

(7) Modello concettuale-matematico e monitoraggio dell'area di studio

Alberto Guadagnini, Laura Guadagnini, Monica Riva, Enrico Larcan, Enrico Orsi,

Matteo Salmaso

Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale, Infrastrutture Viarie e Rilevamento,

Politecnico di Milano, Milano

7.1 Area di studio

L'area oggetto di studio è delimitata ad Ovest e a Sud dal fiume Adda, che scorre in direzione Nord – Sud sino a Crotta d'Adda, dove si immette nel fiume Po, e ad Est dal fiume Serio, che scorre in direzione Nord-Sud confluendo nel fiume Adda in località Montodine. L'area è delimitata a Nord dal limite settentrionale individuato nell'ambito di un progetto di tesi sviluppato presso il Politecnico di Milano [Rametta, 2008]. Indicativamente, tale limite settentrionale si colloca lungo il parallelo che corre in corrispondenza della coordinata Gauss-Boaga 5060000 Nord. I limiti descritti individuano un dominio di estensione superficiale pari a circa 785 km², nel seguito identificato come *modello a grande scala*. La localizzazione planimetrica di tale area è riportata in *Figura 7.1.1*.

Nell'ambito di tale regione è stata individuata un'area campione destinata ad indagini di dettaglio. La scelta è stata effettuata essenzialmente sulla base delle seguenti considerazioni: (a) presenza, al suo interno, di numerosi fontanili che alimentano una serie di aste fontanilizie di interesse rilevante. Si distinguono principalmente, sia in relazione alle portate derivate sia in relazione al grado di interesse naturalistico, i canali Misana, Quarantina e Acquarossa; (b) esistenza di una significativa interazione fra acque superficiali e acque sotterranee.

L'analisi dell'effetto contemporaneo di risorgive, di una fitta rete di canali superficiali e di pozzi di emungimento (utilizzati sia a scopo idropotabile che irriguo) richiede la modellazione di meccanismi diversi per la quantificazione dei flussi idrici.

L'area campione, che si sviluppa su di una porzione di territorio ubicata nel settore di confine tra le province di Bergamo e Cremona, sarà indicata nel seguito come *modello a scala di dettaglio*. L'ubicazione di tale area è riportata nelle *Figure 7.1.1* e *7.1.2*. Si tratta di un'area di forma rettangolare i cui lati hanno dimensioni rispettivamente pari a circa 7,4 e 6,7 km. Il vertice sud-occidentale ha coordinate Gauss-Boaga pari a 1544260 E, 5029856 N. All'interno dell'area campione si collocano i territori dei comuni di Vailate, Pieranica, Quintano, Capralba, Torlino Vimercati, Misano Gera d'Adda. Risultano, inoltre, parzialmente compresi all'interno di tale area i territori dei Comuni di Arzago d'Adda, Agnadello, Casaletto Vaprio, Caravaggio, Calvenzano, Casirate d'Adda, Agnadello, Pandino, Palazzo Pignano, Trescore Cremasco, Campagnola Cremasca, Sergnano, Mozzanica.

Nell'ambito dell'area di dettaglio è stata approntata, nel corso dello studio, una rete di monitoraggio piezometrico e di misura delle portate in uscita dai fontanili Misana, Quarantina, Acquarossa. La rete di monitoraggio e i dati acquisiti, utilizzati in fase di calibrazione del modello matematico, vengono descritti al successivo *Paragrafo 7.3*.

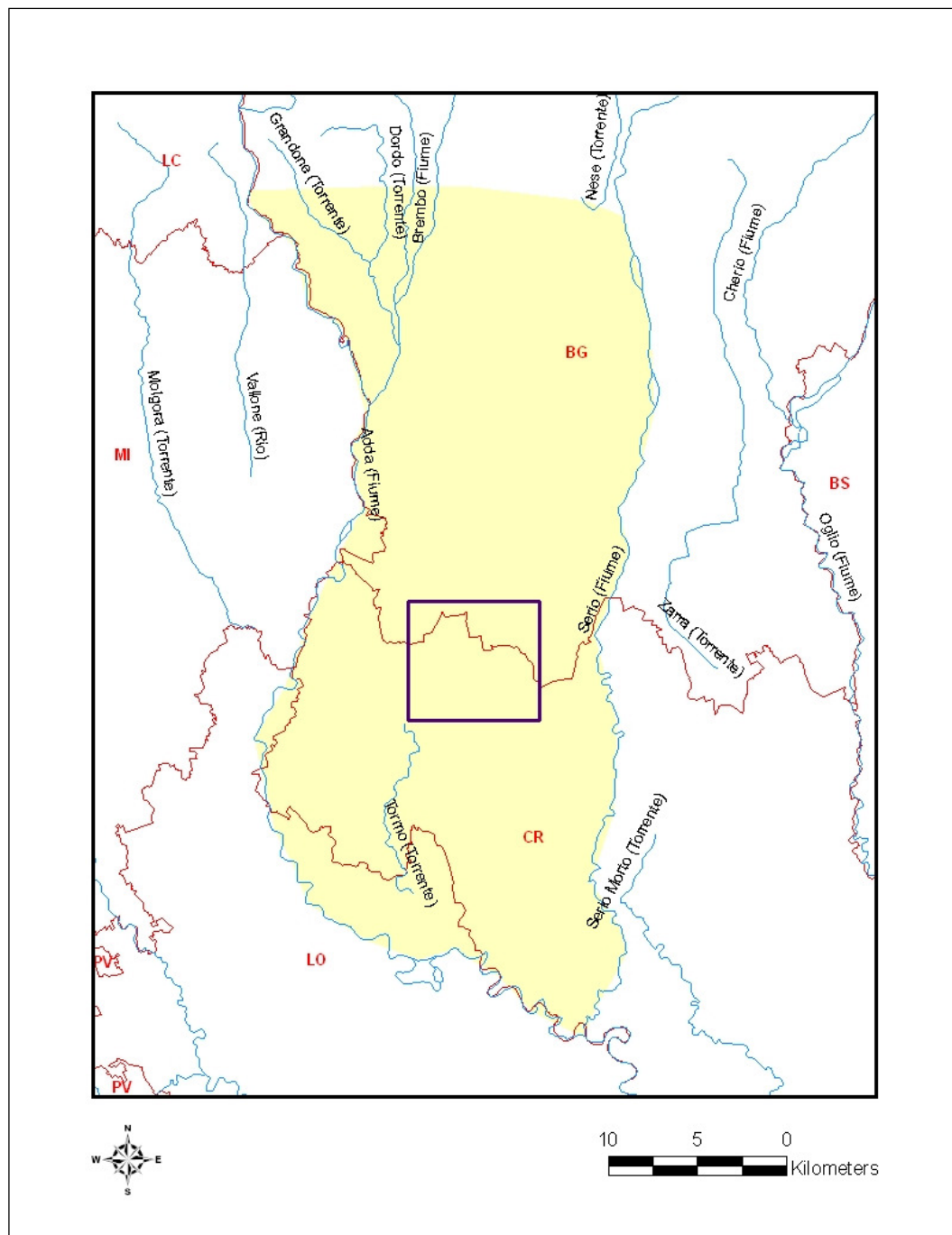


Figura 7.1.1: Modello a grande scala (area in colore giallo) e modello alla scala di dettaglio (rettangolo in colore viola)

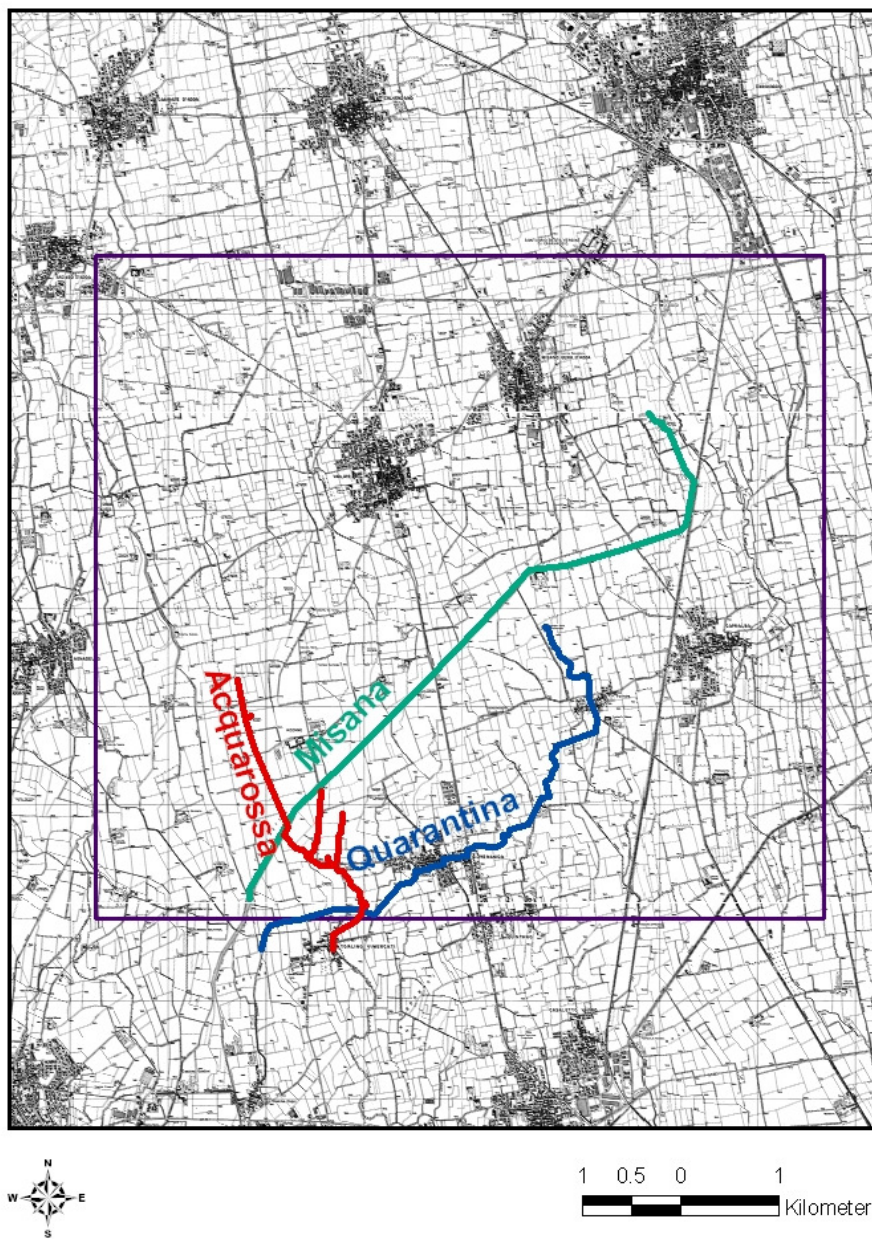


Figura 7.1.2: Modello a scala di dettaglio (rettangolo in colore viola)

7.2 Modello concettuale

7.2.1 Struttura idrogeologica del sistema acquifero

Le informazioni litostratigrafiche disponibili sono state analizzate nella prospettiva di un loro utilizzo finalizzato alla ricostruzione della distribuzione tridimensionale dei litotipi e dei valori di conducibilità idraulica associati tramite metodi di interpolazione geostatistici a variabili indicizzate.

Le metodologie applicate, descritte in dettaglio nei paragrafi successivi e all'interno del *Capitolo 10*, si basano sulla categorizzazione del dato litologico iniziale.

Le indicazioni litologiche contenute all'interno dell'insieme di dati disponibili sono risultate molto eterogenee, derivando, nella maggior parte dei casi, da un esame esclusivamente dei litotipi attraversati nel corso delle operazioni di perforazione.

I dati sono stati omogeneizzati e suddivisi all'interno di 5 categorie. La scelta è stata eseguita sulla base di considerazioni relative alla percentuale volumetrica dei litotipi segnalati e al grado di permeabilità dei depositi accorpando, ad esempio, limi e argille all'interno della medesima categoria (nel seguito indicata come categoria 1) e ghiaie e sabbie all'interno di una unica categoria (nel seguito indicata come categoria 3). Si è ritenuto opportuno, inoltre, rappresentare in maniera distinta i conglomerati fessurati e compatti in relazione al diverso grado di permeabilità e alla localizzazione. Tali litotipi, infatti, caratterizzano principalmente il settore bergamasco del territorio esaminato. La *Tabella 7.2.1.1* riporta lo schema adottato per l'attribuzione dei litotipi presenti nel sistema alle 5 classi (o categorie) che hanno costituito la base per la definizione di variabili indicizzate attraverso cui descrivere la distribuzione dei geomateriali nell'area di interesse. Le percentuali volumetriche associate a ciascuna categoria sono riportate in *Tabella 7.2.1.2*.

Tabella 7.2.1.1: Categorizzazione delle litologie

Categoria	Descrizione
1	Depositi argillosi e limosi
2	Sabbia fine, sabbia argillosa, sabbia limosa
3	Ghiaia, ghiaia e sabbia, sabbia granosa, sabbia media
4	Conglomerato compatto, arenaria
5	Conglomerato fessurato

La ricerca bibliografica e la raccolta dei dati stratigrafici, condotte parallelamente all'analisi delle possibili condizioni al contorno del modello matematico, è stata inizialmente estesa ai territori delle province di Bergamo e di Cremona. In una fase successiva l'attenzione si è focalizzata sulla porzione di territorio delimitata dai tracciati dei fiumi Adda e Serio.

Il modello concettuale geologico preliminare dell'area in esame è stato ricostruito sulla base dei seguenti dati e documenti:

- *Maione et al.* [1991]: dagli elaborati dello studio sono deducibili 218 stratigrafie localizzate nelle province di Bergamo e Cremona e 15 sezioni litostratigrafiche ricostruite;

- Provincia di Cremona -Atlante Ambientale: 464 stratigrafie localizzate all'interno della provincia di Cremona;
- Consorzio della Media Pianura Bergamasca (CMPB): 14 colonne stratigrafiche;
- *Beretta et al.* [1992]: lo studio contiene 29 sezioni litostratigrafiche ricostruite nell'ambito del territorio della Provincia di Cremona.
- Geologia degli acquiferi padani della Regione Lombardia (Regione Lombardia Eni Agip, 2001)

Maione et al. [1991] individuano, nell'ambito del territorio esaminato e dello spessore che si è ritenuto utile modellizzare in relazione al fenomeno indagato, la presenza di un acquifero freatico che ha sede nello spessore di depositi clastici grossolani compresi fra il piano campagna ed uno spessore argilloso che appare caratterizzato da una certa continuità areale alla scala di indagine. Il tetto di tale corpo a bassa conducibilità idraulica, denominato "orizzonte A", coincide nell'alta pianura con il livello argilloso più superficiale presente nel fluvioglaciale valtellinese, complesso che separa il ceppo poligenico dal sottostante ceppo calcareo. Nella bassa pianura la delimitazione di tale orizzonte risulta più incerta.

Lo spessore superficiale è costituito da depositi clastici continentali appartenenti a cicli sedimentari cronologicamente diversi, ma in continuità idraulica laterale tra di loro. All'interno di questi, si distinguono:

- conglomerato poligenico (fluvioglaciale MINDEL) nella porzione alta della pianura;
- ghiaie e sabbie fluvioglaciali (RISS-WURM) che formano la bassa pianura ed il riempimento dei solchi erosivi presenti nel conglomerato poligenico;
- ghiaie e sabbie delle alluvioni recenti ed attuali deposte dai corsi d'acqua che attraversano la pianura.

A nord della linea Canonica d'Adda – Ghisalba prevalgono i depositi conglomeratici, a Sud prevalgono i depositi sciolti (ghiaie e sabbie).

All'interno dello spessore acquifero sono intercalati livelli di argille a varia continuità areale. In conseguenza di questo fatto, l'acquifero può passare da condizioni freatiche a locali condizioni di semiconfinamento. Lo spessore di questo acquifero varia da 40 a 80 m circa, procedendo in direzione Nord-Sud.

L'acquifero confinato si trova al di sotto del livello di argille che costituisce la base dell'acquifero freatico superficiale. All'interno di questo è presente una successione costituita dall'alternanza di sedimenti clastici grossolani e argille in cui il grado di continuità e spessore relativo dei depositi a diversa granulometria risulta molto variabile. All'interno dei livelli porosi e/o fratturati confinati da livelli di sedimenti a granulometria fine hanno sede acquiferi artesiani. La base della sequenza descritta, denominata "orizzonte B" da *Maione et al.* [1991], è formata da litotipi prevalentemente argillosi con rare intercalazioni sabbiose.

Il corpo acquifero artesiano presenta spessore variabile in funzione della geometria del substrato. Si individua una fascia caratterizzata da spessori consistenti (170-200 m) controllata dagli allineamenti Osio Sopra-Osio Sotto, Levate-Verdellino, Comun Nuovo-Urgnano e nella zona di Cologno al Serio. Questo ispessimento rappresenta il riempimento di una depressione morfologico-tettonica. A Sud dell'alto strutturale individuato nelle sezioni, allineato in direzione SO-NE secondo la direttrice Treviglio-Ghisalba, il complesso artesiano tende a ridursi notevolmente (fino a 30-40 m) con un aumento percentuale dei livelli argillosi su quelli porosi.

Beretta et al. [1992] riconoscono, nell'ambito della serie idrogeologica della medio-alta pianura del territorio della provincia di Cremona, quattro unità:

- *Alluvioni recenti e terrazzate, depositi fluvioglaciali wurmiani*: depositi prevalentemente ghiaioso-sabbiosi, costituenti strette fasce intorno ai corsi d'acqua
- *Depositi fluvioglaciali rissiani e mendeliani*: alternanza di litotipi ghiaioso-sabbiosi e limo-argillosi;
- *Argille, limi e torbe in facies villafranchiana*: depositi prevalentemente limoso-argillosi con rare sabbie e ghiaietto;
- *Sabbie di Asti (?)*: depositi prevalentemente fini, talora limoso-sabbiosi.

Gli autori propongono una schematizzazione del sistema acquifero in due falde: una superiore generalmente libera che tende a diventare semiconfinata verso Sud e una profonda in pressione.

L'analisi delle informazioni litostratigrafiche disponibili e di sezioni geologiche ricostruite sulla base dei dati disponibili ha suggerito la possibilità di descrivere le dinamiche del sistema acquifero esistente mediante la zonazione dello spessore in esame in tre regioni principali, ciascuna caratterizzata dalla preponderanza di frazioni volumetriche di litotipi associati a diversi livelli di permeabilità

1. *spessore acquifero superficiale*, prevalentemente costituito da materiali a granulometria grossolana, ghiaiosi e sabbiosi;
2. *spessore in cui è preponderante la presenza di litotipi a bassa permeabilità*, costituito principalmente da depositi limo-argillosi; all'interno di questa zona sono localmente presenti discontinuità nella distribuzione dei geo-materiali a bassa permeabilità, legate alla presenza di litotipi a granulometria grossolana; per semplicità, nel seguito si indicherà tale zona come *spessore intermedio*, il cui comportamento è tipicamente assimilabile a quello di uno spessore acquitardo;
3. *spessore acquifero profondo*, costituito da materiali a granulometria grossolana alternati a lenti di argilla, anche di estensione rilevante.

La ricostruzione della quota della superficie di separazione di ciascuna delle regioni sopra descritte in corrispondenza di ogni cella del dominio di discretizzazione del modello matematico è stata effettuata attraverso l'algoritmo di kriging descritto al Capitolo 10. Le quote del piano campagna sono state riprodotte a partire dal Modello

Digitale del Terreno DTM40. Quest'ultimo è un prodotto ottenuto utilizzando sia le curve di livello della cartografia tecnica regionale 1:50000 o 1:10000, sia nuovi punti quota e break lines introdotti mediante l'osservazione dei modelli di volo Italia94; il DTM40 presenta un passo di campionamento pari a 40 m.

Di seguito, nella *Tabella 7.2.1.2*, sono riportate le percentuali volumetriche, calcolate sulla base delle informazioni litostratigrafiche, per ciascun geomateriale presente in ciascuno dei tre orizzonti individuati.

Tabella 7.2.1.2: Percentuali volumetriche dei 5 geo-materiali all'interno di ciascun spessore

Categoria	Percentuale Volumetrica (%)		
	<i>Spessore acqf superficiale</i>	<i>Spessore intermedio</i>	<i>Spessore acqf profondo</i>
1	22.1	80.8	42.5
2	3.3	2.2	5.9
3	46.8	10.0	26.4
4	21.5	5.7	14.0
5	6.3	1.3	11.2

7.2.2 Condizioni al contorno

I fiumi Adda e Serio sono stati considerati corpi idrici in contatto idraulico diretto con l'acquifero. In *Maione et al.* [1991], si evidenzia che il fiume Adda drena l'acquifero lungo l'intero percorso, mentre il fiume Serio alimenta l'acquifero fino a monte del paese di Ghisalba e lo drena a valle del paese di Mozzanica; nel tratto di percorso compreso fra questi centri abitati, il fiume Serio è sostanzialmente in condizioni di equilibrio idraulico con la falda. Sulla base delle ricostruzioni piezometriche, *Beretta et al.* [1992] riconoscono una azione drenante esercitata dai corsi d'acqua sulla falda superficiale.

Si è scelto, conseguentemente, di imporre condizioni al contorno di Dirichlet in corrispondenza dei corpi fluviali Adda e Serio.

Una condizione di flusso (condizione di Neumann) è stata imposta lungo il confine settentrionale del modello. I valori del flusso in ingresso sono stati riportati da *Rametta* [2008], sulla base del bilancio idrologico, allo stato stazionario, del bacino del fiume Serio, che si colloca a Nord dell'area interessata dal modello sviluppato nel presente studio.

Le teste fontanilizie presenti sul territorio sono state interpretate e modellate come dreni del sistema acquifero.

7.2.3 Piezometria

Le informazioni relative alla presenza di pozzi / piezometri all'interno dell'area in esame sono state ricavate in riferimento alle seguenti fonti:

- Regione Lombardia: Programma di Tutela e Uso delle Acque - PTUA;
- Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente Lombardia - ARPA Lombardia;
- Consorzio di Bonifica della Media Pianura Bergamasca - CMPB.

In una fase preliminare del lavoro, per la ricostruzione della piezometria del sistema acquifero nell'ambito del territorio relativo alle provincie di Bergamo e Cremona sono state analizzate informazioni provenienti da un insieme di 761 pozzi di osservazione, la cui distribuzione planimetrica è riportata in *Figura 7.2.3.1*. Sono stati presi in considerazione anche alcuni punti di misura esterni all'area compresa all'interno del *modello a grande scala* al fine di poter disporre di ricostruzioni consistenti anche in corrispondenza dei limiti superficiali dell'area interessata dal modello di flusso sotterraneo. I pozzi, preesistenti allo studio, localizzati all'interno dell'area oggetto di studio di dettaglio sono risultati 9 (Tabella 7.2.3.1).

Tabella 7.2.3.1: Anagrafica dei pozzi preesistenti localizzati all'interno dell'area alla scala di dettaglio

Codice Pozzo	Proprietario	Tipologia	X-UTM (m)	Y-UTM (m)	Quota (m.s.l.m.)	Quota DEM (m.s.l.m.)	Differenza (m)
64	CMPB		1547383	5036420	109.25	109	0.25
160470001	SICEA S.a.s		1547213	5036359	107.90	109	-1.10
161350001	Amm. Comunale Padania Acque	PUB ^(a)	1548577	5035708	104.10	105	-0.90
190150001	S.p.A.	PUB	1549991	5032352	95.00	94	1.00
190150002		PRI ^(b)	1550630	5032680	93.00	94	-1.00
190150003		PRI	1549642	5031678	92.00	92	0.00
191120001	Padania Acque S.p.A.	PUB	1547428	5034750	103.00	103	0.00
191120002	Padania Acque S.p.A.	PUB	1547377	5034799	104.00	103	1.00
191121123	Padania Acque S.p.A.	PUB	1547463	5034885	103.44	103	0.44

^(a) PUB: pubblico; ^(b) PRI: Privato

L'informazione relativa alla quota del piano campagna in corrispondenza dei singoli pozzi è associabile a misurazioni effettuate con tecniche tra loro eterogenee. Queste comprendono (a) misurazioni GPS, (b) interpolazione a partire della base di Cartografia Tecnica Regionale, (c) battute topografiche. Non sempre è stato possibile risalire alla provenienza di tale dato. Una prima verifica empirica dell'attendibilità delle quote fornite è stata effettuata stimando i valori della quota del piano campagna in corrispondenza dei pozzi di interesse a partire dal Modello Digitale del Terreno DTM40.

L'affidabilità dei dati relativi alla quota del piano campagna costituisce un elemento di notevole importanza per una corretta attribuzione del carico piezometrico a partire da misure di soggiacenza della falda.

A seguito di una consultazione con il Consorzio di Bonifica della Media Pianura Bergamasca riguardo l'attendibilità dei valori di quota forniti, si è scelto di calcolare i

livelli piezometrici all'interno dei pozzi di proprietà del CMPB a partire dalla quota del piano campagna ricavata attraverso il DEM. Per i restanti pozzi, invece, i livelli piezometrici sono stati valutati a partire dai valori di quota associata al piano campagna in corrispondenza dei singoli pozzi riportati all'interno dei diversi archivi disponibili.

I dati di soggiacenza in possesso dell'ARPA, registrati a cadenza mensile o bimestrale, si riferiscono ad un intervallo temporale compreso fra il 1999 e il 2006, mentre l'insieme di dati fornito dal Consorzio di Bonifica della Media Pianura Bergamasca ricopre un periodo di tempo maggiore, compreso fra il 1989 e il 2007. Le campagne di misurazione condotte dal CMPB sono a cadenza mensile o bimestrale. I dati di soggiacenza registrati dal Politecnico di Milano e riportati all'interno del PTUA si riferiscono a tre distinte campagne condotte rispettivamente nell'aprile del 1994, nel novembre del 1996 e nel marzo del 2003.

All'interno dei tre distinti insiemi di dati di riferimento, la descrizione dei pozzi di monitoraggio è completata da informazioni relative a profondità del punto di misura e falda captata. In particolare, la banca dati dell'ARPA Lombardia adotta la classificazione dei corpi acquiferi descritta all'interno dello studio Geologia degli acquiferi padani della Regione Lombardia, mentre il database relativo al PTUA attribuisce il valore di carico ad una falda 'superficiale' o alla 'tradizionale', più profonda. Il CMPB distingue i corpi acquiferi come 'freatici' o 'artesiani'. Si osserva che: (a) solo per una parte dei punti di misura vengono riportate le informazioni relative alla profondità di perforazione e della falda monitorata e (b) esistono distinte tipologie di classificazione e la corrispondenza fra queste non è univoca. Per tali motivi non è stato possibile ricostruire carte piezometriche distinte per profondità e tipologia di acquifero nell'ambito del *modello alla grande scala*. Le elaborazioni piezometriche ricostruite e riportate in *Allegato C* utilizzano valori di carico da considerarsi rappresentativi dell'intero spessore acquifero.

Nell'ambito della fase di elaborazione del modello concettuale sono stati interpolati gli andamenti della superficie piezometrica a diversa scala temporale di aggregazione (annuale e stagionale). I dati utilizzati comprendono valori di carico piezometrico all'interno dei pozzi monitorati e misure di livello effettuate in corrispondenza delle teste fontanilizie.

All'interno dell'insieme di punti di misura esistenti sul territorio sono stati selezionati gli 88 pozzi descritti nella *Tabella A1* dell'*Allegato A*. Per essi è risultata disponibile la serie temporale compresa fra il 2001 e il 2006 a esclusione dell'anno 2002, risultato privo di misurazioni del livello piezometrico all'interno dei pozzi di proprietà del Consorzio di Bonifica della Media Pianura Bergamasca. Generalmente, la frequenza con cui vengono effettuate misure di soggiacenza all'interno dei punti di misura selezionati è mensile o bimestrale.

Si ritiene che i livelli idrometrici della superficie libera all'interno dei fontanili siano da considerarsi valori rappresentativi del livello piezometrico all'interno del corpo acquifero sotterraneo, nell'ipotesi che gli effetti dinamici e le perdite di carico in corrispondenza della testa fontanilizia siano di scarsa entità.

I dati disponibili si riferiscono all'insieme di 75 teste fontanilizie riportate nella *Tabella A2* dell'*Allegato A* e localizzate nell'ambito della Provincia di Cremona. Si sottolinea che non esistono serie temporali relative alla superficie libera nei fontanili. A ciascun fontanile è associato un singolo valore, rappresentativo, pertanto, di un dato istante temporale, registrato nel corso di due successive campagne condotte rispettivamente nel periodo primaverile - estivo del 2002 e nella primavera del 2004.

L'interpolazione dei valori puntuali di carico è stata effettuata tramite kriging. Le elaborazioni realizzate, prendendo in considerazione esclusivamente valori di carico misurati all'interno della falda, sono presentate negli elaborati di seguito elencati e contenuti nell'*Allegato C*.

Tavola 1: Carta piezometrica. Media annua 2001

Tavola 2: Carta piezometrica. Media annua 2003

Tavola 3: Carta piezometrica. Media annua 2004

Tavola 4: Carta piezometrica. Media annua 2005

Tavola 5: Carta piezometrica. Media annua 2006

Tavola 6: Carta piezometrica. Media annua del periodo 2001-2006

Tavola 7: Carta piezometrica. Media invernale del periodo 2001-2006

Tavola 8: Carta piezometrica. Media primaverile del periodo 2001-2006

Tavola 9: Carta piezometrica. Media estiva del periodo 2001-2006

Tavola 10: Carta piezometrica. Media autunnale del periodo 2001-2006

La

Tavola 11: Carta piezometrica. Media annua del periodo 2001-2006

è stata realizzata integrando i valori di carico registrati in corrispondenza dei pozzi con i valori di livello idrometrico misurati all'interno delle teste fontanilizie.

Gli elaborati prodotti evidenziano la direzione Nord-Sud del flusso idrico medio all'interno del sistema acquifero; i gradienti più elevati, intorno al 4-5 per mille, si registrano in corrispondenza della porzione settentrionale del *modello a grande scala*. Nel settore meridionale del dominio i gradienti idraulici tendono a diminuire fino a valori pari a circa 2-3 per mille.

Non si riscontrano, inoltre, variazioni significative tra i diversi anni esaminati. A supporto di tale considerazione è stata condotta un'analisi dell'andamento temporale dei livelli piezometrici registrati all'interno di un insieme di 20 pozzi di proprietà del CMPB; l'intervallo temporale considerato riguarda un periodo di 18 anni, dal 1989 al 2006. In Figura 7.2.3.2a è riportato l'andamento delle medie annue dei livelli piezometrici registrati all'interno di tali pozzi, mentre la Figura 7.2.3.2b è stata costruita valutando, anno per anno e pozzo per pozzo, lo scarto fra il valore medio annuo del livello piezometrico e il valore medio calcolato per l'intero periodo considerato. Si osserva che, nell'ambito dell'intervallo temporale in esame, per le ultime due annate considerate, il 2005 e il 2006, i valori del livello piezometrico risultano inferiori rispetto alla media del periodo per 16 pozzi su 20.

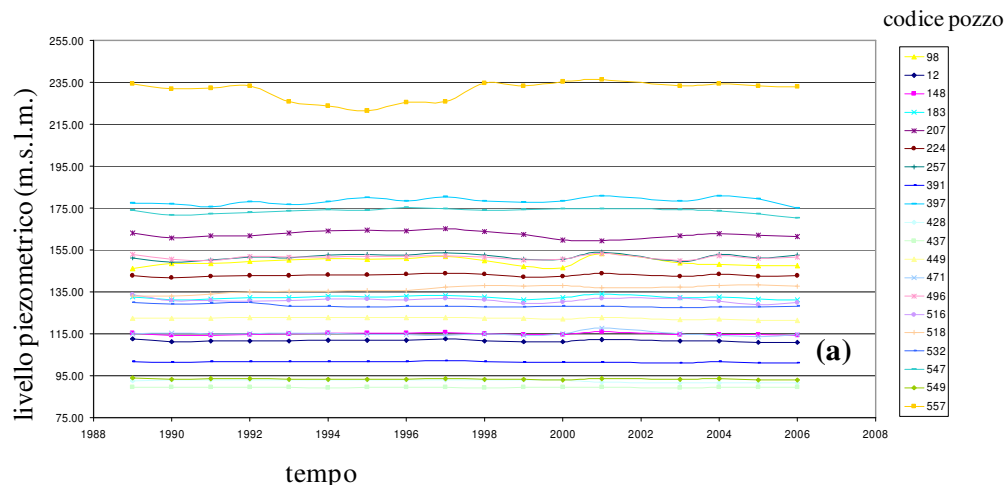


Figura 7.2.3.1a: Evoluzione temporale dei livelli piezometrici all'interno dei pozzi di osservazione di proprietà del CMPB

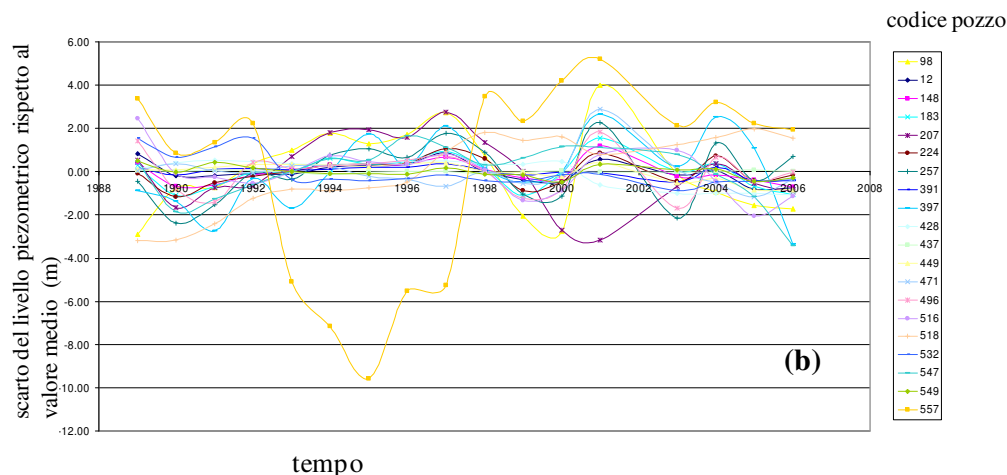


Figura 7.2.3.2b: Evoluzione temporale dello scarto dei livelli piezometrici rispetto al valore medio del periodo del livello piezometrico registrato all'interno dei singoli pozzi di osservazione di proprietà del CMPB

Le *Tavole 6-9 – Allegato C* – mostrano l'evoluzione della piezometria del sistema acquifero nell'arco dell'anno solare; sono state infatti ricostruite raggruppando i valori piezometrici registrati nel periodo di osservazione 2001-2006 su base stagionale e, successivamente, mediando tali valori al fine di ottenere un valore medio del periodo rispettivamente per la stagione invernale, primaverile, estiva e autunnale. Si osserva che nel corso della stagione estiva si registrano i livelli piezometrici più alti, mentre la stagione invernale risulta caratterizzata dai valori inferiori. Le *Figure 7.2.3.3 a-d* riportano, per 4 distinti pozzi di proprietà del CMPB, il confronto fra i livelli piezometrici mediati in funzione di due distinte scale di aggregazione temporale, rispettivamente annuale e stagionale. Si osserva che, in generale, nel corso delle stagioni estiva e autunnale i valori piezometrici sono maggiori rispetto alla media annua, mentre nel corso delle stagioni invernale e primaverile si registrano valori inferiori.

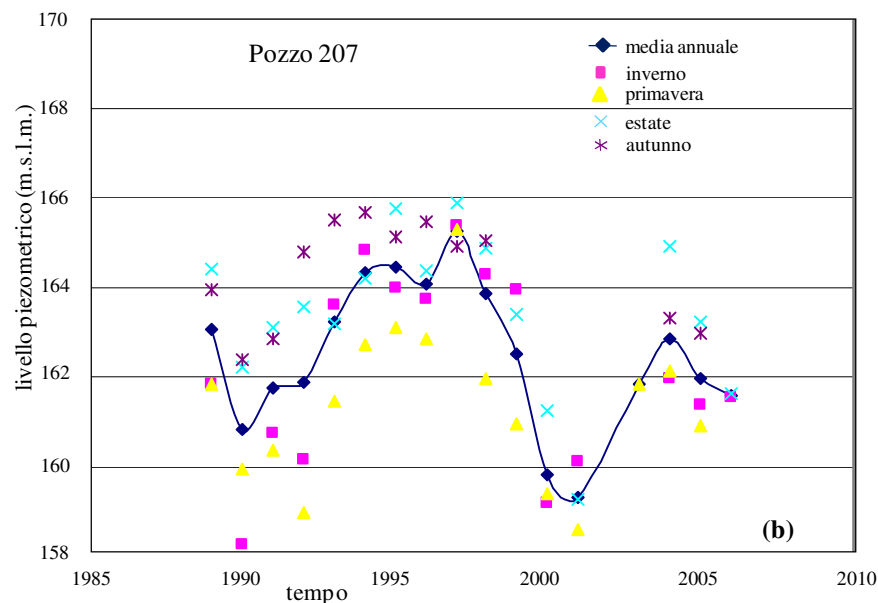
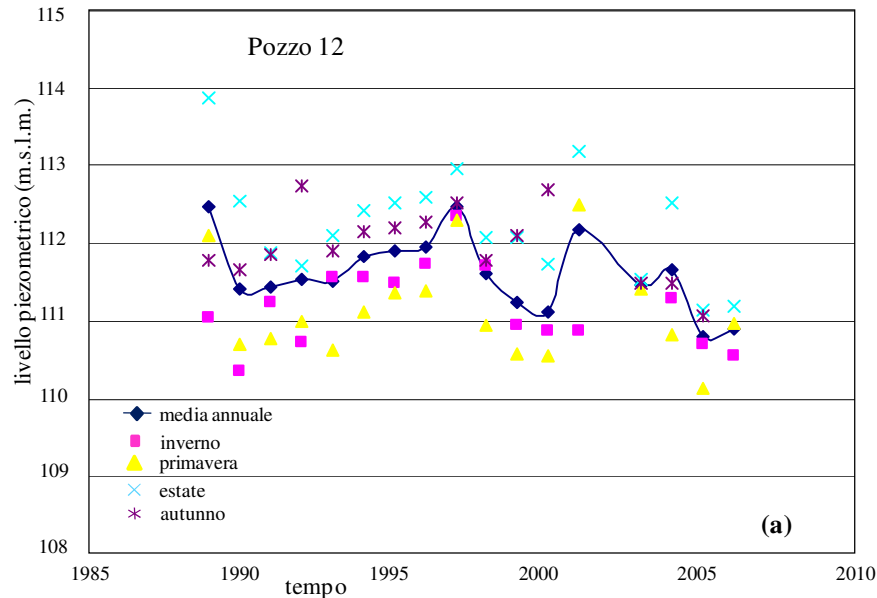
Gli andamenti riscontrati suggeriscono le seguenti considerazioni:

(a) all'interno del dominio di studio i processi idrologici appaiono influenzati in maniera significativa dalla stagionalità. La scala di aggregazione temporale da adottare nell'ambito di una eventuale modellazione matematica in regime transitorio non dovrebbe essere superiore ad un periodo di 90 giorni. La scelta di scale di aggregazione di durata inferiore, per esempio mensile, deve essere valutata in funzione della consistenza e dell'affidabilità dei dati disponibili;

(b) la piezometria della regione è fortemente influenzata da forzanti antropiche: i più elevati livelli piezometrici registrati nella stagione estiva sono, infatti, da ricondursi ad apporti irrigui.

La *Tavola 11 – Allegato C* – mostra l'elaborazione ottenuta integrando i dati relativi ai valori piezometrici medi del periodo 2001-2006 registrati all'interno dei pozzi con i dati relativi ai livelli piezometrici registrati nei fontanili nel corso della campagna di censimento dei fontanili stessi condotta dalla Provincia di Cremona. Viene, in sostanza,

valutata l'opportunità di utilizzare le informazioni di carattere piezometrico registrate in corrispondenza dei fontanili allo scopo di aumentare la densità dei dati disponibili, in particolare nell'intorno e all'interno dell'area destinata all'analisi di dettaglio. Il confronto fra i documenti elaborati escludendo e utilizzando i valori dei livelli della superficie libera misurata all'interno dei fontanili evidenzia una sostanziale congruità dei risultati. Si ritiene, pertanto, che la ricostruzione della piezometria all'interno del dominio possa essere effettuata sfruttando anche le informazioni registrate in corrispondenza dei fontanili.



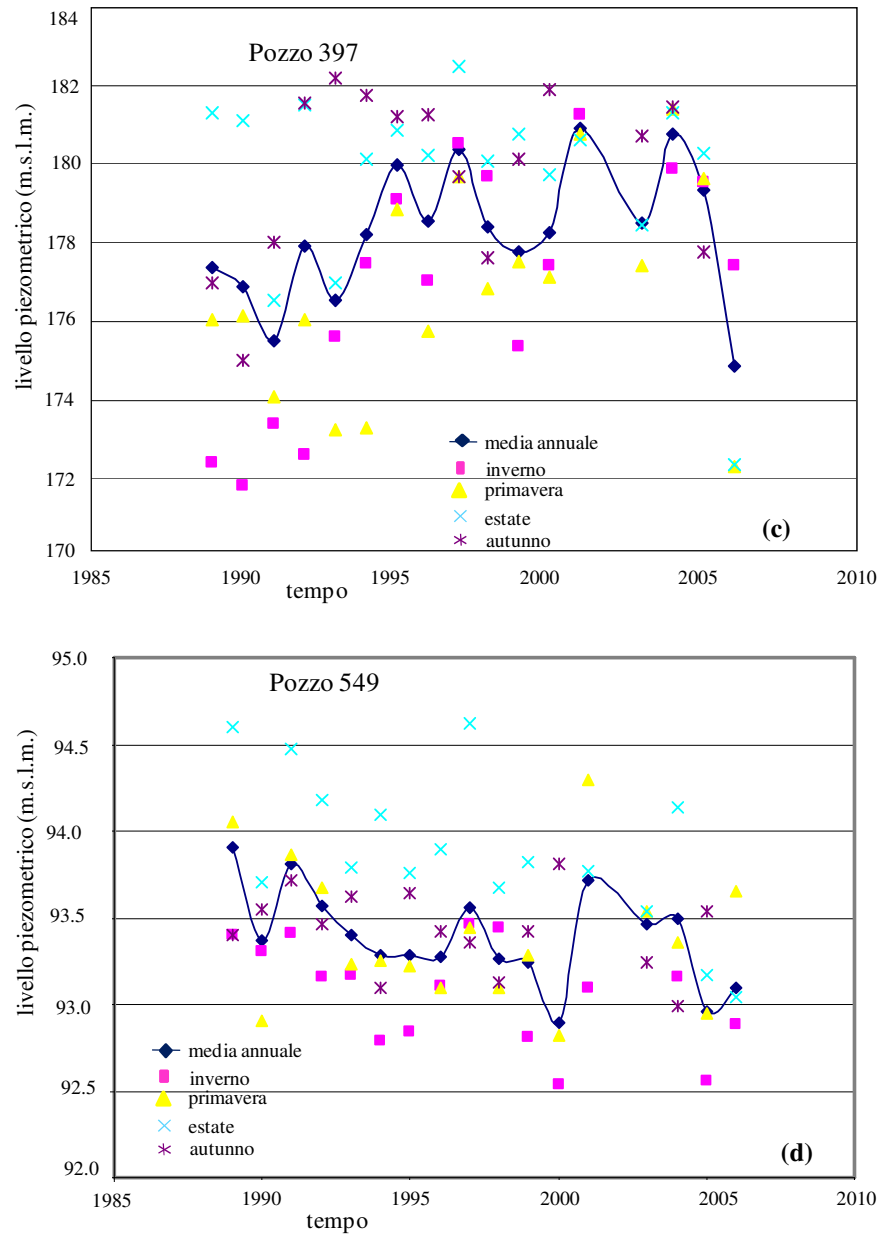


Figure 7.2.3.3 a-d: Evoluzione temporale dei livelli piezometrici all'interno dei pozzi 12, 207, 397 e 549. Confronto fra le scale di aggregazione annuale e stagionale

7.2.4 Fontanili

Il complesso reticolo idrografico presente all'interno dell'area di studio è in buona parte alimentato da un rilevante numero di fontanili, elementi idrogeologici tipici della zona di transizione fra i settori di alta e bassa pianura.

All'interno dell'area interessata dalla realizzazione del *modello a grande scala* si contano un totale di 161 teste fontanilizie (*Figura 7.2.4.1*), 65 delle quali localizzate

all'interno dell'area alla scala di dettaglio. La dislocazione dei fontanili è stata derivata dai seguenti strati informativi:

- Programma di Tutela e Uso delle Acque [Regione Lombardia, 2006]
- www.atlanteambientale.it [Provincia di Cremona]

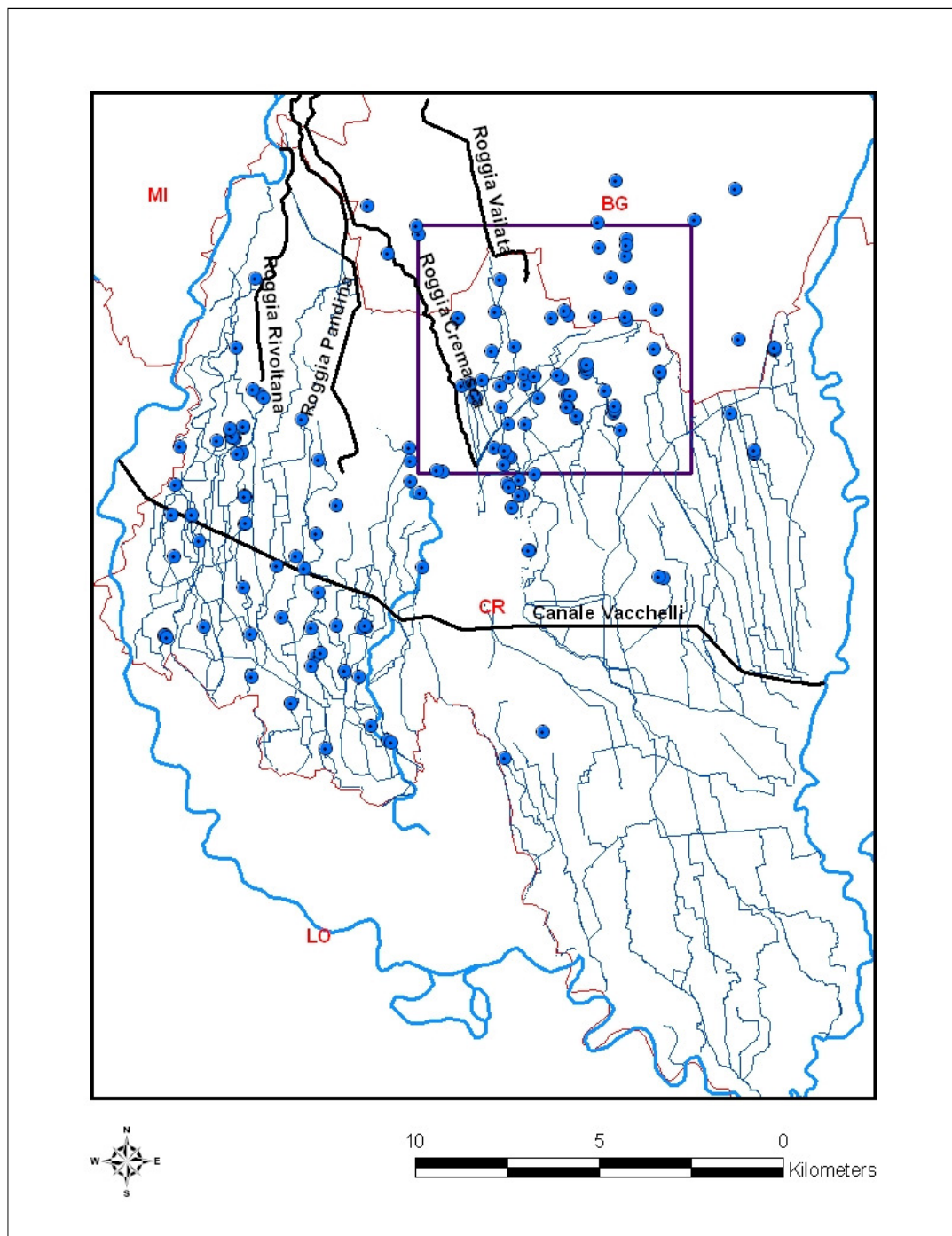


Figura 7.2.4.1: Localizzazione delle teste fontanilizie

7.3 Studio dell' area di dettaglio ed impostazione della rete di monitoraggio piezometrico

7.3.1 L'area di dettaglio

All'interno dell'area scelta per una analisi di dettaglio, di estensione pari a circa 50Km², è stata installata una rete di monitoraggio costituita da una serie di piezometri per il controllo della falda e alcune sezioni di misura di portata in uscita dai fontanili. Tale rete di monitoraggio è stata approntata nel dicembre 2008. La fase di acquisizione dati è attualmente in corso.

L'analisi delle sezioni idrogeologiche suggerisce l'esistenza, in corrispondenza del settore indicato, di uno spessore superficiale, caratterizzato principalmente da litologie ghiaioso-sabbiose, pari a circa 50-60 m la cui continuità appare localmente interrotta da lenti di litotipi limoso-argillosi.

Procedendo in profondità è segnalata la presenza di un orizzonte limoso-argilloso seguito da uno spessore ghiaioso-sabbioso all'interno del quale si intercalano litotipi limoso-argillosi. La continuità spaziale di questi ultimi, sulla base della localizzazione dei dati esistenti, non può essere, allo stato attuale, confermata.

L'andamento del flusso idrico appare congruente alle caratteristiche generali dell'area a grande scala presentando direzione media Nord Est-Sud Ovest con gradienti costanti.

7.3.2 Predisposizione della rete di monitoraggio nell'area di dettaglio

Si è ritenuto necessario di poter disporre, all'interno dell'area destinata allo studio di dettaglio, di misure in grado di consentire il rilievo dell'andamento dei livelli piezometrici (a) all'interno della falda più superficiale, direttamente in comunicazione con le acque di risorgiva, e (b) della falda profonda, ai fini di valutare anche il grado di interconnessione fra le due falde sovrapposte.

La scelta di posizione e profondità dei piezometri si è basata sulle seguenti considerazioni:

- opportunità di posizionamento dei punti di misura esistenti sia in falda superficiale che profonda e, presumibilmente, utilizzabili nell'ambito dello studio;
- necessità di poter disporre di punti di misura collocati nelle vicinanze delle risorgive di interesse;
- necessità di integrare, contestualmente, le informazioni stratigrafiche e, conseguentemente, il modello (concettuale) geologico all'interno dell'area di dettaglio. Tali integrazioni sono essenzialmente finalizzate a delimitare inclusioni a bassa/moderata permeabilità presenti all'interno della parte più superficiale del sistema

acquifero e verificare localmente esistenza e ubicazione in profondità del tetto dello spessore argilloso che si è assunto a costituire la base dell'acquifero più superficiale.

Si è scelto di posizionare 9 freatimetri disposti in modo tale da individuare tre sezioni di misura secondo un allineamento Nord-Sud e tre sezioni secondo un allineamento Ovest-Est. In corrispondenza di due localizzazioni i piezometri superficiali sono stati collocati nelle vicinanze di due pozzi profondi esistenti (Vailate e Pieranica). In questo modo è possibile disporre di due stazioni in cui possono essere rilevati simultaneamente i livelli statici della falda a diverse profondità.

La scelta finale delle localizzazioni della strumentazione è stata dettata dalla necessità di poter disporre di una rete distribuita in maniera sufficientemente omogenea sul territorio ed offrire una copertura di zone prive (o con scarsità) di dati. Parallelamente, si è reso necessario tenere in considerazione l'eventuale presenza di elementi in grado di influenzare l'andamento della soggiacenza della falda (ad esempio l'esistenza di pozzi in emungimento) nonché la disponibilità dei proprietari a concedere l'autorizzazione alla perforazione dei piezometri di nuova installazione.

La *Figura 7.3.2.1* mostra l'insieme dei punti di misura valutati ed evidenzia in rosso quelli utilizzati per la rete di monitoraggio.

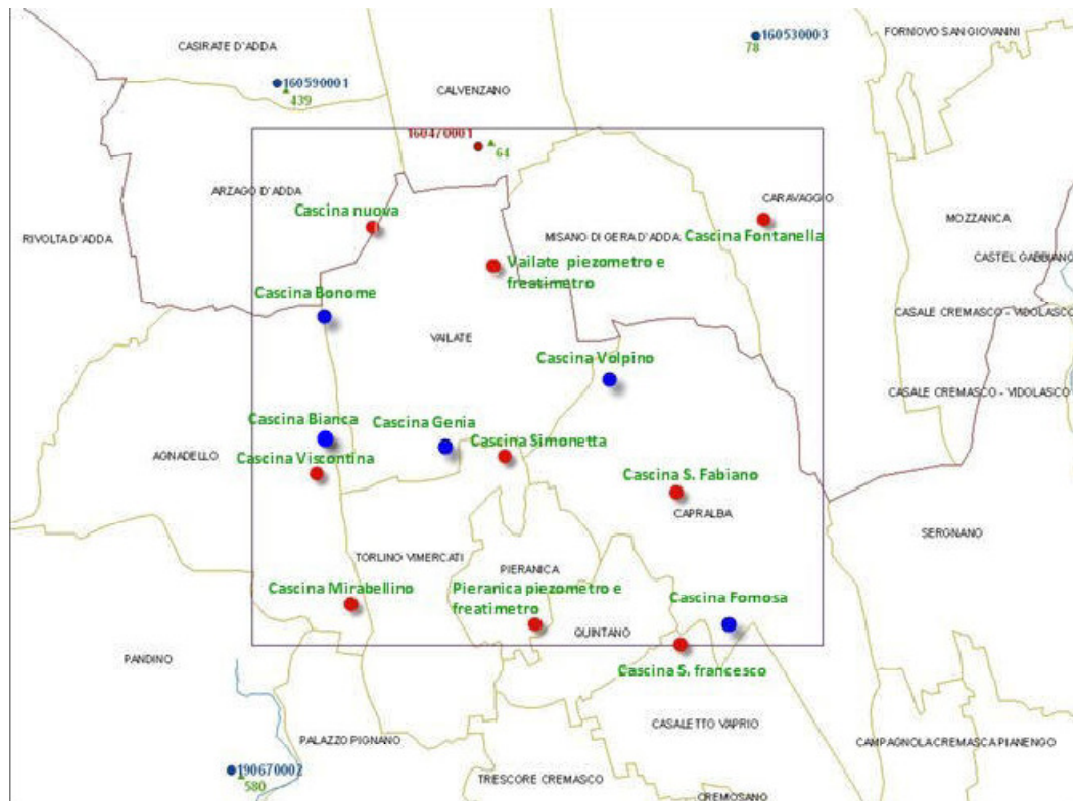


Figura 7.3.2.1: Punti di misura valutati (i punti utilizzati per il monitoraggio sono evidenziati in rosso)

7.3.3 Misure di soggiacenza

La rete di controllo è stata realizzata nel mese di dicembre 2008. Come già citato precedentemente, è composta da una serie di 9 piezometri installati per il monitoraggio in continuo dell'acquifero superficiale.

I piezometri citati sono localizzati in corrispondenza dei toponimi :

- Cascina S. Francesco
- Cascina Fontanella
- Cascina S. Fabiano
- Cascina Simonetta
- Pieranica
- Cascina Mirabellino
- Vailate Cascina Nuova
- Vailate
- Cascina Viscontina

I piezometri di Vailate e Pieranica sono stati ubicati nelle vicinanze di due pozzi preesistenti, accessibili e finestrati in corrispondenza dell'acquifero profondo in modo tale da poter disporre di almeno due coppie di misure relative ad entrambe le falde. I punti di monitoraggio sono stati quotati nel corso di operazioni appositamente condotte.

Il monitoraggio piezometrico viene condotto ricorrendo a sensori di livello piezometrici, ai quali viene abbinata la contemporanea misura della temperatura e della carica dello strumento.

Le misure sono effettuate in continuo, con cadenza temporale programmata ad intervalli diversi a seconda dei punti di misura; i piezometri Cascina S. Francesco, Cascina Fontanella, Cascina S. Fabiano, Cascina Simonetta, Cascina Mirabellino e Cascina Viscontina registrano i dati ad intervalli di 8 ore. I punti di controllo Vailate freatico, Pieranica freatico e Vailate Cascina Nuova comunicano con la centrale di acquisizione dati ogni 2 ore. Per quanto riguarda le strumentazioni relative ai pozzi Pieranica Artesiano e Vailate artesiano, la frequenza di rilevazione è di ½ ora.

L'acquisizione avviene in modalità temporanea locale su memoria non volatile. I dati sono scaricati con periodicità almeno trimestrale a cura del personale del "Consorzio Irrigazioni Cremonesi". L'intervallo temporale preso come riferimento per le elaborazioni successivamente presentate va dal 6 Dicembre 2008 al 27 maggio 2010. Il piezometro "Cascina Mirabellino" riporta un intervallo più breve, dal 27 Marzo 2009 al 27 maggio 2010 in quanto la sua installazione è avvenuta in tempi successivi rispetto agli altri strumenti.

Al momento dell'installazione sono state fornite informazioni di riferimento riguardanti il nome del pozzo, il codice dello strumento, la soggiacenza della falda e le coordinate.

Tabella 7.3.3.1: Informazioni relative ai pozzi della rete di monitoraggio di nuova installazione

Nome Pozzo	Codice Orpheus	Freatimetrica installazione
Vailate freatico	236630	2.73 m
Vailate artesiano	236632	4.48 m
Pieranica artesiano	236633	2.44 m
Pieranica freatico	236624	1.94 m
C.na S. Francesco	236626	1.48 m
C.na S. Fabiano	236627	1.62 m
C.na Simonetta	236628	1.69 m
C.na Viscontina	236625	1.48 m
C.na Nuova	236601	4.78 m
C.na Fontanella	236629	1.42 m
C.na Mirabellino	245295	2.53 m

7.3.4 Misure di portata

Sono state eseguite misure di portata in corrispondenza delle aste fontanilizie denominate Misana, Quarantina, Acquarossa (sezione a “valle” e a “monte”).

Le serie temporali delle portate relative a tali canali sono state acquisite con cadenza all’incirca settimanale. Le operazioni di misura ed organizzazione dei dati sono state coordinate dal Consorzio Irrigazioni Cremonesi e dal Consorzio Adda-Serio. Le *Figure 7.3.4.1-7.3.4.2-7.3.4.3*, mostrano la localizzazione delle sezioni di misura. In *Tabella 7.3.4.1* sono riportati i valori misurati nel periodo 31 marzo 2009-2 settembre 2009.

Tabella 7.3.4.1: Misure di portata (m³/s)

data	Misana	Quarantina	Acquarossa monte	Acquarossa valle
31.03.09	0.534	0.25	0.296	0.343
06.04.09	0.494	0.173	0.345	0.436
17.04.09	0.391	0.192	0.306	0.378
23.04.09	0.518	0.182		
05.05.09	0.515	0.241		
13.05.09	0.514	0.242		0.252
22.05.09	0.457	0.134		0.139
27.05.09	0.556	0.256		0.295
08.06.09	0.557	0.183		0.304
12.06.09	0.476	0.199		
19.06.09	0.445	0.17	0.245	0.452
03.07.09	0.713	0.195		0.671
14.07.09	0.618	0.174	0.137	0.352
29.07.09	0.659	0.14	0.223	0.505
02.09.09	0.627	0.498		0.686

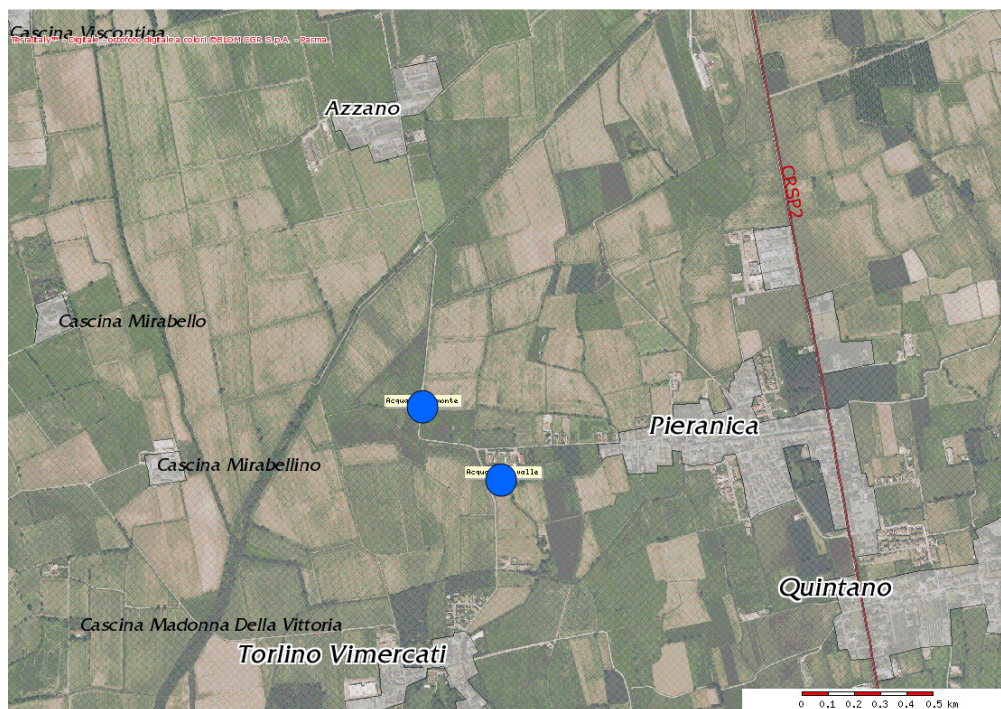


Figura 7.3.4.1: Sezioni di misura delle portate del Canale Acquarossa (monte e valle)

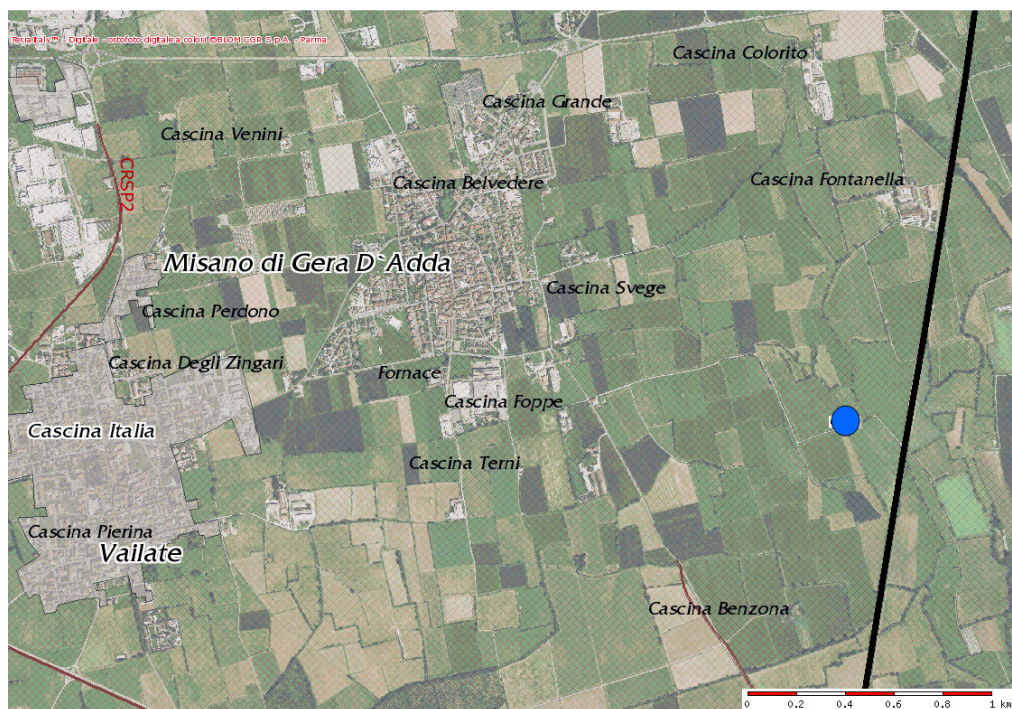


Figura 7.3.4.2: Sezioni di misura delle portate del Canale Misana

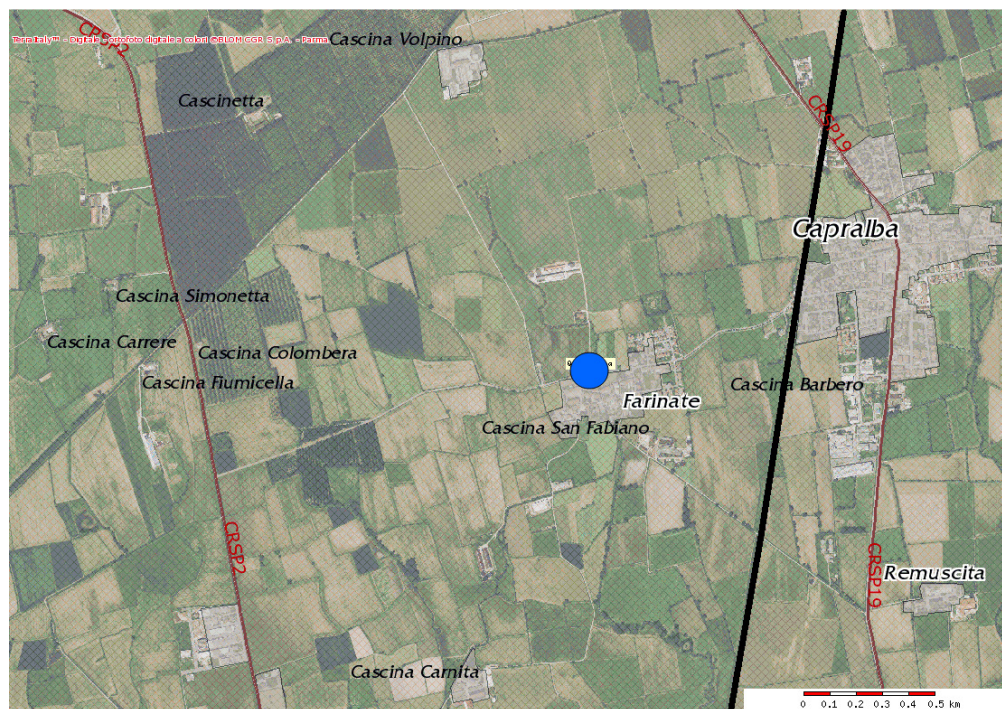


Figura 7.3.4.3: Sezioni di misura delle portate del Canale Quarantina

7.3.5 Elaborazione e analisi dei dati piezometrici

Le *Figure 7.3.5.1a e 7.3.5.1b* presentano l'evoluzione temporale dei valori di soggiacenza e di carico idraulico all'interno dei punti di misura installati nell'acquifero superficiale. Tali andamenti sono stati confrontati con i valori di precipitazione.

L'analisi dei grafici elaborati consente di rilevare i seguenti aspetti:

1. la falda superficiale mostra una evoluzione sostanzialmente confrontabile nei diversi punti presi in esame rispondendo alla sollecitazione indotta dalle precipitazioni in tempi brevi (più elevati nel caso dei piezometri Cascina Nuova e Mirabellino installati a maggior profondità). Le oscillazioni piezometriche riscontrate in corrispondenza del piezometro Cascina Nuova a partire dal mese di maggio 2009 sono determinate dagli effetti di un pozzo irriguo in emungimento localizzato nelle vicinanze.
2. dal punto di vista dei valori di carico, si individuano i seguenti tre raggruppamenti:
 - (a) settore Nord (Cascina Nuova, Vailate freatico, Cascina Fontanella)
 - (b) settore centrale (Cascina Viscontina, Cascina Simonetta, Cascina S. Fabiano)
 - (c) settore Sud (Cascina Mirabellino, Pieranica Freatico, Cascina S. Francesco)

I valori di carico risultano decrescenti procedendo da Nord a Sud, concordemente alla direzione di flusso media (Nord est-Sud ovest) individuata nel corso delle elaborazioni della morfologia della superficie piezometrica estesa all'area del *modello a grande scala*.

3. si osserva una generale tendenza alla risalita della superficie freatica a partire dal mese di maggio. Tale tendenza, da ricondursi ad una alimentazione della falda per apporti da acque di irrigazione, risulta più accentuata in corrispondenza del settore centro-orientale dell'area di interesse (Vailate freatico, Cascina Viscontina, Cascina Mirabellino).

4. il confronto dei valori registrati in corrispondenza delle coppie pozzo profondo (in emungimento)-piezometro superficiale localizzate a Vailate e Pieranica (Figure 7.3.5.1c e 7.3.5.1d) indicherebbe l'esistenza di due falde non connesse. La differenza fra i valori di carico risulta più accentuata in corrispondenza di Vailate.

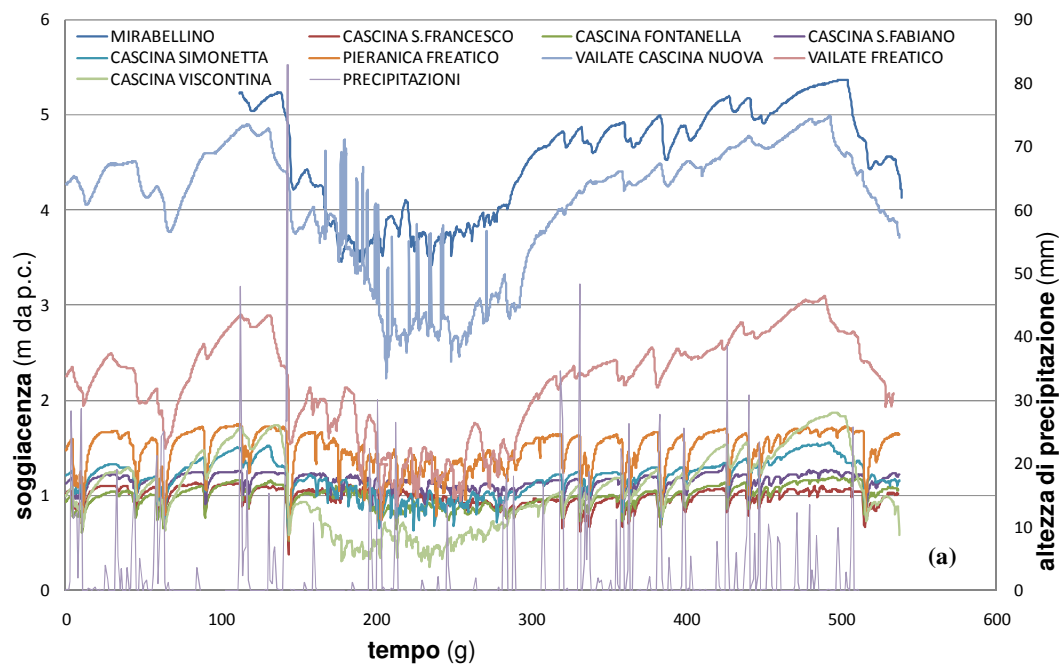


Figura 7.3.5.1a: Evoluzione temporale dei valori di soggiacenza

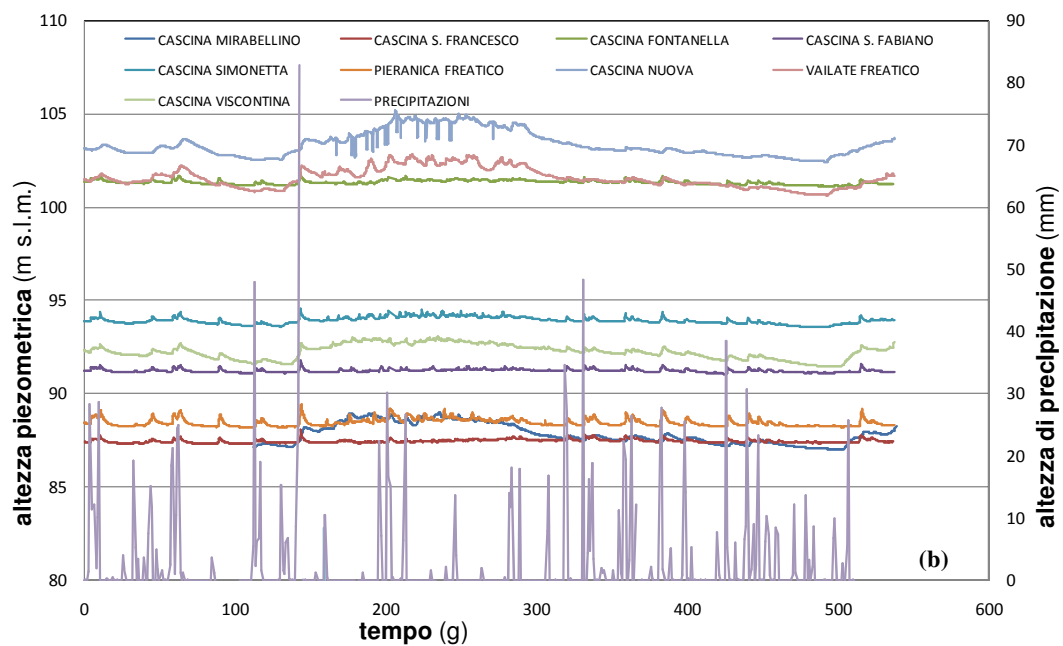


Figura 7.3.5.1b: Evoluzione temporale dei valori di carico idraulico

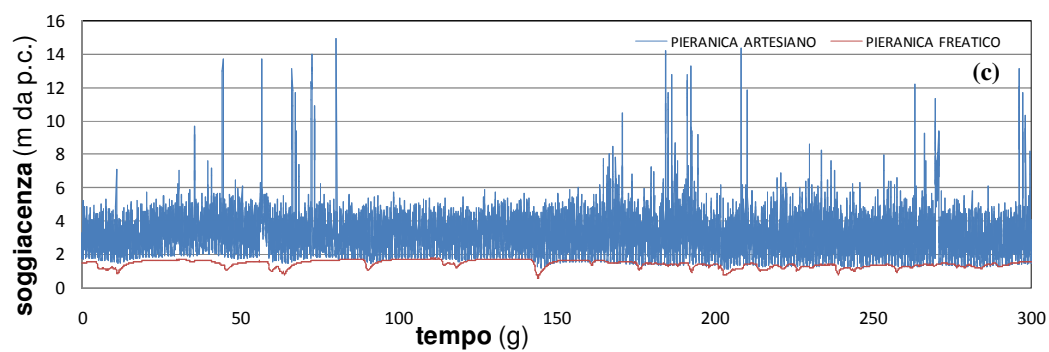


Figura 7.3.5.1c: Evoluzione temporale delle soggiacenze nei punti Pieranica freatico e Pieranica artesiano

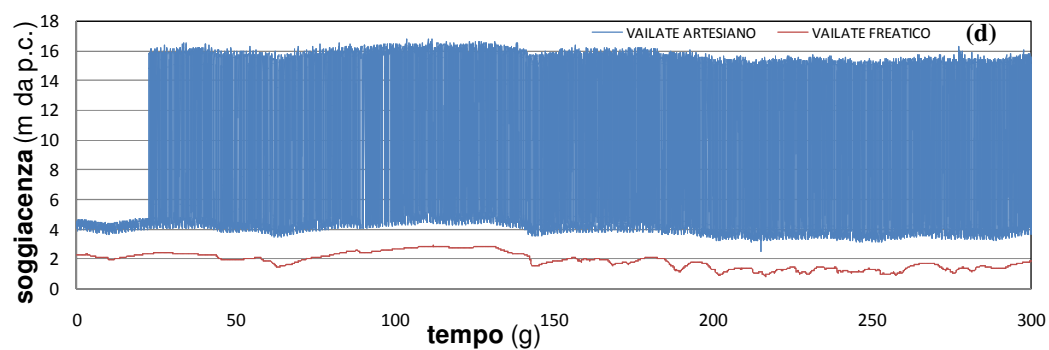


Figura 7.3.5.1d: Evoluzione temporale delle soggiacenze nei punti Vailate freatico e Vailate artesiano