale  $t$ ;  $HCOF_{i,j,k}$  contiene  $P_{i,j,k}$  e la parte negativa del termine di accumulo che include il carico al passo temporale corrente (il segno negativo deriva dall'aver spostato il termine a sinistra del segno di uguale nell'equazione).

RHS include  $-Q$  (il segno negativo deriva dall'aver spostato il termine a destra del segno di uguale nell'equazione) e la parte del termine di accumulo che viene moltiplicata di un fattore pari al valore del carico al passo temporale  $m-1$ .

Va sottolineato che una variabile denominata IBOUND viene definita per ogni singola cella e specifica se (a) la cella è attiva, ossia il carico idraulico deve essere valutato, (b) la cella non è attiva, ossia il flusso idrico non coinvolge la cella, (c) la cella presenta un carico idraulico costante. L'equazione (VIII.4) viene quindi risolta solo in corrispondenza delle celle definite attive dalla variabile IBOUND.

### VIII.3 Metodo di risoluzione

Tra i diversi metodi risolutivi implementati in MODFLOW (PCG, WHS, , SIP, SOR, etc...) per risolvere il sistema di equazioni derivante dal metodo alle differenze finite, è stato scelto il metodo definito WHS Solver. Tale metodo richiede che vengano definiti, in un opportuno file di input, i seguenti parametri:

- MXITER, il massimo numero di iterazioni esterne, ossia il massimo numero di chiamate alla routine di risoluzione.
- ITER1, il numero di iterazioni interne alla routine di risoluzione.
- HCLOSE, il valore di convergenza valutato rispetto alla variazione del carico idraulico durante il processo iterativo, (L); quando il valore massimo assoluto della differenza di carico fra tutti i nodi durante una iterazione è minore o uguale a HCLOSE e contemporaneamente viene soddisfatto anche il criterio definito da RCLOSE (vedi sotto), il processo iterativo si interrompe.
- RCLOSE, il valore di convergenza valutato rispetto alla variazione del flusso idrico durante il processo iterativo ( $L^3/T$ ).
- DAMP, un fattore che permette di ridurre la variazione sul carico calcolato durante ogni iterazione successiva.
- RSCRIT, un parametro che fornisce un altro metodo di controllo per la convergenza di ogni iterazione.
- Factorization Level, parametro che può assumere valore 0 o 1. Level 0 richiede più iterazioni esterne, ma meno memoria; Level 1 richiede meno iterazioni, ma più memoria.

Il valore dei parametri appena descritti imposti durante le simulazioni del flusso effettuate sono riportati in *Tabella VIII.1*.

MXITER [-]	ITER1 [-]	RCLOSE [-]	RCLOSE [m <sup>3</sup> /s]	DAMP [-]	RSCRIT [-]	Level [-]
2000	50	0.1	0.1	1	0	0

*Tabella VIII-1: Parametri di ingresso relativi al metodo risolutivo WHS*



## IX. Appendice IX: Stima della Permeabilità

La problematica della stima dei parametri che governano un processo fisico interpretato tramite un modello è una delle questioni di maggiore interesse all'interno dell'idrologia, che come noto è una scienza in cui la componente legata alla conoscenza delle condizioni in cui si svolge il processo è molto importante. Matematicamente questo può essere visto come la relazione tra i parametri  $p$  che caratterizzano un modello e le osservazioni collegate,  $d$

$$G(p) = d \quad (IX.1)$$

dove  $G$  descrive la fisica del processo investigato.

Un primo metodo per poter affrontare tale situazione può essere l'utilizzo di un modello diretto [Stallman, 1956], basato sulla semplice sostituzione dei dati all'interno delle equazioni che governano il flusso, che conducono ad equazioni differenziali del primo ordine.

Questo approccio può essere utilizzato quando il numero dei parametri non noti risulta più piccolo, o al limite uguale, del numero di equazioni alle differenze finite che risolvono il problema originale. Il metodo diretto tratta la conduttività come non nota e i carichi come noti seguendo lo spirito della formulazione di Cauchy. In questo modo il problema può essere affrontato senza effettuare iterazioni.

Questo però comporta la conoscenza dei valori del carico su tutto il dominio, nello spazio e nel tempo. Si giunge a ciò soltanto con delle interpolazioni che comportano quindi degli errori. In più, la soluzione risulta generalmente instabile.

Un altro approccio è quello della modellazione inversa che si propone di identificare il modello e soprattutto stimare i parametri che lo governano come possono essere la conduttività idraulica, la permeabilità o la dispersività. Questa è una delle tecniche più utilizzate e sicuramente più affidabili per definire le caratteristiche dell'eterogeneità spaziale di parametri del sottosuolo come permeabilità e/o trasmissività o per dedurre le sollecitazioni al sistema (ricarica, flussi, carichi,...) a partire da alcune "informazioni" che possono essere flussi, carichi idraulici o concentrazioni di contaminanti.

I metodi indiretti consistono nell'ammissione che le misure contengano degli errori o delle incertezze e cercano i parametri del modello che minimizzano tali errori.

L'approccio è chiamato indiretto perché il problema è non lineare sui parametri e si propone di risolvere iterativamente attraverso la ripetizione delle simulazioni.

Il problema della stima opera con il concetto di insieme di parametri "ottimali" per un modello. La questione che si pone è di cosa si intende esattamente per ottimale. Infatti possono essere ricavati diversi set di parametri che interpretano e rappresentano correttamente la realtà.

Diversi sono i metodi che si possono utilizzare per trovare l'”ottimo”. In questi metodi, i parametri vengono definiti come il minimo di una funzione obiettivo. Inizialmente si parlava di funzione obiettivo allo stesso modo di un fittaggio di un modello, quindi attraverso la corrispondenza migliore tra i dati calcolati e misurati. Questa conformità può ad esempio essere valutata attraverso le differenze quadratiche, come nel caso di misure e valori calcolati di carico. Queste differenze quadratiche sono interpretate matematicamente da una norma (chiamata norma  $L_2$ ). Sono disponibili altre norme, esempio il valore assoluto delle differenze tra valori misurati e calcolati (norma  $L_1$ ). Ogni norma presenta alcuni vantaggi. Infatti la norma  $L_2$  è molto più sensibile agli outliers che  $L_1$ , che al contrario è più difficile da trattare. Usando la norma  $L_2$ , la funzione obiettivo può essere scritta come

$$F_h = (h - h^*)^T C_h^{-1} (h - h^*) \quad (IX.2)$$

Dove  $C_h^{-1}$  è una matrice dei pesi. Quando  $F_h$  è usato come funzione obiettivo, il problema spesso diventa mal posto. La soluzione diventa instabile e diversi set di parametri conducono a valori molto simili di  $F_h$ . Spesso questo è causato da un'elevata sensitività ai parametri iniziali che potrebbero condurre alla conclusione che la soluzione non è unica. Per superare questo problema è possibile fissare delle bande di variazione superiore e inferiore ai parametri da stimare, anche se questo non risolve la questione. Infatti la soluzione fluttua tra due bande arbitrarie, ma la sua attendibilità non migliora. Un'opzione da poter effettuare è quella di aggiungere alla funzione obiettivo un ulteriore termine [Neuman, 1973]:

$$F = F_h + \lambda F_p \quad (IX.3)$$

$$F = (p - p^*)^T C_p^{-1} (p - p^*) \quad (IX.4)$$

Il termine  $F_h$  può essere visto come un termine di regolarizzazione. In questo caso, nell'equazione (IX.2) il termine  $C_h^{-1}$  rappresenta la matrice di covarianza degli errori di misura. Il vantaggio della formulazione secondo la (IX.2), in un ambiente statistico, è che questa produce metodi per stimare non solo i parametri che controllano le proprietà di un acquifero, ma anche quelli che controllano la loro incertezza (varianza, variogramma e altri). La minimizzazione di una funzione obiettivo è un compito arduo perché le relazioni tra le variabili di stato ed i parametri sono di solito non lineari. Per questo i problemi inversi possono essere classificati come *lineari* e *non lineari*.

Un problema può essere linearizzato come segue:

$$h(p) = h_0 + J_{hp}(p - p^*) \quad (IX.5)$$

Dove  $J_{hp}$  è la matrice Jacobiana (matrice di sensitività) che contiene le derivate di  $h$  rispetto a  $p$ . La differenza principale tra i metodi lineare e non lineare è nella caratterizzazione dei parametri statistici e nella valutazione dell'incertezza.

Molti codici di calcolo, negli algoritmi di ottimizzazione, lavorano in questo modo; ad esempio il *PEST* [Doherty, 2006], seguendo lo schema che segue:

1. inizializzazione vettore dei parametri  $p^0$ ;
2. risoluzione del problema diretto  $h(p^1)$ , calcolo della funzione obiettivo  $F^1$  e della matrice Jacobiana  $J_{hp}$ ;
3. calcolo del vettore degli aggiornamenti, possibilmente utilizzando le informazioni dedotte dalle iterazioni precedenti come la matrice Jacobiana ed il gradiente di questa [LaVenue and Ramarao, 1992];
4. aggiornamento dei parametri  $p^{i+1} = p^i + d$
5. se è raggiunta la convergenza è possibile fermarsi, altrimenti  $i=i+1$  e tornare al passo 2.

Il processo è ripetuto fino a che si è attinta la convergenza e si sono ottenute le stime dei parametri e della varianza degli errori. La misura dell'accuratezza dell'ottimo è la magnitudine del gradiente di  $J$  rispetto ai parametri, indicata con la norma  $\|\nabla J\|$ . All'ottimo questa norma dovrebbe essere nulla. Un criterio proposto è che  $\|\nabla J\|/\|\nabla J\|_0 < \epsilon$  di un numero molto piccolo (esempio  $10^{-6}$ ) per un numero fissato di iterazioni (di solito 20) ( $\|\nabla J\|_0$  è la norma del gradiente iniziale).

Il calcolo della matrice Jacobiana di sensitività è la quantità che richiede l'onere computazionale maggiore all'interno del processo di inversione. È comunque importante, per valutarne l'attendibilità dell'inversione, la stima della sensitività. La sensitività è rappresentata dalle derivate delle variabili di stato rispetto ai parametri del modello. Possono essere sfruttate per due motivi: (1) possono essere utilizzate in molti metodi di ottimizzazione; (2) informano sull'attendibilità del modello e dei parametri stimati. La sensitività può essere ottenuta utilizzando tre diverse relazioni: (1) approssimazione delle derivate parziali attraverso le differenze finite; (2) derivazione diretta; (3) adjoint state method equations.

Il primo approccio è quello più comune [Porter and Hill, 2005; Doherty, 2002]. Questo è un modello indipendente e non richiede programmi aggiuntivi. Su questo si basa il software di ottimizzazione *PEST* [Doherty, 2006]. È ottimo per il calcolo parallelo quando il modello diretto richiede alti sforzi computazionali. Questo diventa impegnativo dal punto di vista computazionale all'aumentare del numero di parametri. Il tempo di esecuzione del calcolo per il modello inverso può essere approssimato conoscendo il tempo necessario al problema diretto ed il numero di parametri  $N_p$  da stimare.

$$T_{inverse} = 2 N_p \times T_{forward} \times (1 + N_p) \quad (IX.6)$$

dove:

$(1 + N_p)$  è il numero di soluzioni per iterazione di stima dei parametri

$2N_p$  è una media delle iterazioni dei parametri



Il metodo di derivazione diretta richiede la risoluzione di un sistema simile alle equazioni nel tempo. Ad esempio, nel caso di moto stazionario, se l'equazione che governa il modello è  $Ah = b$ , la derivata sarà  $A \frac{\partial h}{\partial p} = \frac{\partial b}{\partial p} - \frac{\partial A}{\partial p} h$ .

Anche questa metodologia è disponibile per il calcolo parallelo. Sfortunatamente l'implementazione è impegnativa, specialmente se le equazioni che governano il processo sono complesse.

Infine, l'Adjoint state method si basa sull'idea di minimizzare la funzione obiettivo come un problema di ottimizzazione con il rispetto di  $h$  e  $p$ , mentre si mantiene l'equazione di stato come una costrizione. Ad esempio, considerando il problema di moto stazionario  $\Psi = Ah - b$ , può essere definita la funzione di Lagrange  $L = J + \mu^T \Psi$  dove  $\mu$  è il vettore dei moltiplicatori di Lagrange. La derivata è la seguente:

$$\frac{dL}{dp} = \frac{dL}{dp} = \frac{\partial L}{\partial p} + \mu^T \frac{\partial \Psi}{\partial p} + \left[ \frac{\partial L}{\partial p} + \mu^T \frac{\partial \Psi}{\partial p} \right] \frac{dh}{dp} \quad (IX.7)$$

$M$  è arbitrario ed è possibile sceglierlo in modo che  $\frac{\partial L}{\partial p} + \mu^T \frac{\partial \Psi}{\partial p}$  quindi  $\mu^T A = -\frac{\partial J}{\partial h} = -2(h - h^*)C_h^{-1}$

La derivata della funzione di Lagrange diventa:

$$\frac{dL}{dp} = \frac{dL}{dp} = 2C_h^{-1}(p - p^*) + \mu^T \left( \frac{\partial A}{\partial p} h - \frac{\partial b}{\partial p} \right) \quad (IX.8)$$

Allo stesso modo è anche possibile calcolare la matrice Jacobiana. Questo metodo richiede  $N_h + 1$  run del modello diretto e quindi potrebbe essere più veloce (dell'approccio alle differenze finite) quando  $N_p > N_h$  (o  $N_p > N_h/2$  se si usa lo schema di differenze finite centrali).

Il costo computazionale della derivazione diretta e dell'adjoint methods può essere ridotto considerando anche che la matrice del sistema è identica per tutti i parametri.

Si può riassumere dicendo che la derivazione diretta e l'adjoint methods sono difficili da programmare (in relazione al metodo alle differenze finite), ma l'uso di queste metodologie può salvare il tempo della CPU (specialmente per i problemi non lineari).

Quindi la natura del problema diretto può influenzare la scelta del calcolo delle derivate. Ad esempio, se questo è non lineare (esempio il flusso nel non saturo), l'onere computazionale del problema diretto è molto alto e questo ha fatto sì che si usino le differenze finite anche grazie all'abilità di correlarsi con codici esterni.

Tra i metodi indiretti, le metodologie più utilizzate sono tre: (1) regressione dei minimi quadrati; (2) stima della massima verosimiglianza; (3) metodi Monte Carlo.

### IX.1 Parameter Estimation Model: PEST

PEST può essere considerato come un supporto che affiancato ad un qualsiasi modello esistente è in grado di dedurre quegli aspetti della realtà non accessibili attraverso la misurazione diretta. Generalmente il suo impiego ricade all'interno della calibrazione di un problema.

Se un sistema naturale o artificiale è soggetto ad alcune perturbazioni, ed i valori numerici di queste vengono forniti ad un modello che rappresenta tale sistema, diventa possibile configurare i parametri del modello stesso fintanto che i valori numerici da esso generati corrispondano più adeguatamente alle misurazioni effettuate sul sistema. Quando si raggiunge un simile risultato, è verosimile concludere che il modello riprodurrà adeguatamente il comportamento del sistema, e che così farà anche nel momento in cui verranno assegnati dei valori qualsiasi di perturbazione che non si intendono fornire al sistema nella realtà. In questo caso un modello si dice esser stato “calibrato”.

Sostanzialmente il ruolo del PEST è quello di gestire i parametri di un modello e/o le perturbazioni ad esso applicate in maniera tale da ridurre al minimo le discrepanze tra i valori numerici generati dal modello ed i corrispondenti valori misurati in laboratorio o sul campo. Esso è in grado di compiere ciò prendendo il pieno controllo del modello e mandandolo in esecuzione tante volte quanto è necessario per la determinazione dei parametri e/o delle perturbazioni ottimali.

### IX.2 Osservazioni e funzione obiettivo

Una volta interfacciato ad un modello, il compito del PEST è di minimizzare la somma pesata del quadrato delle differenze tra i valori delle osservazioni e quelli realmente misurati in laboratorio o sul campo; tale somma va sotto il nome di *funzione obiettivo*. Il fatto che queste differenze vengano pesate, rende alcune osservazioni più importanti di altre nel processo di ottimizzazione. I pesi dovrebbero essere inversamente proporzionali alla deviazione standard delle osservazioni, facendo sì che osservazioni “affidabili” abbiano un maggiore peso di quelle di cui non ci si può “fidare troppo”. Nel presente elaborato non si è applicato nessun peso alle osservazioni impiegate per la calibrazione.

### IX.3 L'algoritmo di stima dei parametri

I modelli lineari, per i quali, ad esempio, le osservazioni vengono calcolate dai parametri attraverso un'equazione in forma matriciale a coefficienti costanti, giungono al risultato ottimale in un solo step. Tuttavia per i problemi non lineari (molti modelli ricadono in questa categoria), la stima dei parametri diventa un processo iterativo. All'inizio di ogni iterazione, la relazione tra i parametri del modello e le osservazioni da questo generate, viene linearizzata ed espressa come lo sviluppo in serie di Taylor del migliore set di parametri attuale; per questo

vengono calcolate le derivate di tutte le osservazioni rispetto a tutti parametri. Il problema così linearizzato viene quindi risolto per un migliore set di parametri, che a sua volta viene testato mandando nuovamente in esecuzione il modello. Attraverso la comparazione della variazione dei parametri e l'evoluzione della funzione obiettivo raggiunti dalla iterazione corrente, rispetto a quelli avuti nelle precedenti iterazioni, PEST è in grado di stabilire se è il caso di intraprendere un ulteriore processo di ottimizzazione; se ciò avviene, l'intero procedimento descritto viene ripetuto.

La prima esecuzione del PEST deve essere corredata da un set di valori iniziali dei parametri, che sarà utilizzato all'avvio del primo procedimento di ottimizzazione. Per un gran numero di problemi, si giunge al risultato solo in cinque o sei cicli iterativi, in altri casi, il modello convergerà più lentamente, richiedendo un maggior numero di iterazioni. Spesso l'opportuna scelta di quali e quanti parametri debbano essere convertiti in forma logaritmica, ha un pronunciato effetto sull'efficienza dell'ottimizzazione; infatti, la trasformazione di alcuni parametri può tradurre un problema di elevata non linearità in un più conveniente problema lineare.

Le derivate delle osservazioni rispetto ai parametri sono calcolate utilizzando le differenze finite. Durante la singola iterazione, il modello viene mandato in esecuzione per ciascuno parametro da ottimizzare e a questi viene aggiunto un piccolo incremento (il cui valore è fornito dall'utente) prima dell'inizio di ogni iterazione. I conseguenti cambiamenti che si registrano nelle osservazioni vengono divisi per questi incrementi in modo da calcolare le derivate rispetto a tutti i parametri.

Questa tecnica di calcolo delle derivate è nota come metodo alle "differenze in avanti".

Le derivate calcolate in questo modo, sono naturalmente approssimative. Se l'incremento assegnato ha un valore troppo grande la precisione sarà insufficiente, al contrario se l'incremento è troppo piccolo, gli errori di arrotondamento ridurranno l'esattezza delle derivate. Entrambi questi effetti svaluteranno le prestazioni di ottimizzazione. Per ovviare a questo problema, PEST consente il calcolo delle derivate utilizzando il metodo alle "differenze centrate", che richiede però due esecuzioni del modello per ciascuna serie di osservazioni riferita ad un parametro. Nel corso del primo iter viene aggiunto un incremento al valore corrente del parametro, mentre nel secondo lo stesso incremento viene sottratto. Quindi vengono utilizzate, per il calcolo di ogni derivata, tre coppie osservazione-parametro (la terza coppia è composta dal valore corrente del parametro e dal corrispondente valore dell'osservazione).

#### IX.4 Stima dei parametri di un modello lineare

I modelli lineari sono quelli in cui si pensa di poter stabilire tra un certo gruppo di osservabili sperimentali, che supporremo di rappresentare come gli elementi di un vettore  $c$  di dimensione  $m$ , ed un insieme di parametri caratteristici del sistema analizzato, che supporremo

di rappresentare come gli elementi di un vettore  $b$  di dimensione  $n$ , esista una relazione lineare del tipo:

$$Xb = c \quad (\text{IX.9})$$

Dove  $X$  è una matrice  $m \times n$  i cui elementi risultano noti proprio in virtù dell'adozione di un modello interpretativo del comportamento del sistema. Il modello risulta strettamente determinato quando  $m$  è uguale ad  $n$ . In tal caso sarebbe possibile determinare il vettore  $b$ , contenete i parametri significativi del modello, utilizzando i dati sperimentali  $c$ , ma niente potrebbe essere conosciuto sul livello di affidabilità del modello interpretativo delle misure sperimentali che compongono il vettore  $c$ . Viceversa quando  $m$  è maggiore di  $n$  il problema risulta sovra-determinato e non solo diviene possibile la determinazione dei parametri del modello, ma anche valutare la bontà dello stesso.

In un sistema sovra-determinato, a causa degli errori sperimentali o della inconsistenza del modello utilizzato, non è possibile ottenere una corrispondenza perfetta tra il vettore  $c$  sperimentale e quello teorico rappresentato dal calcolo del prodotto  $Xb$ , comunque  $b$  sia scelto. In genere il vettore  $b$  che si ritiene idoneo a rappresentare i parametri del modello è quello che minimizza lo scarto quadratico tra misure sperimentali e valori calcolati (metodo dei minimi quadrati). Definito lo scarto quadratico secondo la l'equazione IX.10.

$$\Phi = (c - Xb)^t(c - Xb) \quad (\text{IX.10})$$

Si ottiene l'equazione di calcolo del vettore  $b$ , la migliore stima lineare dei parametri del modello, secondo l'equazione IX.11, ponendo uguale a zero la derivata di  $\Phi$  rispetto a  $c$ .

$$b = (X^t X)^{-1} X^t c \quad (\text{IX.11})$$

Si definisce matrice di covarianza dei parametri  $b$  la matrice  $C$  definita secondo l'equazione IX.12:

$$C(b) = \sigma^2 (X^t X)^{-1} \quad (\text{IX.12})$$

Nella quale  $\sigma^2$  è la varianza dei dati sperimentali  $c$ . dagli elementi della matrice di covarianza si definisce la matrice di correlazione tra i parametri in accordo all'equazione IX.13:

$$\rho_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sqrt{C_{ii} C_{jj}}} \quad (\text{IX.13})$$

Gli elementi diagonali della matrice di correlazione sono pertanto sempre uguali ad 1, mentre quelli fuori diagonale sono compresi tra 1 e  $-1$ . Un valore di  $\rho_{ij}$  prossimo ad 1 o a  $-1$  indica una forte correlazione tra il parametro  $i$  ed il parametro  $J$  del modello, mentre un valore prossimo a zero indica che i due parametri sono scarrellati. Un'altra matrice molto utile è quella degli autovettori della matrice  $C$ , la matrice che diagonalizza la matrice  $C$ . La presenza, in una colonna di questa matrice, di molti elementi significativamente più grandi di zero, indica una forte correlazione tra i corrispondenti parametri. È importante l'ispezione degli autovalori e degli autovettori della matrice di correlazione. Se il rapporto di un dato autovalore con l'autovalore più piccolo della matrice  $C$  è un numero particolarmente grande, allora i rispettivi autovettori definiscono direzioni di relativa insensibilità del processo di ottimizzazione. L'autovettore relativo all'autovalore più grande è degno di particolare attenzione nel processo di ottimizzazione. Dato che questo definisce la direzione di massima insensibilità. Se questo autovettore è dominato da un singolo elemento, vi è un solo elemento significativamente diverso da zero nel vettore, allora il parametro relativo a quello elemento è poco influente nel processo di ottimizzazione: la misura quantitativa di tale insensibilità è rappresentata dalla radice quadrata del corrispondente autovalore. Se invece l'autovettore contiene diversi elementi significativamente diversi da zero allora ne resta individuato un corrispondente gruppo di parametri a cui il processo di ottimizzazione risulta poco sensibile. Quando il rapporto tra il più grande e più piccolo autovettore è più grande di  $10^8$  vi è una forte possibilità che PEST vada incontro a difficoltà nel processo di ottimizzazione.

### IX.5 Stima di parametri non lineari

Spesso la relazione tra misure sperimentali e parametri di modello è di natura non lineare e non può quindi essere espressa per mezzo delle equazioni sopra riportate. In questo caso conviene comunque linearizzare il problema, adottando il punto di vista che viene di seguito riportato. Supponiamo che per un set di parametri  $b_0$  il modello sia in grado di fornire un vettore  $c_0$  delle osservabili sperimentali. Per generare un set di osservabili corrispondenti ad un vettore  $b_0$  leggermente differente da  $b_0$ , possiamo utilizzare la espansione di Taylor troncata al primo ordine, linearizzando così il problema. Se si definisce con  $J$  la matrice jacobiana delle derivate rispetto al vettore  $b$  (calcolata nel punto  $b_0$ ) della funzione che connette i parametri di modello alle osservabili, l'espansione di Taylor conduce al seguente risultato:

$$c = c_0 + J(b - b_0) \tag{IX.14}$$

Si ottiene così l'equazione (X.14) per lo scarto quadratico:

$$\Phi = (c - c_0 - J(b - b_0))^t Q (c - c_0 - J(b - b_0)) \tag{IX.15}$$

Che minimizzata rispetto al vettore dei parametri  $b$ , permette di ricavare il vettore di “upgrade”  $u$ ,  $(b - b_0)$ , secondo quanto riportato nella seguente equazione IX.15:

$$u = (J^t Q J)^{-1} J^t Q (c - c_0) \quad (\text{IX.16})$$

La matrice di covarianza diviene pertanto:

$$C(b) = \sigma^2 (J^t Q J)^{-1} \quad (\text{IX.17})$$

La matrice  $(J^t Q J)$  viene spesso definita come “matrice normale”.

Dato che le equazioni IX.13 ed IX.15 sono approssimate il vettore  $b$  che si ottiene aggiungendo l’upgrade  $u$  al valore corrente dei parametri  $b_0$  non è immediatamente quello che minimizza lo scarto quadratico tra i valori sperimentali e calcolati delle osservabili. Ma se il modello è corretto, nel senso che può ben rappresentare il sistema studiato, si può ricorrere ad una procedura iterativa per far convergere i valori di  $b$  a quelli che realmente minimizzano lo scarto. Ciò viene realizzato sostituendo il valore di  $b$  ultimo calcolato al valore  $b_0$  e ripetendo la procedura per ricavare un nuovo valore di  $b$ . In questo modo il valore di  $b$  si avvicina progressivamente al valore che realmente minimizza lo scarto, mentre i valori di upgrade divengono progressivamente più piccoli dando riducendo le approssimazioni insite nello sviluppo al primo ordine rappresentato dall’equazione IX.13.

Quando si lavora con modelli non lineari bisogna tenere in considerazione il fatto che sulla iper-superficie dei parametri di modello possono essere presenti vari minimi relativi dello scarto quadratico e che la soluzione del problema è rappresentata dalla convergenza della procedura verso il minimo più basso, minimo globale. Ciò può a volte essere un risultato difficile da ottenere: il calcolo può convergere verso minimi locali, che sono ben lontani dal fornire la soluzione in termini di valori corretti del vettore  $b$ . Il modo migliore per affrontare questo problema della difficoltà di convergenza verso il minimo globale, risparmiando tra l’altro tempi di calcolo, è quello di partire, quando è possibile, da un set di parametri  $b_0$  il più possibile prossimi a quelli che individuano il minimo globale. In ogni caso per essere sicuri della convergenza nel minimo globale occorre a volte fare più procedure di iterazione partendo da valori diversi del set  $b_0$ .



## Allegati

### A. Allegato A

Nelle tabelle seguenti vengono riportate le caratteristiche dei pozzi provenienti dalla Provincia di Varese.

Vengono forniti il codice identificativo, le coordinate WGS 84, la profondità di perforazione, il comune e la località di appartenenza, lo stato d'attività, il tipo di utilizzo, la finalità d'uso. Come già evidenziato nel *Capitolo 2*, questi dati sono frammentari.

<i>Codice</i>	<i>Utm X</i>	<i>Utm Y</i>	<i>Profondità dal p.c. [m]</i>	<i>Località</i>	<i>Stato</i>	<i>Tipo</i>	<i>Uso</i>
12039000.00	480597	5056695	85.00	Via Roma	Chiuso	Pubblico	--
12039001.00	479815	5057603	118.00	Via De Amicis	--	Pubblico	--
12039002.00	480198	5057593	112.00	Baraggia-Via Verdi	--	Pubblico	Potabile
12039003.00	479510	5056121	90.50	Tensa-Via Isonzo	--	Pubblico	Potabile
12039004.00	478615	5056828	100.00	La Valle	Attivo	Pubblico	Potabile
12039011.00	481145	5057666	180.50	Moriggia-Via B.Croce	Attivo	Pubblico	Potabile
12039021.00	481010	5056769	--	Via Ronchetto	--	Privato	--
12039023.00	480664	5057464	151.00	Via Sempione 17	Attivo	Privato	Industriale
12039024.00	479547	5055649	130.00	Petrolieri 5	Attivo	Privato	--
12039025.00	479768	5058027	--	Via Cottolengo	--	Privato	--
12039026.00	479695	5058009	--	Via Verbano	--	Privato	--

*Tabella A-1: Pozzi del comune di Casorate Sempione (VA)*

<i>Codice</i>	<i>Utm X</i>	<i>Utm Y</i>	<i>Profondità dal p.c. [m]</i>	<i>Località</i>	<i>Stato</i>	<i>Tipo</i>	<i>Uso</i>
12032000.02	482252	5054247	52.00	Via S.Rocco	--	--	--
12032000.03	482386	5054773	79.00	Via Vittorio Veneto	--	Pubblico	--
12032001.00	480000	5053991	105.61	Via Brughiera-Vai	--	Pubblico	Potabile
12032002.00	479958	5053986	107.00	Via Brughiera-Esterno	--	Pubblico	Potabile
12032003.00	479955	5054123	112.00	Via Brughiera-Nuovo	--	Pubblico	Potabile
12032004.00	479802	5054136	120.00	Brughiera	--	Pubblico	Potabile
12032005.01	479960	5054263	87.00	Via Al Campo/Brughiera	Attivo	Pubblico	Potabile
12032005.02	479957	5054260	129.00	Via Al Campo/Brughiere	Attivo	Pubblico	Potabile
12032006.01	480566	5055721	77.50	Via Verona	Attivo	Pubblico	Potabile
12032006.02	480569	5055724	219.00	Via Verona	Attivo	Pubblico	Potabile
12032021.01	482599	5053945	75.00	Via S.Rocco 42	Attivo	Privato	Industriale
12032021.02	482521	5053770	69.00	Via S.Rocco 42	Attivo	Privato	Industriale
12032021.03	482456	5053843	162.40	Via S.Rocco 42	Attivo	Privato	Industriale
12032022.01	482170	5054890	60.00	Via Spotti 1	Chiuso	Privato	--
12032022,02	482201	5054896	60.00	Via Spotti 1	Attivo	Privato	Industriale
12032022,03	482260	5054893	75.00	Via Spotti 1	Attivo	Privato	Industriale
12032022,04	482098	5054745	152.00	Via Spotti 1	Attivo	Privato	Industriale



12032023.00	483094	5053740	27.00	Via Adriatica 1	--	Privato	--
12032024.00	482842	5053947	108.00	Via C. Cattaneo, N. 111	Scomparso	Privato	--
12032025.00	480876	5055227	--	Via P.Giovanni Xxiii	--	Privato	--
12032026.00	481342	5055563	--	Via Per Casorate	--	Privato	--
12032027.00	482493	5053732	--	Via Lazzaretto 90	--	Privato	Industriale
12032028.00	482411	5053743	132.00	Via Lazzaretto 88	--	Privato	Industriale
12032029.00	480110	5053871	72.00	Via Al Campo	--	Privato	--
12032030.00	482758	5054852	--	Via Gen.Cantore 9	--	Privato	--
12032031.00	482790	5055123	--	Via L.Ferrazzi	--	Privato	--
12032032.00	482663	5055318	108.00	Via Tridentina	Attivo	Privato	Industriale
12032034.00	481142	5053488	70.00	--	Attivo	Privato	--

Tabella A-2: Pozzi del comune di Cardano al Campo (VA)

Codice	Utm X	Utm Y	Profondità dal p.c, [m]	Località	Stato	Tipo	Uso
12068001.00	480697	5051341	55.00	Via 5 Martiri-Scuole	Chiuso	Pubblico	--
12068002.00	480847	5051096	66.00	P.Za D.Alighieri	Chiuso	Pubblico	--
12068003.00	481207	5051026	101.50	Via Marconi	Attivo	Pubblico	Potabile
12068004.00	481334	5051838	102.00	Via Matteotti	Inattivo	Pubblico	Potabile
12068005.00	481444	5050600	55.00	Via Marco Polo	Attivo	Pubblico	Verde Pubblico
12068021.00	481035	5051043	47.50	P.Za S.Martino 14	--	Privato	--
12068022.00	477193	5052638	70.50	C.Na Borletti	--	Privato	--
12068023.00	477288	5051768	104.00	Aeroporto Malpensa	Attivo	Privato	Potabile

Tabella A-3: Pozzi del comune di Ferno (VA)

Codice	Utm X	Utm Y	Profondità dal p.c, [m]	Località	Stato	Tipo	Uso
12090001.00	481020	5048875	52.70	Via Ticino-Volta-Don	Inattivo	Pubblico	--
12090002.00	480604	5049593	55.30	Via Cavour-Municipio	Inattivo	Pubblico	--
12090003.00	480594	5049317	57.00	P.Za C.Battisti	Chiuso	Pubblico	--
12090004.00	477347	5047739	61.00	Tornavento-Via Goldoni	Attivo	Pubblico	Potabile
12090005.00	481172	5048141	55.00	S.Antonino-P.Chiesa	Chiuso	Pubblico	--
12090006.00	481012	5049904	59.00	Via Colombo	Inattivo	Pubblico	--
12090007.00	480496	5050076	60.00	Via Adua-Serbatoio	Inattivo	Pubblico	--
12090008.00	483000	5048937	145.00	4 Strade	Inattivo	Pubblico	--
12090009,01	477751	5050150	235.10	Bellaria-Via Molinelli	Attivo	Pubblico	Potabile
12090009,21	477625	5050131	250.60	Bellaria-Via Molinelli	Attivo	Pubblico	--
12090009,22	477629	5050145	82.60	Bellaria-Via Molinelli	Attivo	Pubblico	Potabile
12090009,31	477570	5050219	256.00	Bellaria-Via Molinelli	Attivo	Pubblico	Potabile
12090009,32	477580	5050219	82.60	Bellaria-Via Molinelli	Attivo	Pubblico	Potabile
12090009,41	477527	5050351	253.00	Bellaria-Via Molinelli	Attivo	Pubblico	Potabile
12090009,42	477529	5050343	82.60	Bellaria-Via Molinelli	--	Pubblico	Potabile
12090010.00	480806	5049617	32.00	Piazza Santambrogio	Chiuso	Pubblico	--
12090021,01	477609	5051142	66.50	Bellaria	Attivo	Privato	Potabile
12090021,02	477964	5050673	--	Bellaria	Chiuso	Privato	Potabile

12090022.01	479564	5046569	125.70	Aeroscalo-Promessa	--	Privato	--
12090022.02	479395	5046641	40.35	Aeroscalo-Promessa	--	Privato	--
12090022.03	479507	5046724	59.70	Aeroscalo-Western G.	--	Privato	--
12090022.04	479720	5046615	60.60	Aeroscalo-Western G.	--	Privato	--
12090023.00	483155	5049098	51.00	Via Per Busto 150	--	Privato	--
12090024.00	478602	5047342	55.00	Tornavento	Chiuso	Privato	--
12090025.01	483325	5049698	60.00	Strada Statale 341, N. 24	Attivo	Privato	Industriale
12090025.02	483321	5049764	82.00	Strada Statale 341, N. 24	Attivo	Privato	Industriale
12090026.00	480901	5049787	69.00	Via Garibaldi 26	Attivo	Privato	Antincendio
12090027.00	477376	5049259	90.00	Cascina Maggia -Via Del Gregge	Inattivo	Privato	Industriale
12090028.01	477877	5046839	--	Tornavento-Via S.Siro	Inattivo	Privato	Industriale
12090028.02	477917	5046859	82.00	Tornavento-Via S.Siro	Inattivo	Privato	Industriale
12090028.03	478277	5047070	40.00	Tornavento	Attivo	Privato	Industriale
12090028.04	478350	5047042	40.00	Tornavento	Attivo	Privato	Industriale
12090028.09	478109	5046792	--	--	Attivo	Privato	--
12090029.00	477077	5047165	17.00	C.Na Castellanza	--	Privato	--
12090030.00	477236	5051168	95.00	Via Del Gregge 220	Attivo	Privato	Ig. Sanitario
12090031.00	480655	5047463	73.00	Via Ceresio 35	Attivo	Privato	Industriale
12090031.02	480623	5047464	80.00	S. Antonino	Attivo	Privato	Industriale
12090032.00	480439	5050017	75.00	Via Dante 36	Attivo	Privato	Industriale
12090033.00	480048	5049097	70.00	Via Vittorio Veneto 82	Attivo	Privato	Industriale
12090034.01	479809	5047076	52.70	Via Xxiv Maggio 180	Attivo	Privato	Industriale
12090034.02	479730	5047103	82.00	Via Xxiv Maggio 180	Attivo	Privato	Irrigazione aree verdi
12090034.03	479844	5047170	74.00	Via Xxiv Maggio 180	Attivo	Privato	--
12090034.04	479837	5047090	73.00	Via Xxiv Maggio 180	Attivo	Privato	--
12090035.00	477623	5046070	8.00	Turbigaccio	Attivo	Privato	Domestico
12090036.00	477072	5048569	--	--	--	Privato	Irriguo
12090037.00	477517	5048827	86.00	Via Del Gregge 94	Chiuso	Privato	Antincendio
12090038.00	476885	5048011	--	Via Alzaia 24	--	Privato	--
12090039.00	477257	5047803	103.00	P.Za Parravicino 3	Attivo	Privato	Potabile
12090040.00	476887	5050511	4.00	Cascina Molinelli	Inattivo	Privato	--
12090042.00	481258	5046893	50.38	S. Antonino	Attivo	Privato	Antincendio
12090043.00	479356	5048902	73.00	Via Piemonte	Attivo	Privato	Industriale
12090044.00	480018	5048447	101.00	Via Moncucco 55	Attivo	Privato	Industriale
12090045.00	477385	5048629	--	Dogana Austroungarica	Inattivo	Privato	--
12090046.00	476912	5048154	--	Via Alzaia 18	Inattivo	Privato	--
12090047.00	476996	5048223	--	Via Alzaia, N. 10	Chiuso	Privato	--
12090050.00	476951	5048150	--	Via Alzaia 16	Attivo	Privato	--
12090056.00	477129	5047591	--	Cascina Centrale 26	Attivo	Privato	--
12090058,01	477979	5051498	99.00	--	Attivo	Privato	Antincendio
12090058,02	477873	5051273	99.00	Malpensa	Attivo	Privato	Potabile
12090059.00	476918	5049891	20.00	Molinella	Attivo	Privato	--
12090060.00	476721	5050344	20.00	Molinella	Attivo	Privato	--

12090062.00	477382	5047295	25.00	--	Attivo	Privato	--
12090063.00	477075	5048348	--	Via Alzaia 6	Inattivo	Privato	--

Tabella A-4: Pozzi del comune di Lonate Pozzolo (VA)

<i>Codice</i>	<i>Utm X</i>	<i>Utm Y</i>	<i>Profondità dal p.c., [m]</i>	<i>Località</i>	<i>Stato</i>	<i>Tipo</i>	<i>Uso</i>
12118000.00	483098	5051078	46.00	S.Mmacario-C.Na Sopra	Chiuso	Pubblico	--
12118001.00	484711	5053226	150.00	C.Na Tangitt	Chiuso	Pubblico	--
12118002,01	482995	5052890	75.00	Via Dante-Scuole	Chiuso	Pubblico	--
12118002,02	482999	5052903	84.00	Via Dante	Attivo	Pubblico	Potabile
12118002,03	483000	5052902	145.00	Via Dante	Inattivo	Pubblico	Potabile
12118003,01	483892	5052585	70.00	Monticello-Via Ricci	Chiuso	Pubblico	--
12118003,02	483890	5052579	150.00	Monticello-Via Ricci	Inattivo	Pubblico	--
12118004,01	484520	5050183	70.00	Via Petrarca-C.Elisa	Chiuso	Pubblico	--
12118004,02	484516	5050161	124.00	Via Petrarca-C.Elisa	Attivo	Pubblico	Potabile
12118005.00	481040	5052883	80.00	Via Mezzomonte-C.Costa	Attivo	Pubblico	Potabile
12118006,01	483826	5053999	41.00	Via Acquedotto-C.Costa	Chiuso	Pubblico	--
12118006,02	483920	5053928	153.24	Via Acquedotto	Attivo	Pubblico	Potabile
12118007.00	482868	5052098	180.00	Via Togliatti	Attivo	Pubblico	Potabile
12118008.00	484330	5053459	154.00	Via Dell'alberone	Attivo	Pubblico	Potabile
12118009.00	483015	5050999	51.00	Via Ferrino-Scuola Media	Attivo	Pubblico	Industriale
12118021,01	484451	5052385	94.00	Via Milano 201	Attivo	Privato	Industriale
12118021,02	484510	5052101	77.00	Via Milano 201	Chiuso	Privato	--
12118021,03	484674	5052271	100.00	Via Milano 201	Attivo	Privato	Industriale
12118022.00	483348	5053862	60.00	Via Le Adriatico 91-93	Attivo	Privato	Industriale
12118023.00	483697	5054202	27.00	C.Na Verghiera	--	Privato	--
12118024.00	481267	5052899	101.00	Via G. Augusta 293	Attivo	Privato	Industriale
12118025,01	480164	5053188	110.00	C.Na Costa-Est	Attivo	Privato	Industriale
12118025,02	480000	5053457	100.00	C.Na Costa-Nord	Attivo	Privato	Industriale
12118025,03	480056	5052822	92.00	C.Na Costa-Sud	Attivo	Privato	Industriale
12118025,04	483457	5053981	27.50	Via Adriatico 50	Chiuso	Privato	Industriale
12118026.00	483554	5053196	85.00	Via Tevere 19	Attivo	Privato	Industriale
12118027.00	482549	5050489	50.20	S.Macario-C.S.Elia	--	Privato	--
12118028.00	483401	5051219	--	S.Macario	--	Privato	--
12118029.00	483594	5053606	--	S.S.341	--	Privato	--
12118030,01	480455	5053438	60.50	C.Na Costa	--	Privato	--
12118031.00	483718	5053794	35.00	Verghera-Via Adriatico	--	Privato	--
12118032.00	481716	5052915	75.00	Via Le Agusta 203	Attivo	Privato	Irriguo
12118033.00	485218	5052490	40.00	Strada Del Marmo	Chiuso	Privato	--
12118034.00	484614	5050219	48.00	Tenuta C.Na Elisa	Chiuso	Privato	--
12118035.00	483765	5054009	--	S.S.341	--	Privato	--
12118036.00	483390	5050193	65.00	Canziani	Attivo	Privato	Irriguo
12118037.00	485349	5053165	29.00	Cascina Tangitt	Attivo	Privato	Ig. Sanitario
12118038.00	481931	5053259	60.00	Via Tagliaferri	Attivo	Privato	--

12118039.00	482803	5050492	60.00	San Macario	Attivo	Privato	Scambio termico
12118040,01	483043	5049987	60.00	Via Aspesi 39	Attivo	Privato	Scambio termico
12118041.00	482466	5051126	50.00	Via San Gervaso	Attivo	Privato	--
12118042.00	484652	5050187	66.00	Via Monteberico 235	Attivo	Privato	--

Tabella A-5: Pozzi del comune di Samarate (VA)

<i>Codice</i>	<i>Utm X</i>	<i>Utm Y</i>	<i>Profondità dal p.c, [m]</i>	<i>Località</i>	<i>Stato</i>	<i>Tipo</i>	<i>Uso</i>
12123001.00	477024	5058916	112.00	Valgella-Via Roma	Attivo	Pubblico	Potabile
12123002,01	477171	5059319	111.00	Birone Vecchio-Via Colombo	Chiuso	Pubblico	--
12123002,02	477186	5059310	149.00	Bironenuovo-Via Colombo	Attivo	Pubblico	Potabile
12123003.00	475538	5058427	82.00	Stronaccia Ticino-Via Canottieri	Attivo	Pubblico	Potabile
12123004,01	477994	5059448	119.30	Mezzana -Via Prati Lago	Attivo	Pubblico	Potabile
12123004,02	477975	5059440	188.00	Mezzana	Attivo	Pubblico	Potabile
12123005,01	475256	5056461	--	Maddalena-Vecchio	Chiuso	Pubblico	--
12123005,02	475510	5056783	155.00	Maddalena-Nuovo	Attivo	Pubblico	Potabile
12123006,01	477364	5053793	--	Casenuove	Chiuso	Pubblico	--
12123006,02	477386	5053941	100.00	Casenuove	Attivo	Pubblico	Potabile
12123007,02	472370	5058795	92.00	Coarezza-Nuovo	Attivo	Pubblico	Potabile
12123021,02	475591	5055290	85.00	Molino Risella	Attivo	Privato	Antincendio
12123021,03	475491	5055343	86.00	Molino Risella	Attivo	Privato	Antincendio
12123021,04	476897	5059109	100.00	Via G.Visconti	Chiuso	Privato	--
12123021,05	476813	5059108	135.00	Via Sfrondati 1	Inattivo	Pubblico	Potabile
12123022,01	475288	5058336	8.00	Strada Canott.Ticino	Chiuso	Privato	--
12123022,02	475644	5058717	34.00	S.S. 336 Via Canottieri	Attivo	Privato	Industriale
12123022,03	475069	5058392	6.00	Strada Canott.Ticino	Attivo	Privato	--
12123022,04	475211	5058502	36.00	Strada Canott.Ticino	Chiuso	Privato	--
12123023.00	478027	5058359	105.00	Via Galilei 15	Attivo	Privato	Antincendio
12123024.00	476935	5058316	125.10	Via Le Rimembranze 14	Attivo	Privato	Industriale
12123025.00	477292	5054541	101.00	Via Bailo-Via Ferrari	Inattivo	Privato	--
12123026,01	472251	5058407	46.12	Coarezza-Via Sauro 25	Attivo	Privato	Industriale
12123026,02	472194	5058448	30.00	Coarezza-Via Sauro 25	Chiuso	Privato	--
12123026,03	472306	5058425	55.00	Coarezza-Via Sauro 25	Attivo	Privato	Industriale
12123027,02	477102	5053451	97.00	Via Per Tornavento 15	Attivo	Privato	Potabile
12123028,01	473623	5058711	117.50	C.Na S.Giuseppe	--	Privato	--
12123028,02	473653	5058695	129.87	C.Na S.Giuseppe	--	Privato	--
12123029,01	474725	5056824	15.60	Maddalena-Via Ticino	Attivo	Privato	Industriale
12123029,02	474715	5056856	15.60	Maddalena-Via Ticino	Chiuso	Privato	--
12123029,03	474732	5056912	38.00	Maddalena-Via Ticino	Chiuso	Privato	--
12123029,04	474618	5056987	15.20	Maddalena-Via Ticino	Attivo	Privato	Industriale
12123029,05	474785	5056959	70.00	Maddalena-Via Ticino	Chiuso	Privato	--
12123029,06	474579	5056957	82.00	Maddalena-Via Ticino	Attivo	Privato	Industriale
12123030.00	477517	5059287	--	Via Mameli 107	--	Privato	--
12123031.00	476495	5058694	107.00	Via Ronchi 25	Attivo	Privato	Industriale

12123032,01	473927	5058137	13.50	Porto Torre- La Ticinella	Chiuso	Privato	--
12123032,02	474372	5058299	--	Porto Torre- Centrale	--	Privato	--
12123033.00	477964	5059574	2.00	Via Carlo Del Prete 1	Attivo	Privato	Industriale
12123034.00	475382	5055607	--	Cascinale Mo.Mezzo	--	Privato	--
12123035.00	475038	5056170	5.50	--	Inattivo	Privato	Piscicoltura
12123035,02	474964	5056106	10.00	--	Attivo	Privato	--
12123036.00	474516	5056792	52.00	Via Al Ticino 10 Maddalena	Attivo	Privato	Ig. Sanitario
12123037.00	475401	5058269	10.00	Canottieri	--	Privato	--
12123038,04	478496	5055151	100.50	Magazzino Merci 1	Attivo	Privato	--
12123038,05	478466	5054820	100.00	Sottoclesia 2		Privato	--
12123038,06	477834	5055022	80.00	Officina 3	Attivo	Privato	--
12123038,07	478743	5053715	72.60	Ex Farsura 4	Attivo	Privato	--
12123038,08	477828	5053852	100.00	Malpensa	Attivo	Privato	Potabile
12123038,09	477334	5053179	103.20	--	Attivo	Privato	Potabile
12123039.00	472199	5059254	--	Coarezza	--	Privato	--
12123040.00	477237	5059049	10.00	Via Zamberini 9	--	Privato	--
12123041.00	477519	5057821	--	Via Bozza Dei Salici, N. 3	Inattivo	Privato	--
12123042.00	477624	5055457	74.00	C.Na Frutteto	Attivo	Privato	Irriguo
12123043.00	475825	5054729	41.00	--	Attivo	Privato	Irriguo
12123044.00	478471	5055837	100.00	Cava Malpensa	Attivo	Privato	Antincendio
12123045.00	478676	5057392	--	C.Na Della Valle	--	Privato	Industriale
12123046.00	477746	5054863	--	C.Na Malpensa	--	Privato	--
12123048.00	477891	5056213	80.20	Via Facchinetti	Attivo	Privato	--
12123049.00	475565	5057717	80.00	Via Belvedere 38	--	Privato	--
12123050.00	477191	5059105	3.00	Via Melzi 23	Attivo	Privato	--
12123052.00	474547	5058305	19.00	Via Canottieri	Attivo	Privato	--

Tabella A-6: Pozzi del comune di Somma Lombardo (VA)

<b>Codice</b>	<b>Utm X</b>	<b>Utm Y</b>	<b>Profondità dal p.c, [m]</b>	<b>Località</b>	<b>Stato</b>	<b>Tipo</b>	<b>Uso</b>
12140001.00	474817	5052988	101.00	Barbelera-Castelnovate	Attivo	Pubblico	Potabile
12140002.00	476322	5052410	--	Via Castello	Inattivo	Privato	--
12140003.00	476342	5052698	--	Via Locatelli	Inattivo	Privato	--
12140004.00	476317	5052673	97.00	Via Locatelli	Attivo	Pubblico	Potabile
12140005.00	474262	5053154	--	Castelnovate	Chiuso	Pubblico	--
12140006.00	476219	5053032	--	Boscobello	Escavazione	Pubblico	--
12140021,01	474623	5052621	79.00	Barbelera	Attivo	Privato	Industriale
12140021,02	474325	5052680	77.00	Campo Prove	Attivo	Privato	Industriale
12140021,03	474815	5052532	80.00	Barbelera	Attivo	Privato	Industriale
12140022,01	475665	5052250	2.00	Bonifica Caproni	Attivo	Privato	Potabile
12140022,02	475675	5052219	--	Bonifica Caproni	Scomparso	Privato	--
12140022,03	475915	5051824	--	Bonifica Caproni	Scomparso	Privato	--
12140024.00	473949	5053491	--	Via Porto 4	--	Privato	--
12140025.00	473871	5053410	--	Via Porto 6	--	Privato	--

12140026.00	476219	5050753	15.00	--	Attivo	Privato	Ig. Sanitario
12140027.00	476472	5052362	--	C.Caproni-Locatelli	Scomparso	Privato	--
12140028,01	475582	5053015	35.00	Via Marconi	Attivo	Privato	Irriguo
12140028,02	475723	5052742	50.00	Via Marconi	Attivo	Privato	Irriguo
12140029.00	476849	5053743	92.00	Montecchio	Attivo	Privato	Industriale
12140030.00	474712	5052984	--	Castelnovate	Inattivo	Privato	--
12140031.00	476368	5052580	--	Villa Caproni	--	Privato	--

Tabella A-7: Pozzi del comune Vizzola Ticino (VA)

<i>Codice</i>	<i>Utm X</i>	<i>Utm Y</i>	<i>Profondità dal p.c. [m]</i>	<i>Località</i>	<i>Stato</i>	<i>Tipo</i>	<i>Uso</i>
12047001.00	485034	5066647	14.00	Arnetta Sud	Inattivo	Pubblico	--
12047002.00	485039	5066672	11.50	Arnetta Nord	Inattivo	Pubblico	--
12047003.00	485140	5066889	58.50	Cascina Maggio	Attivo	Pubblico	Potabile
12047004.00	485002	5066660	40.00	Via Mazzini	Attivo	Pubblico	Potabile
12047005.00	484861	5066277	42.00	Via Mazzini	Attivo	Pubblico	Potabile
12047012.00	485142	5067791	36.00	Prell	Attivo	Pubblico	Potabile
12047014.00	485101	5065307	49.00	Molino Gazza	Attivo	Pubblico	Potabile
12047015.00	485038	5065402	48.50	Molino Gazza	Attivo	Pubblico	Potabile
12047021.00	485369	5067403	15.00	Via Lombardia 37	Chiuso	Privato	Industriale
12047022.00	485035	5066991	46.00	Via S.Alessandro 10	Attivo	Privato	Industriale
12047023.00	484919	5065769	--	--	--	Privato	--
12047024.00	486132	5066613	6.20	C.Na Brogginò	--	Privato	--
12047025.00	486095	5066547	8.50	C.Na Cascinazza	--	Privato	--
12047026.00	485573	5065890	15.80	C.Na Via Mattettoi	--	Privato	--
12047027.00	485826	5065713	9.20	C.Na Castellazzo	--	Privato	--
12047028.00	485526	5065999	--	Via Matteotti - Via Dei Cantori	Chiuso	Privato	--
12047029.00	485505	5066282	20.00	--	Attivo	Privato	--
12047031.00	485773	5065650	30.00	Via Castellazzo, N. 8	Attivo	Privato	--

Tabella A-8: Pozzi del comune di Castronno (VA)

<i>Codice</i>	<i>Utm X</i>	<i>Utm Y</i>	<i>Profondità dal p.c. [m]</i>	<i>Località</i>	<i>Stato</i>	<i>Tipo</i>	<i>Uso</i>
12002000.00	483769	5064196	70.00	Ponte Di Sumirago	Chiuso	Pubblico	--
12002001.00	485176	5063988	13.45	Tarabara	Attivo	Privato	Industriale
12002002.00	485047	5064137	10.90	Tarabara	Attivo	Privato	Industriale
12002003,01	485020	5065136	50.00	Valdarno Via Del Pozzo	Chiuso	Pubblico	Potabile
12002003,02	485037	5065168	45.00	Valdarno Via Del Pozzo	Chiuso	Pubblico	--
12002004.00	485060	5065207	42.00	Valdarno Via Del Pozzo	Attivo	Pubblico	Potabile
12002006.00	485085	5065050	53.00	Via Delle Cerelle	Attivo	Pubblico	Potabile
12002007.00	485219	5064592	54.50	Valdarno-Autostrada	Chiuso	Pubblico	--
12002008.00	485005	5065314	48.50	Via G.Rossa	Attivo	Pubblico	Potabile
12002009,02	485040	5065131	170.00	Valdarno Via Del Pozzo	Attivo	Pubblico	Potabile
12002021,01	485015	5063797	130.00	Via Piave 18-Oleificio	Chiuso	Privato	--

12002021,02	485122	5063867	60.00	Via Piave 18-Ossido	Chiuso	Privato	--
12002021,03	485147	5063845	33.25	Via Piave 18-Scarpata	Chiuso	Privato	--
12002021,04	485169	5063825	31.35	Via Piave 18-Colori	Chiuso	Privato	--
12002021,05	485256	5063872	60.00	Via Piave 18	Chiuso	Privato	--
12002021,07	485066	5063981	25.00	Via Piave 18	Attivo	Privato	Industriale
12002021,08	485190	5063852	45.00	Via Piave 18	Chiuso	Privato	--
12002021,09	485193	5064144	53.30	Via Piave 18-Tarabara	Attivo	Privato	Industriale
12002021,10	485047	5063665	60.80	Via Piave 18-Pigmenti	Chiuso	Privato	--
12002021,11	485063	5064027	16.00	Via Piave 18	Chiuso	Privato	--
12002021,12	485045	5063686	67.00	--	Chiuso	Privato	Industriale
12002021,13	485144	5063716	40.00	--	Attivo	Privato	Industriale
12002021,14	485130	5063833	51.00	Via Piave 18-Parcheggio	Attivo	Privato	Industriale
12002021,15	484941	5064008	25.00	--	Attivo	Privato	Industriale
12002021,16	484979	5063908	20.00	--	Attivo	Privato	Industriale
12002022,01	485133	5064808	16.00	Via Colombo 5-Caldaie	Chiuso	Privato	Industriale
12002022,02	485217	5064729	13.50	Via Colombo 5-Torrente	Chiuso	Privato	--
12002022,03	485137	5064804	40.00	Via Colombo 5	Attivo	Privato	Industriale
12002023,00	484222	5063434	15.00	Via Col Di Lana	--	Privato	--
12002024,00	484658	5063757	--	Via Campagna 21	--	Privato	--
12002025,00	485053	5064827	51.00	Via Colombo	Attivo	Privato	--

Tabella A-9: Pozzi del comune di Albaizzate (VA)

Codice	Utm X	Utm Y	Profondità dal p.c., [m]	Località	Stato	Tipo	Uso
12070001,01	482465	5058228	79.00	Crenna - Via Marmolada	Inattivo	Pubblico	Potabile
12070001,02	482465	5058227	194.00	Crenna - Via Marmolada	Attivo	Pubblico	Potabile
12070002,00	483210	5058807	85.00	Via Boschina	Attivo	Pubblico	Potabile
12070003,00	484281	5059267	68.00	Via Caiello-Prealpi	Inattivo	Pubblico	Potabile
12070004,00	483971	5058125	86.00	Via Curtatone 55	Attivo	Pubblico	Potabile
12070005,00	483306	5057933	48.70	Via Pascoli-Scuola	Attivo	Pubblico	Potabile
12070006,00	482473	5057092	82.00	Via A.Da Giussano	Attivo	Pubblico	Potabile
12070007,01	482410	5056423	65.00	Ronchi-Via Sciesa	Attivo	Pubblico	Potabile
12070007,02	482451	5056426	82.00	Ronchi-Via Sciesa	Attivo	Pubblico	Potabile
12070008,01	485648	5055808	214.00	Via Francia	Attivo	Pubblico	Industriale
12070008,02	485649	5055810	--	Via Francia	Attivo	Pubblico	Potabile
12070009,00	483104	5055588	73.50	Via Alberone-Via Ferrari	Attivo	Pubblico	Potabile
12070010,01	484868	5054241	68.00	Via Aleardi-Officina	Inattivo	Pubblico	Potabile
12070010,02	484825	5054166	96.50	Via Aleardi-Officina	Inattivo	Pubblico	Potabile
12070010,03	484862	5054286	172.00	Via Aleardi-Officina	Attivo	Pubblico	Potabile
12070010,04	485038	5054287	90.00	Via Aleardi-Officina	Attivo	Pubblico	Potabile
12070010,05	485038	5054287	175.00	Via Aleardi-Officina	--	Pubblico	Potabile
12070011,00	485236	5054608	131.00	Via Perugia-S.Andrea	Inattivo	Pubblico	Potabile
12070012,00	484802	5055040	270.00	Madonna Di Campagna	Inattivo	Pubblico	Potabile
12070015,00	484372	5057255	47.50	P.Za IV Novembre	Inattivo	Pubblico	Potabile

12070016.00	485188	5054171	123.00	Via Aleardi	Inattivo	Pubblico	Potabile
12070018.00	485256	5055828	74.50	Via Bronzetti	Inattivo	Pubblico	Potabile
12070019.00	481243	5058021	205.00	Moriggia	Attivo	Pubblico	--
12070020.00	483790	5058609	228.50	Caiello-Via Pradisera	Attivo	Pubblico	Potabile
12070021.00	484607	5058175	190.20	Via Lazzaretto	Attivo	Pubblico	Potabile
12070022.00	482310	5058159	180.00	Via Monte S.Martino	Attivo	Pubblico	Potabile
12070023,01	482285	5058117	170.00	Via Monte S.Martino	Attivo	Pubblico	Potabile
12070023,02	482287	5058116	65.00	Via Monte S.Martino	Attivo	Pubblico	Potabile
12070024.00	482103	5056613	158.50	Ronchi-Via Aosta	--	Pubblico	Potabile
12070025.00	483517	5055294	63.50	Via Pietro Da Gallarate-Via Leonardo	Attivo	Pubblico	Potabile
12070026.00	483295	5055400	71.70	Via Pietro Da Gallarate-Via Lario-Via Bandiera	Attivo	Pubblico	Potabile
12070041.00	483073	5059052	--	Via Per Besnate	--	Privato	--
12070042.00	483846	5059097	21.20	Via Brennero 5	--	Privato	--
12070043,01	484510	5059015	12.00	Via Varese 74	--	Privato	--
12070043,02	484605	5058981	32.50	Via Varese 74	--	Privato	--
12070044.00	484441	5058407	30.00	Via Varese 36	--	Privato	--
12070045.00	482531	5058347	50.00	Crenna	Inattivo	Privato	--
12070046,01	483791	5058024	64.16	Via Del Lavoro 13	Attivo	Privato	Antincendio
12070046,02	483679	5057998	67.00	Via Del Lavoro 13	Attivo	Privato	Antincendio
12070047,01	484137	5058040	12.10	Via Varese 13	--	Privato	--
12070047,02	484202	5057993	70.50	Via Varese 13	--	Privato	--
12070048,01	484350	5057726	24.00	Via Custodi 25	--	Privato	--
12070048,03	484381	5057830	91.00	Via Custodi 25	Attivo	Privato	Industriale
12070049,01	484604	5057485	42.50	Via Lazzaretto 12	Chiuso	Privato	--
12070049,02	484639	5057435	129.00	Via Lazzaretto 12	Chiuso	Privato	--
12070049,03	484580	5057617	92.00	Via Lazzaretto 12	Attivo	Privato	Industriale
12070049,04	484586	5057663	240.50	--	Attivo	Privato	Industriale
12070049,05	484547	5057596	96.00	--	Attivo	Privato	Industriale
12070050,01	483941	5057323	24.00	Via Pegoraro 26	Chiuso	Privato	--
12070050,02	484033	5057581	--	Via N.Sauro 1	--	Privato	--
12070051.00	483440	5057301	38.00	Via Le Dei Tigli 20	Attivo	Privato	Industriale
12070052,01	483657	5057278	20.00	Via Sorgiorile 7	Chiuso	Privato	--
12070052,02	483577	5057279	20.00	Via Sorgiorile 7	Chiuso	Privato	--
12070052,03	483597	5057294	141.00	Via Sorgiorile 7	Attivo	Privato	Industriale
12070053.00	484541	5057275	65.00	Via Le XXIV Maggio 3	Chiuso	Privato	Industriale
12070054,01	485368	5057246	20.00	Via S.Giorgio 19	--	Privato	Industriale
12070054,02	485340	5057232	91.00	Via S.Giorgio 19	--	Privato	Industriale
12070054,03	485294	5057295	102.00	Via S.Giorgio 19	--	Privato	Industriale
12070055,01	485217	5057211	16.00	Via S.Giorgio 15	Chiuso	Privato	--
12070055,02	485151	5057167	80.00	Via S.Giorgio 15	Attivo	Privato	Industriale
12070055,03	485197	5057193	110.00	Via S.Giorgio 15	Chiuso	Privato	--
12070056,01	484736	5057794	70.00	--	Attivo	Privato	Scambio termico



## Allegato A

12070056,02	484718	5057768	70.00	--	Attivo	Privato	Scambio termico
12070056,03	484732	5057754	35.70	--	Attivo	Privato	Scambio termico
12070057.00	482653	5056993	40.50	Via Bettolino 17	Attivo	Privato	Antincendio
12070058.00	483944	5057125	24.50	C.So C.Colombo	--	Privato	--
12070059.00	483750	5057006	30.00	Via Privata Macoletta	--	Privato	--
12070060,01	483853	5056902	35.00	Via L.Riva 10	--	Privato	--
12070060,02	483906	5056991	52.00	Via L.Riva 10	--	Privato	--
12070060,03	484112	5056891	26.00	Via L.Riva 10	--	Privato	--
12070060,04	484155	5056932	32.00	Via L.Riva 10	--	Privato	--
12070060,05	484008	5056930	86.54	Via L.Riva 10	--	Privato	--
12070060,06	484008	5056986	22.80	Via L.Riva 10	--	Privato	--
12070061.00	484228	5056859	23.75	Via Vespucci 21	Chiuso	Privato	--
12070062.00	484331	5056924	--	Via Mameli 25	--	Privato	--
12070063.00	484767	5056873	26.00	Via Degli Orsini 2	--	Privato	--
12070064,01	484796	5056805	40.00	Via Degli Orsini 5	Attivo	Privato	Industriale
12070064,02	484776	5056905	65.00	Via Degli Orsini 5	Attivo	Privato	Industriale
12070064,03	484857	5056767	32.00	Via Degli Orsini 5	Attivo	Privato	Industriale
12070064,04	484828	5056837	19.00	Via Degli Orsini 5	Chiuso	Privato	--
12070065.00	484445	5056640	11.00	Via Venegoni	--	Privato	--
12070066,01	483705	5056576	15.00	Via Tenconi 1/A	--	Privato	--
12070066,02	483614	5056560	20.50	Via Tenconi 1/A	--	Privato	--
12070066,03	483681	5056544	14.00	Via Tenconi 1/A	--	Privato	--
12070066,04	483630	5056491	8.00	Via Tenconi 1/A	Chiuso	Privato	--
12070067.00	483915	5056587	25.00	P.Za Risorgimento	--	Privato	--
12070068.00	483929	5056477	80.00	Via Xx Settembre	Chiuso	Privato	--
12070069,01	484191	5056631	46.00	Via Curioni 14	Attivo	Privato	Industriale
12070069,02	484234	5056670	53.00	Via Curioni 14	Attivo	Privato	Industriale
12070070.00	484418	5056544	51.50	Via Bergamo 5/7	Chiuso	Privato	Industriale
12070071,01	484395	5056509	34.00	Via Cattaneo 5	--	Privato	--
12070071,02	484337	5056534	80.50	Via Cattaneo 5	--	Privato	--
12070072.00	484847	5056446	50.00	Via Lombardia 25	--	Privato	--
12070074.00	484726	5056177	53.00	Via Doria	--	Privato	--
12070075,01	485944	5056075	35.50	Via Gorizia 111	--	Privato	--
12070075,02	485853	5056035	62.00	Via Gorizia 111	--	Privato	--
12070076.00	482888	5056061	39.20	Via Gonzaga 8	Attivo	Privato	Irrigazione aree verdi
12070077.00	483295	5056007	11.00	Via Novara 18	Scomparso	Privato	--
12070078,01	483740	5055944	19.75	Via Pastore-Radiologia	--	Privato	--
12070078,02	483878	5055868	65.00	Via Pastore-Caldaie	Attivo	Privato	Ig. Sanitario
12070078,03	483761	5055894	25.00	Via Pastore- Chirurgia	Attivo	Privato	Ig. Sanitario
12070079.00	484103	5055758	42.00	Via Cadore 2	Attivo	Privato	Irriguo
12070080.00	484834	5055704	85.75	Deposito Locomotive	--	Privato	--
12070081.00	483266	5055729	53.00	Via Agnelli 21	Attivo	Privato	Industriale
12070082,01	484640	5055485	58.10	Via Milano 22	Attivo	Privato	Industriale

12070082,02	484595	5055412	65.00	Via Milano 22	Attivo	Privato	Industriale
12070083,00	483962	5055422	51.30	Via Parini 6	--	Privato	--
12070084,01	483885	5055347	18.00	Via Magenta	--	Privato	--
12070085,01	483690	5055186	28.00	Via L.Da Vinci 48	--	Privato	--
12070085,02	483642	5055100	32.00	Via L.Da Vinci 48	--	Privato	--
12070085,03	483403	5055122	61.50	Via L.Da Vinci 48	--	Privato	--
12070085,04	483363	5055082	31.00	Via L.Da Vinci 48	--	Privato	--
12070085,05	483316	5055185	60.50	Via L.Da Vinci 48	--	Privato	--
12070085,06	483240	5055223	31.00	Via L.Da Vinci 48	--	Privato	--
12070085,07	483260	5055320	22.00	Via L.Da Vinci 48	--	Privato	--
12070085,08	483410	5055299	28.00	Via L.Da Vinci 48	--	Privato	--
12070085,09	483384	5055168	110.30	Via L.Da Vinci 48	--	Privato	--
12070086,00	485233	5055139	152.00	Via Milano 85	Attivo	Privato	Antincendio
12070088,00	483576	5057915	38.00	Via Pradisera, N.10	Attivo	Privato	--
12070089,00	483291	5056523	51.00	Via Fucini 4	Inattivo	Privato	--
12070090,00	482186	5059066	51.00	Via Assisi 103	Attivo	Privato	Scambio termico
12070092,01	483554	5056766	45.00	Via Volta 15	Attivo	Privato	Scambio termico
12070093,00	483905	5055296	40.00	--	Attivo	Privato	Industriale
12070094,00	482726	5057296	55.00	Via Giussano 2	Attivo	Privato	--
12070095,00	485009	5055440	70.00	Stazione FS	Chiuso	Privato	Ig. Sanitario
12070097,01	484070	5055335	60.00	Via Torino Angolo Via Parini	Attivo	Privato	Scambio termico
12070102,01	483465	5056445	--	Via Marsala 2	Attivo	Privato	--

Tabella A-10: Pozzi del comune di Gallarate (VA)

Codice	Utm X	Utm Y	Profondità dal p.c, [m]	Località	Stato	Tipo	Uso
12106001.00	482423	5065783	22.00	Montonate - Via Dandolo	--	Pubblico	Potabile
12106002.00	481353	5064091	50.00	Vinago	Attivo	Pubblico	Potabile
12106003.00	481108	5064934	50.00	Borlera Di Vinago	Attivo	Pubblico	Potabile
12106011,01	480800	5064947	26.00	Vinago	Attivo	Pubblico	Potabile
12106011,02	479329	5064354	40.00	Crugnola-Fiorello	--	Pubblico	--
12106011,03	479957	5065926	56.80	--	--	Pubblico	--
12106011,04	479913	5065851	36.00	--	--	Pubblico	--
12106012.00	481997	5066447	58.00	Montonate	Attivo	Pubblico	Potabile
12106013.00	481646	5064961	40.00	Montonate	Chiuso	Pubblico	--
12106013,05	481842	5065000	37.00	Montonate	Inattivo	Pubblico	--
12106013,06	481770	5065019	34.00	Montonate	Inattivo	Pubblico	Potabile
12106014.00	482205	5066724	40.00	Montonate	Attivo	Pubblico	Potabile
12106015.00	481687	5065220	35.00	Montonate	Attivo	Pubblico	Potabile
12106016.00	480947	5067346	65.00	Ponte Dello Strona - Via Brughiere	Attivo	Pubblico	Potabile
12106021,01	480349	5066398	16.00	Via Maino 13	Chiuso	Privato	--
12106021,02	480370	5066384	21.00	Via Maino 13	Chiuso	Privato	--
12106021,03	480286	5066330	57.00	Via Maino 13	Attivo	Privato	Industriale

12106021,04	480254	5066434	13.00	C.Na Ginestra	--	Privato	--
12106021,05	480188	5066422	50.00	Via Maino 13	Chiuso	Privato	Industriale
12106022,02	480043	5064966	39.00	Via Laghetto 12	Chiuso	Privato	--
12106023,01	479663	5064549	42.00	Via Stazione 90	Attivo	Privato	Industriale
12106023,02	479720	5064494	45.00	Via Stazione 90	Attivo	Privato	Industriale
12106024,01	479694	5064391	43.50	Via Stazione 91	Attivo	Privato	Industriale
12106024,02	479714	5064425	--	Via Stazione 91	--	Privato	--
12106025,00	479264	5064110	32.50	Via Stazione 115	Attivo	Privato	Antincendio
12106026,00	479072	5064272	45.00	Via Stazione 116	Attivo	Privato	Ig. Sanitario
12106027,00	478998	5063861	100.50	Via Stazione 123	Attivo	Privato	Industriale
12106028,01	480148	5063518	24.00	Via Risaia 24-Interno	--	Privato	--
12106028,02	480229	5063522	23.00	Via Risaia 24-Interno	--	Privato	--
12106028,03	480432	5063226	44.00	Via Risaia 24-Cimitero	Chiuso	Privato	--
12106028,04	479790	5063610	41.00	Via Risaia 24-Esterno	Attivo	Privato	Industriale
12106029,01	480058	5063321	76.00	Crugnola-Via Pasubio	Chiuso	Privato	--
12106029,02	480106	5063410	25.00	Via Pasubio 44 Crugnola	Attivo	Privato	Industriale
12106030,00	481088	5064587	--	Via C.Na Tusura 1	Inattivo	Privato	--
12106031,01	481607	5064784	15.00	Vinago-Via Per Menzago	--	Privato	--
12106031,02	481746	5064726	29.00	Vinago-Via Per Menzago	Attivo	Privato	Allevamento
12106032,00	480619	5063201	56.00	Villa Crugnalo	Attivo	Privato	Irriguo
12106033,00	480134	5064607	32.00	Via Piave 54	--	Privato	--
12106034,00	480182	5065971	--	Molino Baraggiolo	--	Privato	--
12106035,00	480254	5064091	--	Crugnola-Via Ferrer 54	--	Privato	--
12106036,00	480783	5065082	--	Vinago-Via Ronchetto 3	--	Privato	--
12106037,00	480513	5064747	21.50	Via Verdi	Attivo	Privato	Irriguo
12106038,00	480669	5064477	13.00	Vinago-Via Galvani 10	Attivo	Privato	Domestico
12106039,00	480108	5063324	63.00	Crugnola	Attivo	Privato	Industriale
12106040,00	481892	5066126	--	Via Dante 40	Attivo	Privato	Antincendio
12106041,00	480925	5064611	--	Via SS. Gaudenzio E Biagio N. 36 Vinago	Inattivo	Privato	--
12106042,01	480067	5064902	15.00	Via Laghetto	Attivo	Privato	--
12106042,02	480082	5064897	15.00	Via Laghetto	Attivo	Privato	--
12106042,03	480097	5064890	15.00	Via Laghetto	Attivo	Privato	--
12106042,04	480076	5064834	20.00	Via Laghetto	Attivo	Privato	--
12106042,05	480054	5064842	20.00	Via Laghetto	Attivo	Privato	--
12106042,06	480027	5064851	15.00	Via Laghetto	Attivo	Privato	--

Tabella A-11: Pozzi del comune di Mornago (VA)

Codice	Utm X	Utm Y	Profondità dal p.c., [m]	Località	Stato	Tipo	Uso
12138000.00	478096	5064049	40.00	Cimbri	--	Pubblico	--
12138001.00	478460	5063141	12.00	Fontanone	Attivo	Pubblico	Potabile
12138002.00	478463	5063146	12.00	Fontanone	Attivo	Pubblico	Potabile
12138003.00	478466	5063151	14.00	Fontanone	Attivo	Pubblico	Potabile
12138004.00	475443	5064678	50.00	Corengo-Via F.Ili Rosselli	Attivo	Pubblico	Potabile

12138005.00	475406	5064457	76.00	Passerini	Attivo	Pubblico	Potabile
12138006.00	478438	5063061	55.00	Strona	Inattivo	Pubblico	--
12138012.00	477157	5066210	--	Curone	--	Pubblico	--
12138021,01	476663	5061752	108.00	Via Roma 51	Attivo	Privato	Industriale
12138021,02	476760	5061740	150.00	Via Roma 51	Attivo	Privato	Industriale
12138021,03	476464	5062264	102.00	Via Roma 51	Inattivo	Privato	--
12138023,01	479290	5064715	--	Cimbri-Via Prada 1	Attivo	Privato	Industriale
12138023,02	479226	5064582	33.00	Cimbri-Via Prada 1	Attivo	Privato	Industriale
12138023,03	479186	5064709	37.00	Cimbri-Via Prada 1	Attivo	Privato	Industriale
12138024.00	475702	5061033	73.00	Via Garzonera 5	--	Privato	--
12138025.00	476826	5063826	4.00	Via Donda 14	--	Privato	--
12138026.00	478543	5064294	55.00	Cimbri	--	Privato	--
12138027.00	476958	5064068	56.00	Via Donda-Villa	--	Privato	--
12138028.00	476058	5065870	69.00	Corgeno	--	Privato	--
12138029.00	476392	5066768	3.00	Corgeno-Via Leopardi	--	Privato	--
12138030.00	475704	5061505	--	Garzonera	--	Privato	--
12138031.00	478250	5064384	--	C.Na Tezzone	--	Privato	--
12138032,01	477438	5064094	--	C.Na Torretta	--	Privato	--
12138032,02	477339	5064192	--	C.Na Torretta	--	Privato	--
12138033.00	474354	5064312	60.00	C.Na La Passera	Attivo	Privato	Allevamento
12138034.00	476065	5064170	--	Via Delle Ville 18	--	Privato	--
12138035.00	476286	5063539	10.00	P.Za Beia 11	--	Privato	--
12138036.00	476280	5063653	5.00	Via Lo Gatti 4	--	Privato	--
12138038.00	475562	5065051	83.00	Corgeno	Attivo	Privato	Allevamento
12138039.00	478312	5064726	90.00	Cimbri	Attivo	Privato	Ig. Sanitario
12138041.00	476787	5061472	100.50	S.P 47 - Tiro A Segno	Attivo	Privato	Industriale
12138042.00	474804	5064135	71.00		Chiuso	Privato	--

Tabella A-12: Pozzi del comune di Vergiate Besnate (VA)

Codice	Utm X	Utm Y	Profondità dal p.c., [m]	Località	Stato	Tipo	Uso
12005001.00	479078	5059602	150.00	Via Macchi	Inattivo	Pubblico	--
12005002.00	479321	5059322	157.50	Via Vanoni	Inattivo	Pubblico	--
12005003.00	479428	5060133	158.00	Via Mazzini	Inattivo	Pubblico	--
12005004.00	478544	5059617	225.00	Via Monterosa	Attivo	Pubblico	Potabile
12005005.00	478988	5062203	84.00	Gobbia-Via Bagnoli	Attivo	Pubblico	Potabile
12005021.00	477545	5061804	--	C.Nadia	--	Privato	--
12005022.00	477863	5062194	--	Molino Peschiera	--	Privato	--
12005023.00	479379	5061052	160.00	Autostrada-Stazione	--	Privato	--
12005024.00	479939	5061080	46.00	Fontana Via -S.Giorgio	--	Privato	--
12005025.00	479245	5058282	99.00	SS 33 Del Sempione Km 44+150	Attivo	Privato	Autolavaggio

Tabella A-13: Pozzi del comune di Arsago Seprio (VA)

Codice	Utm X	Utm Y	Profondità dal p.c., [m]	Località	Stato	Tipo	Uso
--------	-------	-------	--------------------------	----------	-------	------	-----

12048004.00	482853	5060204	148.00	Valle Del Boia	Attivo	Pubblico	Potabile
12048021.00	485302	5060245	64.00	Via Dei Ferrandi 34	Attivo	Privato	Industriale
12048022.00	484798	5060478	14.00	Via Roma 46	Chiuso	Privato	--
12048023,01	484825	5060058	25.00	Via Cardinal Ferrari	Chiuso	Privato	--
12048024.00	485337	5059994	--	Via M.Asso 34	--	Privato	--
12048025.00	484962	5059466	7.00	Via Xi Febbraio 49	--	Privato	--
12048026.00	484622	5060454	48.57	Via Monte Grappa 7	--	Privato	--
12048027.00	483275	5060124	60.00	Premezzo-Via Montello 971	Escavazione	Privato	--

Tabella A-14: Pozzi del comune di Cavaria con Premezzo (VA)

Codice	Utm X	Utm Y	Profondità dal p.c. [m]	Località	Stato	Tipo	Uso
12040001.00	486824	5058903	106.00	Candia-Via Trento	--	Pubblico	--
12040002.00	486115	5057681	57.00	P.Za Italia	--	Pubblico	--
12040003.00	488146	5055292	100.00	Via Bonicalza	Inattivo	Pubblico	Potabile
12040004.00	488152	5055292	98.00	Via Bonicalza	Inattivo	Pubblico	Potabile
12040005.00	488047	5055274	104.00	Via Gasparoli	Chiuso	Pubblico	Potabile
12040007.00	488226	5055739	115.00	Baraggioli	Attivo	Pubblico	Potabile
12040009,01	485453	5058285	140.35	Cedrate-Valdarno	Attivo	Pubblico	Potabile
12040009,02	485459	5058291	211.45	Cedrate-Valdarno	Attivo	Pubblico	Potabile
12040010,01	488031	5056312	114.00	Via Fagnanasca	Attivo	Pubblico	Potabile
12040010,02	488018	5056318	182.00	Via Fagnanasca	Attivo	Pubblico	Potabile
12040010,03	488036	5056325	256.20	Via Fagnanasca	Attivo	Pubblico	Potabile
12040011,03	486419	5059310	101.00	C.Na Cattabrega	Attivo	Pubblico	Potabile
12040011,04	486241	5059382	105.00	C.Na Cattabrega	Attivo	Pubblico	Potabile
12040012.00	485403	5058056	225.00	Cedratevia Voltorno12	--	Pubblico	Potabile
12040021.00	488254	5055203	48.50	--	--	Privato	--
12040022,01	487780	5056194	65.00	Via Bonicalza 130	Attivo	Privato	Industriale
12040022,02	487612	5056260	80.00	Via F.Filzi	Attivo	Privato	Industriale
12040023,01	485824	5057433	40.00	Castello-Portineria	--	Privato	--
12040023,02	485786	5057564	--	Castello-Giardino	--	Privato	--
12040024.00	486969	5060358	80.00	C.Na S.Maurizio	Attivo	Privato	Ig. Sanitario
12040025.00	487490	5057057	--	Castello-Via Gasparoli	--	Privato	--
12040026.00	486841	5058789	--	Via Trento-Villa Tacca	--	Privato	--
12040027.00	486679	5057271	48.00	Via Gasparoli 28	--	Privato	--
12040028.00	486897	5057966	80.00	Via Dubini 2	--	Privato	--
12040029.00	487887	5054819	60.00	Via Bonicalza-C.Lange	--	Privato	--
12040030.00	487144	5057662	81.00	Via Pascoli	Inattivo	Privato	--
12040031.00	486616	5058455	50.00	Via Trento	--	Privato	--
12040032.00	486939	5055556	102.00	Via Boscaccio 45	Attivo	Privato	Industriale
12040037.00	487066	5055786	--	Via Piemonte, N. 40 B/C/D	Attivo	Privato	Scambio termico
12040038.00	486332	5059039	--	Via Dolomiti, N. 26	Attivo	Privato	--

Tabella A-15: Pozzi del comune di Cassano Magnago (VA)

## B. Allegato B

Di seguito si riportano le caratteristiche dei piezometri provenienti dalle fonti Piano Cave della Provincia di Varese, SEA.spa, ARPA Varese, APRA Novara, SIA Società metropolitana di Milano.

Vengono forniti il codice identificativo, il comune, le coordinate WGS 84, la quota del piano campagna e quella della testa pozzo, la profondità di perforazione, la profondità dei filtri e il diametro.

Anche in questo caso i dati risultano frammentati come nell'*Allegato A*.

Denominazione	Comune	Utm X	Utm Y	Quota p.c [m s.l.m]	Quota pozzo [m s.l.m]	Profondità' dal p.c [m]	Profondità Filtri da p.c [m]	Diametro [mm]
PO012002NU0008	Albizzate	485002	5065315	315.120	315.120	48.5	18-28.5	500
PO012026NU3021	Busto Arsizio	486383	5048270	204.682	205.232	102	42-48, 83-95	--
PO012030NR0026	Cantello	491633	5076307	332.91	332.91	66	21-27	300
PO012036NU0003	Casale Litta	479344	5065126	279.521	279.521	65	21-29.5	400
PO0120500RZ001	Cislago	495380	5054832	207.752	207.752	15	--	--
PO012051NU0001	Cittiglio	474280	5082403	241.551	241.551	55.5	17-55.5	300
PO012068NUP001	Fermo	481210	5051028	209.395	209.395	101.5	65-74, 82-85	300
PO012070NU1007	Gallarate	482391	5056403	254.856	254.856	65	32-35, 46-48, 49-51, 53-55	300
PO0120750R2020	Gerenzano	498243	5052530	220.626	220.626	62	33.5-59	450
PO0120790RZ001	Gorla Minore	494757	5054445	241.521	241.521	50	--	--
PO012090NU2009	Lonate Pozzolo	477623	5050127	207.946	207.946	82.6	55-74	508
PO012092NR0021	Luino	480391	5093597	216.972	211.172	70	30-50	350
PO012106NU0015	Mornago	481694	5065224	290.796	290.796	36	17-26	400
PO012109NUB005	Origgio	501795	5049660	194.002	194.402	100	71.2-77.5, 82.5-88	405
PO0121180U0005	Samarate	481042	5052887	226.067	226.067	80	50-62, 64-72	500
PO012123NUP001	Somma Lombardo	477395	5053945	231.736	231.736	100	58-88	310
PO0121300RZ001	Uboldo	497814	5049212	204.200	204.200	45	--	--
PO012136NUZ001	Venegono Inferiore	493230	5064390	316.009	316.009	67	28-40, 49-55	220

Tabella B-1: Piezometri ARPA (VA) in falda A

Denominazione	Comune	Utm X	Utm Y	Quota p.c [m s.l.m]	Quota pozzo [m s.l.m]	Profondità' dal p.c [m]	Profondità Filtri da p.c [m]	Diametro [mm]
PO0121180U2006	Samarate	483904	5053934	230.000	230.000	153	76-131	350
PO012118NUP001	Samarate	483001	5052916	221.979	221.979	124	122-124	350
PO012119NU0009	Saronno	503627	5052466	212.98	212.980	143	71.99-84.9, 95.01-98.01	350
PO012119NUP001	Saronno	504052	5054374	225.614	225.614	196.5	122-124	350
PO012120NU0002	Sesto Calende	471372	5064250	208.632	208.632	151.3	98.35-107.43, 110.45-119.51, 124.05-131.61, 137.65-142.2, 145.23-148.26	500
PO012090NU3009	Lonate Pozzolo	477623	5050130	207.945	207.945	250.6	226-244	--

Tabella B-2: Piezometri ARPA (VA) in falda B

Denominazione	Comune	Utm X	Utm Y	Quota p.c [m s.l.m]	Quota pozzo [m s.l.m]	Profondita' dal p.c [m]	Profondità Filtri da p.c [m]	Diametro [mm]
PII31	Caltignaga	467455	5040803	179	179	15	5.78-15	130
PII32	Cameri	472182	5039240	164	164	15	6.22-15	130
PII28	Momo	465047	5046124	205.56	205.56	--	--	--
PII29	Oleggio	470722	5049647	231.59	231.59	40	5-6, 22.55-40	150
PII51	Suno	463732	5053030	251	251	--	--	--

Tabella B-3: Piezometri in falda A della provincia di Novara

Denominazione	Comune	Utm X	Utm Y	Quota p.c [m s.l.m]	Quota pozzo [m s.l.m]	Profondita' dal p.c [m]	Profondità Filtri da p.c [m]	Diametro [mm]
150410060	Busto Garolfo	491605	5042131	172.37	172.37	35	27-33	--
150410061	Busto Garolfo	491634	5042029	170.97	170.97	35	27-33	--
150410062	Busto Garolfo	491797	5042127	171.73	171.73	35	27-33	--
150410063	Busto Garolfo	490977	5042342	174.49	174.49	42	28-34	320
150410074	Busto Garolfo	491125	5042461	175.1	175.1	30	15-30	200
150410075	Busto Garolfo	491337	5042014	172	172	30	15-30	200
150410076	Busto Garolfo	491192	5041953	170.61	170.61	30	15-30	200
150620058	Castano Primo	478750	5043640	148.26	148.26	20	&6-20	--
150620059	Castano Primo	479039	5043710	148.92	148.92	20	&6-20	--
150620060	Castano Primo	479083	5043265	150.12	150.12	21	&6-21	--
150620061	Castano Primo	479291	5043274	154.52	154.52	20.7	&6-20.7	--
150720020	Cerro Maggiore	497172	5047000	--	--	40	31-40	203
150720040	Cerro Maggiore	497579	5047312	193.79	190.79	45	21-42	190
150720041	Cerro Maggiore	497534	5046956	--	--	45	21-42	190
151830028	Robecchetto Con Induno	482719	5041007	165.4	165.4	30	--	--
152490020	Vanzaghello	482338	5046696	191.89	--	-	--	--
151540063	Nerviano	498073	5045380	180.63	180.63	42	27-30, 33-42	152
151540066	Nerviano	498293	5043035	166	166	50	40.50-50	106
151540067	Nerviano	497686	5045664	169.97	169.97	7.5	6-9	--
151540068	Nerviano	497943	5045365	181.02	181.02	30	17-29	--
151540069	Nerviano	498353	5045880	182	182	57	25-52	114
151540070	Nerviano	498071	5046245	187.3	187.3	55	25-52	114
150580025	Casorezzo	491032	5041400	169.03	165.03	40	30-32	152
150580029	Casorezzo	494402	5041237	167.42	167.42	39	6-39	--
150960047	Cuggiono	483733	5038940	156.67	156.67	15	6-12	--
150960048	Cuggiono	483255	5038631	134.14	134.14	33	21-30	--
150380034	Buscate	486514	5045128	187.71	184.71	40	15-40	--
150380035	Buscate	486256	5044772	171.37	168.37	40	15-41	--

Tabella B-4: Piezometri in falda A della provincia di Milano (SIA-Città metropolitana)

<i>Denominazione</i>	<i>Comune</i>	<i>Utm X</i>	<i>Utm Y</i>	<i>Quota p.c [m s.l.m]</i>	<i>Quota pozzo [m s.l.m]</i>	<i>Profondita' dal p.c [m]</i>	<i>Profondità Filtri da p.c [m]</i>
A	Lonate Pozzolo	478593	5047512	193.40	--	--	--
B1	Lonate Pozzolo	478123	5046813	154.56	--	--	--
C	Lonate Pozzolo	477908	5046854	190.74	--	--	--
D	Lonate Pozzolo	478474	5047757	194.72	--	--	--
E	Lonate Pozzolo	478916	5047161	178.44	--	--	--
F	Lonate Pozzolo	478315	5047315	158.54	--	--	--
G	Lonate Pozzolo	478178	5047222	158.10	--	--	--
B2	Lonate Pozzolo	478095	5046918	154.56	--	--	--

*Tabella B-5: Piezometri Cada Ticino (S.Anna) (VA)*

<i>Denominazione</i>	<i>Comune</i>	<i>Utm X</i>	<i>Utm Y</i>	<i>Quota p.c [m s.l.m]</i>	<i>Quota pozzo [m s.l.m]</i>	<i>Profondita' dal p.c [m]</i>	<i>Profondità Filtri da p.c [m]</i>
C	Lonate Pozzolo	478166	5055562	234.9	--	--	--

*Tabella B-6: Piezometri Cave Riunite (Frutteto) (VA)*

<i>Denominazione</i>	<i>Comune</i>	<i>Utm X</i>	<i>Utm Y</i>	<i>Quota p.c [m s.l.m]</i>	<i>Quota pozzo [m s.l.m]</i>	<i>Profondita' dal p.c [m]</i>	<i>Profondità Filtri da p.c [m]</i>
PMF1	Lonate Pozzolo	480051	5046538	190.17	--	--	--
PMF2	Lonate Pozzolo	479730	5047098	190.50	188.80	--	--
PMF3	Lonate Pozzolo	479792	5047332	194.57	--	--	--
PMF4	Lonate Pozzolo	480246	5047726	196.55	--	--	--
PMF5	Lonate Pozzolo	480382	5047464	162.97	--	--	--
PMF6	Lonate Pozzolo	480622	5047463	195.36	--	--	--
PMF7	Lonate Pozzolo	480682	5046687	191.69	--	--	--
PMF8	Lonate Pozzolo	480265	5047012	164.26	--	--	--

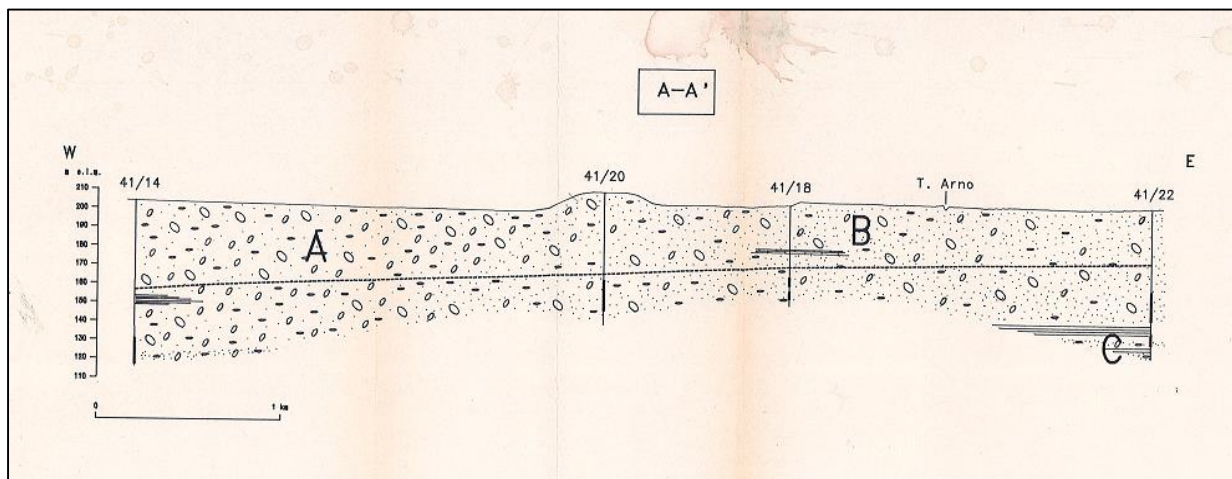
*Tabella B-7: Piezometri Cava Calderona (VA)*



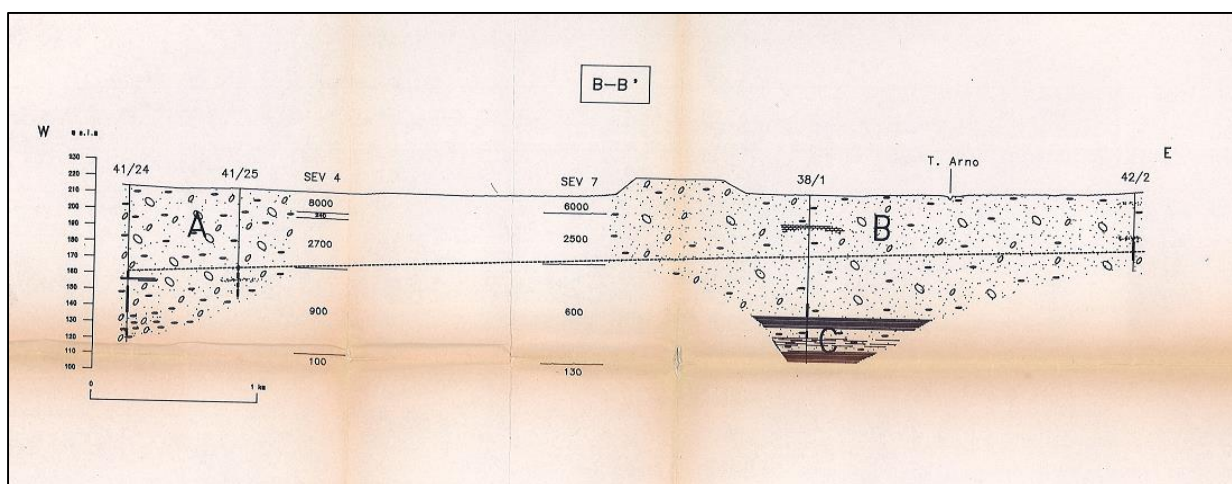


## C. Allegato C

In aggiunta alle sezioni stratigrafiche C-C' e D-D' riportate al *Paragrafo 3.3.1*, forniamo le restanti *Figure C-1-C-7*.



*Figura C-1: Sezione stratigrafica A-A' - SEA.spa*



*Figura C-2: Sezione stratigrafica B-B' - SEA.spa*

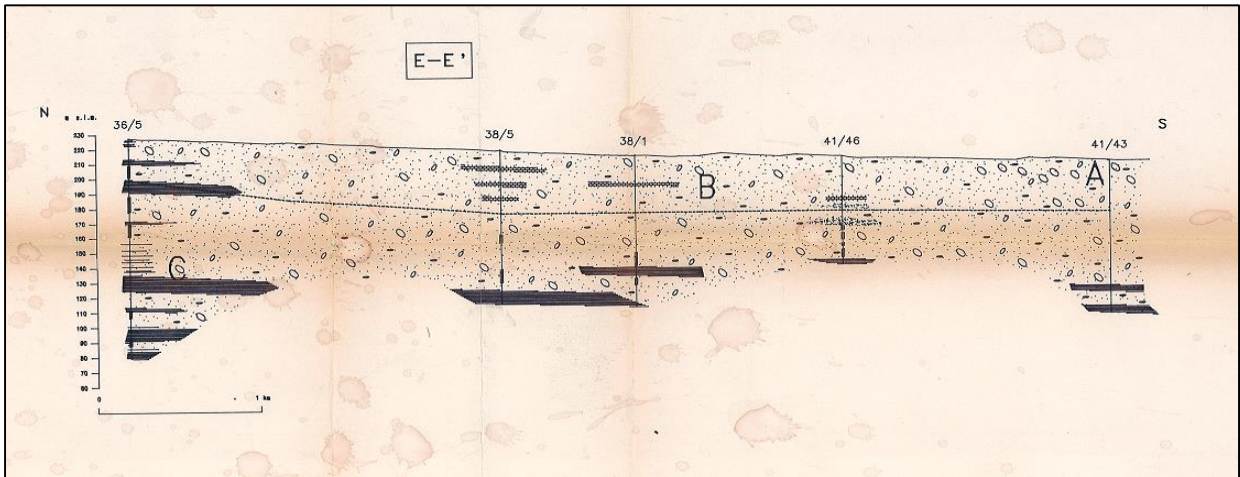


Figura C-3: Sezione stratigrafica E-E' - SEA.spa

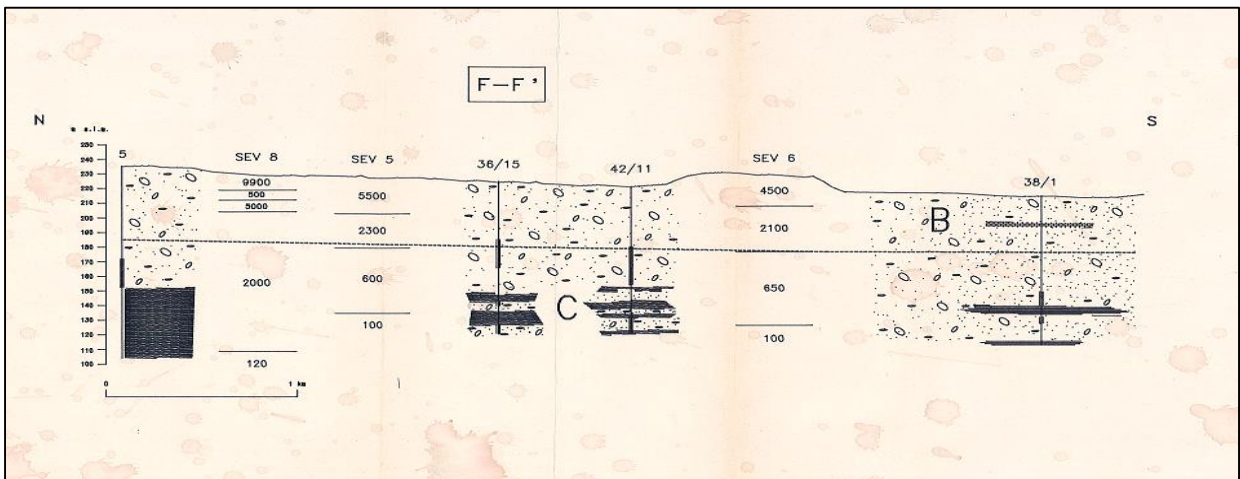


Figura C-4: Sezione stratigrafica F-F' - SEA.spa

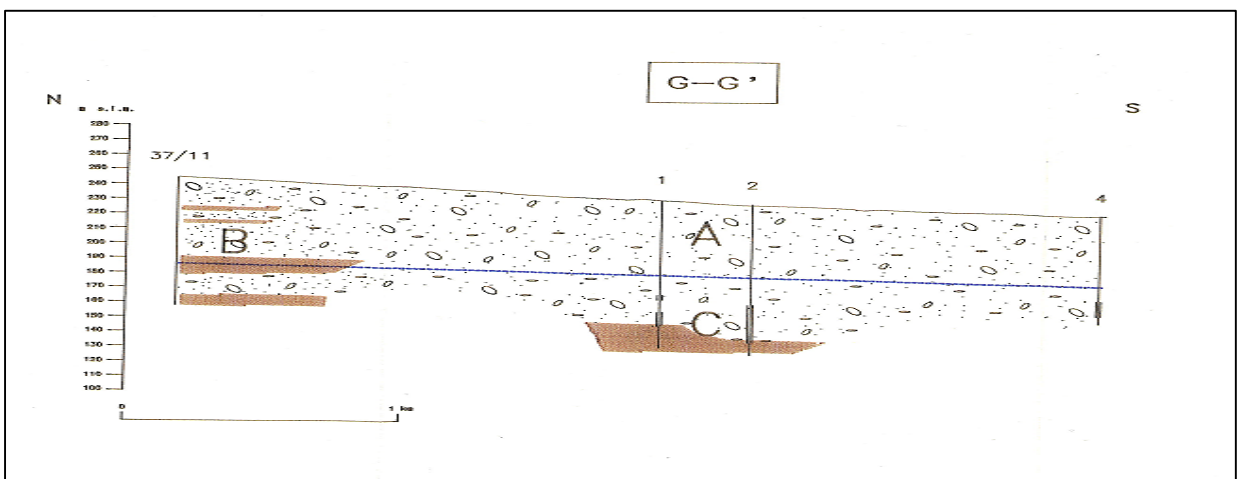


Figura C-5: Sezione stratigrafica G-G' - SEA.spa

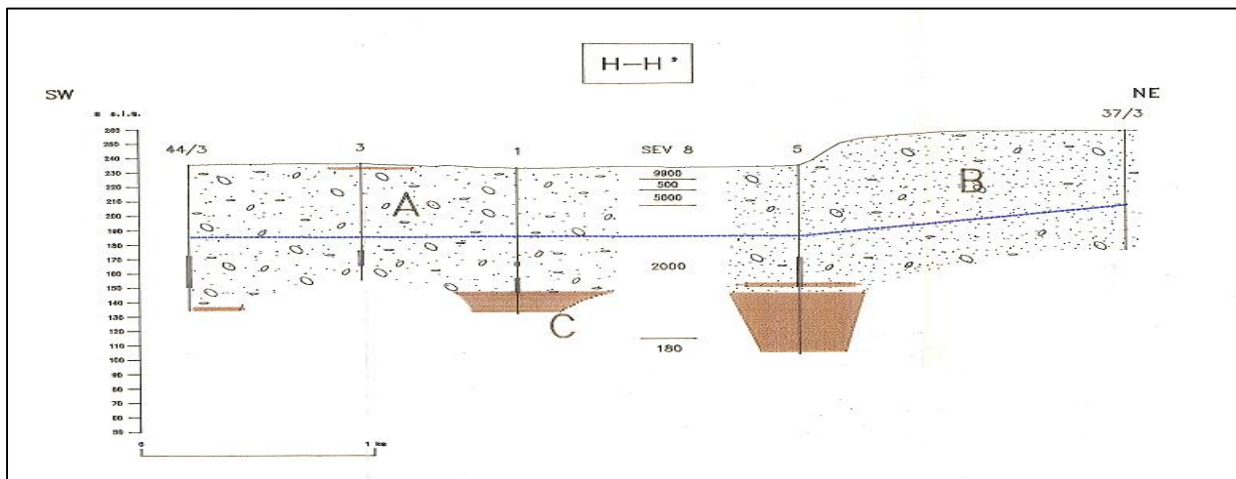


Figura C-6: Sezione stratigrafica H-H' - SEA.spa

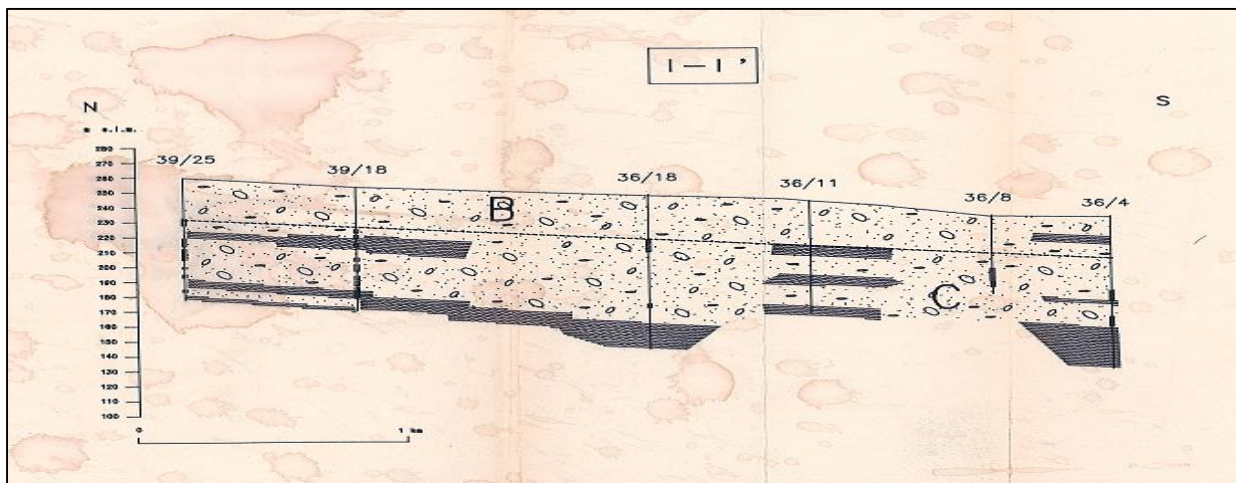


Figura C-7: Sezione stratigrafica I-I' - SEA.spa



---

## Bibliografia

Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Regione Lombardia, Stato delle acque sotterranee area idrogeologica Ticino-Adda, ottobre 2015.

Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Regione Lombardia, Stato delle acque sotterranee della provincia di Milano, settembre 2013.

Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Regione Lombardia, Stato delle acque superficiali bacino del fiume Ticino e Lago Maggiore, ottobre 2015.

Carrera J., An overview of uncertainties in modelling groundwater solute transport, *Journal of Contaminant Hydrology*, 13, 23-48, 2013.

Carrera J., Alcolea A., Medina A., Hidalgo J., Slooten L. J., Inverse problem in hydrogeology, *J. Hydrol.*, 13, 206-222, 2005.

Carrera, J., and S. P. Neuman, Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 1. Maximum likelihood method incorporating prior information, *Water Resour. Res.*, 22(2), 199– 210, 1986a.

Carrera, J., and S. P. Neuman, Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 3. Application to synthetic and field data, *Water Resour. Res.*, 22(2), 228– 242, 1986b.

Deutsch C. V., Journel A.G., *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*, Oxford University Press, New York, pages 340, 1998.

ERM Italia s.r.l, SEA Aeroporto di Malpensa: Modello di Flusso della Falda, *SEA.spa*, dicembre 2002.

Franzetti S., Guadagnini A., Riva M., Mambretti S., Pelucchi M., Bagioli D., Studio delle interazioni tra la falda e il deposito Early Bags, Milano, 7 febbraio 2005.

Geologia degli acquiferi padani della Regione Lombardia. A cura di Cipriano Carcano e Andrea Piccin. S.EL.CA. (Firenze). Regione Lombardia, ENI Divisione Agip, 2002.

Guadagnini, L., A. Guadagnini, and D.M. Tartakovsky, Probabilistic Reconstruction of geologic facies, *J. of Hydrol.*, 294, 57-67, 2004.



Hill M. C., Banta E. R., Harbaugh A. W., Anderman E. R., MODFLOW-2005, the U. S. Geological Survey modular groundwater model—User guide to the observation, sensitivity, and parameter estimation processes and three post-processing programs, U.S. Geol. Surv. Open File Rep., 00-184, 209 pp, 2005.

Hoeting J.A., Madigan D., Raftery A.E., Volinsky C.T., Bayesian model averaging: A tutorial, *Statist. Sci.*, 14(4), 382-417, 1999.

Irace A., Clemente M., Natalicchio M., Ossella L., *Geologica e idrostratigrafia profonda della Pianura Padana occidentale*, Torino, ottobre 2009.

Lodi S. e Frisiani S., *Studio di Impatto Ambientale – Nuovo Master Plan Aeroportuale dell’Aeroporto di Malpensa*, 3 marzo 2010.

McDonald, M. G. e Harbaugh, A. W., A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model, Manual 83-875. U.S. Geological Survey, 1988.

Mood M. A., Graybill F. A., Duane C.B., *Introduction to the theory of Statistics*, Third edition, McGraw-Hill, 1986.

Neuman, S. P., Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of watertable. *Water Resources Res.*, vol. 8, pp 1031-1045, 1972.

Neuman, S. P., Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifer considering delayed gravity response. *Water Resources Res.*, vol. 11, pp 329-342, 1975.

Kitanidis P. K., Lane R. W., Maximum likelihood parameter estimation of hydrologic spatial processes by the Gauss-Newton method, *Hydrol.*, 79(1-2), 53-71, 1998.

Krivoruchko K., Implemented in ArcGIS Geostatistical Analyst, Senior Research Associate, Software Development Team, Esri Pragmatic Bayesian Kriging for Non-Stationary and Moderately Non-Gaussian Data, 2012.

Pilz J., Spořek G., Why do we need and how should we implement Bayesian kriging methods, *Springer-Verla*, 20 June 2007.

Progetto di Piano stralcio per l’Assetto Idrogeologico (PAI), interventi sulla rete idrografica e sui versanti, 11.05.1999.

Provincia di Varese, Piano Cave della Provincia di Varese, L.R. 14/98 – Nuove Norme per la disciplina e coltivazione di sostanze minerali di cava, 2004.

Regione Lombardia – D. G. Reti e Servizi di Pubblica Utilità – U. O. Regolazione del Mercato e Programmazione, Programma di Tutela e Uso delle Acque – Allegato 1 “Costruzione di una base dati per la caratterizzazione dei corpi idrici significativi”, marzo 2006.

Regione Lombardia – D. G. Reti e Servizi di Pubblica Utilità – U. O. Regolazione del Mercato e Programmazione, Programma di Tutela e Uso delle Acque – Allegato 2 “Stima delle portate e delle precipitazioni e strumenti per la loro regionalizzazione”, marzo 2006.

Regione Lombardia – D. G. Reti e Servizi di Pubblica Utilità – U. O. Regolazione del Mercato e Programmazione, Programma di Tutela e Uso delle Acque – Allegato 3 “Classificazione dello stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei di pianura”, marzo 2006.

Regione Lombardia – D. G. Reti e Servizi di Pubblica Utilità – U. O. Regolazione del Mercato e Programmazione, Programma di Tutela e Uso delle Acque – Allegato 5 “Uso, risparmio e riuso della risorsa idrica”, marzo 2006.

Regione Lombardia – D. G. Reti e Servizi di Pubblica Utilità – U. O. Regolazione del Mercato e Programmazione, Programma di Tutela e Uso delle Acque – Allegato 11 “Definizione delle aree di ricarica e di riserva nelle zone di pianura”, marzo 2006.

Regione Lombardia – D. G. Reti e Servizi di Pubblica Utilità – U. O. Regolazione del Mercato e Programmazione, Programma di Tutela e Uso delle Acque - Rapporto Ambientale (VAS), marzo 2006.

Regione Lombardia – D. G. Reti e Servizi di Pubblica Utilità – U. O. Regolazione del Mercato e Programmazione, Programma di Tutela e Uso delle Acque – Relazione generale, marzo 2006.

Regione Piemonte, Piano di Tutela delle Acque, MP1 – Pianura Novarese – Biellese - Vercellese, marzo 2007.

Regione Piemonte, Piano di Tutela delle Acque, Sottobacino: Ticino AI34 – Tredoppio Novarese, marzo 2007.

Saraceni F., Troisi S., Guadagnini A., Riva M., Straface S., Ricostruzione Geostatistica di Litofacies in un acquifero sedimentario. Applicazione al sistema multiacquifero di Cremona, 2008.





## Sitografia

ARPA Lombardia, *Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente*,  
<http://idro.arpalombardia.it/pmapper-4.0/map.phtml>

AIPo, *Agenzia Interregionale per il fiume Po*,  
[http://geoportale.agenziapo.it/cms/index.php?option=com\\_aipografd3&view=main](http://geoportale.agenziapo.it/cms/index.php?option=com_aipografd3&view=main)

SIA, *Sistema Informativo Ambientale della Città metropolitana di Milano*,  
<http://ambiente.provincia.milano.it/>

REGIONE PIEMONTE, *Geoportale*,  
<http://www.regione.piemonte.it/monitgis/jsp/cartografia/mappa.do>

TANGRAM, *Database per pozzi*, <http://www.tangram.samit.unimib.it/>

REGIONE LOMBARDIA, <http://www.geoportale.regione.lombardia.it/download-dati>