

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale

Corso di Studi in Difesa del suolo e prevenzione dai rischi naturali



**POLITECNICO
MILANO 1863**

**INTERAZIONI TRA FALDE E OPERE IN SOTTERRANEO
IN AREA URBANA: IL CASO DI MILANO**

Relatore: Prof.ssa Paola Gattinoni

Elaborato di laurea specialistica di:

Paolo Sala

Matricola 818319

Anno Accademico 2016/2017

Abstract

A number of specific factors must be considered when dealing with groundwater in urban areas. Urbanization significantly affects the natural water cycle with the main contributors to recharge and discharge differing from those in natural systems, and the same water can affect underground structures and infrastructures typical of cities, like utility conduits, cellars, underground parking and public transport services. This affection can be even increased in cases where the groundwater level is quite high, or in raising phase like in the city of Milan.

The study of groundwater has become a main topic for careful management of water resources and also for its interaction with underground structures, therefore this thesis aims to the study of mutual effects between water and structures in the city of Milan at present days and with future possible scenarios of socio-economical and physical variations, considering the interference of the underground transport network, through the reconstruction of a flow model applied to the city of Milan and its hinterland.

The mathematical model of groundwater flow is still the most suitable tool for the understanding of the hydrogeological system, its variation in time and the influence of the parameters which mostly affect the presence, the motion and the balance of water in soils. As the importance of the description of textural and hydrogeological parameters is predominant, their spatial distribution has to be properly examined: in order to reach this high level of detail, the knowledge of parameters is possible through the collection, study and analysis of available data from local authorities and for the case study thanks to the surveys done during the CARG project, a study in which Politecnico di Milano collaborated in order to define a more updated geological map of the city of Milan.

The refined conceptual model is essential for the definition of the mathematical model, here implemented in the software Groundwater Vistas 6 by Environmental Simulations Incorporated, through the computer code of MODFLOW, specifically created for the description of groundwater flow.

In this paper the description of the implementation of the conceptual and mathematical models will be described; then the potentiometric level will be studied with particular interest in the relationship between groundwater flow, velocity and direction and the presence of underground infrastructures at present days, defining various mutual interaction.

Then possible future scenarios will be supposed, following prediction about socio-economical changes (variation in population and human activities in the studied area) and climatological variations; for every single scenario local effects on metro tunnels will be showed, with the definition of possible new cases of infiltration, flooding or submersion for metro lines.

Mitigation measures for the rising potentiometric trend will be discussed; every human intervention will have as key point a properly improved water system management with special interest in sustainable measures. Positive local effects on metro stations will be showed too.

Introduzione

Desidero ricordare tutti coloro che hanno contribuito alla stesura di questo lavoro.

Ringrazio innanzitutto la Prof.ssa Paola Gattinoni per avere stimolato ulteriormente il mio interesse verso tematiche di carattere idrogeologico grazie ai suoi insegnamenti, per la possibilità datami di approfondire un tema di grande attualità come l'innalzamento del livello di falda nel territorio di Milano e per la massima disponibilità e gentilezza con cui ha seguito ogni fase del lavoro di tesi.

Ringrazio inoltre tutti gli amici per il loro sostegno, in particolare Elisabetta, Luca e Marco, con un ringraziamento sentito ai colleghi di corso, nella speranza di poterci poi ritrovare professionalmente.

Infine un pensiero forte alla mia famiglia, che in questi anni non ha mai fatto mancare il suo supporto.

Sommario

Introduzione	5
Capitolo 1: L'inquadramento generale dell'area di studio: la città di Milano e il suo hinterland	7
1.1 L'inquadramento geografico e morfologico	7
1.2 L'inquadramento geologico	9
1.3 L'inquadramento idrogeologico	15
1.4 L'inquadramento idrografico.....	22
1.5 Gli aspetti climatologici	25
Capitolo 2: La piezometria nella città di Milano.....	28
2.1 L'analisi dei prelievi idrici.....	34
2.2 L'interazione tra piezometria e infrastrutture sotterranee.....	36
2.2.1 La metropolitana di Milano	39
2.3 Le previsioni future sugli aspetti climatologici e i prelievi	42
2.3.1 Gli aspetti climatologici futuri	42
2.3.2 I prelievi idrici futuri	46
Capitolo 3: L'implementazione e la simulazione del modello di flusso.....	50
3.1 Fasi di implementazione del modello.....	50
3.2 L'implementazione del codice di calcolo.....	52
3.3 L'inserimento delle strutture metropolitane	58
3.4 La calibrazione	61
3.5 La simulazione del flusso	64
3.5.1 Analisi dei risultati della simulazione	64
3.6 Il particle-tracking.....	73
3.6.1 Forward tracking.....	74
3.7 Conclusioni per lo scenario attuale	78
Capitolo 4: Gli scenari futuri.....	80
4.1 La nuova linea metropolitana 4.....	80
4.2 La variazione delle precipitazioni	82
4.3 La variazione dei prelievi idrici	86
4.4 Lo scenario completo a medio termine.....	93
4.5 L'influenza delle variazioni future sulle strutture metropolitane	95
Capitolo 5: Misure di mitigazione.....	101
5.1 La gestione integrata delle risorse idriche.....	102
5.2 L'ottimizzazione dei pompaggi dal primo acquifero	105
5.3 Il tunnel scolmatore del fiume Seveso	107

Introduzione

5.4 Lo scenario completo di mitigazione	109
Conclusioni	114
Appendice A: Equazioni governanti del codice di calcolo MODFLOW	116
Appendice B: Equazioni governanti del codice di calcolo MODPATH	120
Appendice C: Scenari futuri per linea 3 gialla.....	126
Bibliografia.....	129
Sitografia.....	131

Introduzione

L'acqua sotterranea in ambienti urbani è diventato un argomento estremamente importante con collegamenti a temi non solo fisici o scientifici, ma anche economici e sociali: l'impatto delle acque sotterranee in ambito cittadino infatti dipende dalla posizione geografica dell'area, dalle caratteristiche geologiche e idrogeologiche del sottosuolo e dalle condizioni socio-economiche che interessano la città. Un uso ingente della risorsa idrica sotterranea può ridurre la pressione alle risorse superficiali, così come una situazione di non sfruttamento può procurare un innalzamento del livello piezometrico, il quale può generare fenomeni di allagamento per strutture sotterranee come quelle dei sistemi di trasporto metropolitani per le grandi città. Casi di negativa interazione tra acque di falda e infrastrutture sotterranee sono riscontrate negli ultimi anni in metropoli quali Tokio, Bangkok, Londra, Barcellona e Milano.

Sono diventati perciò utile strumento di gestione della risorsa idrica studi sul flusso sotterraneo e sui processi di trasporto al suo interno, i quali non differiscono da quelli in ambito rurale dal punto di vista della descrizione fisica e matematica, bensì per differenti scale temporali e spaziali; in particolare i principali temi spazio-temporali influenzanti le acque sotterranee sono:

- il ciclo dell'acqua in dipendenza dalla storia di urbanizzazione
- variazioni dei livelli piezometrici in funzione dell'attività antropica
- inquinamento delle acque sotterranee dovuto ad attività umane, soprattutto industriali
- la presenza di strutture sotterranee, permanenti o temporanee che siano.

In dettaglio Milano deve la sua attuale situazione, se non di emergenza, di alta interferenza con livelli acquiferi in innalzamento costante alla situazione socio-economica che porta ormai da decine di anni alla dismissione delle attività industriali e ad una diminuzione di residenti nei confini della città, con conseguente decrescita dei prelievi.

Si vuole allora indagare con questo progetto di tesi il caso di studio della città di Milano, per caratterizzare l'influenza reciproca tra acque sotterranee e infrastrutture dei trasporti al di sotto del piano campagna, sia per determinare lo stato attuale della presenza idrica nel sottosuolo e il suo livello di carico sugli elementi metropolitani, sia per prevedere quali potranno essere in futuro le nuove condizioni piezometriche dell'area in funzione dei già citati fattori che ne guidano l'andamento temporale.

Volendo studiare in particolare il flusso idrico sotterraneo, si è scelto di arrivare alla sua implementazione tramite il codice di calcolo apposito MODFLOW nella piattaforma software di Groundwater Vistas 6. Il modello matematico qui sviluppato si basa su una dettagliata indagine e analisi dei dati geologici, idrogeologici e di sfruttamento della risorsa idrica disponibili grazie ad enti locali e alle indagini del progetto CARG per la definizione di un'aggiornata carta geologica del territorio milanese (Foglio 118, Milano, di ISPRA, 2016).

La modellazione numerica del flusso è finalizzata a comprendere:

1. il flusso idrico sotterraneo e la piezometria dell'area di studio alle condizioni odierne
2. l'interferenza delle strutture su movimento, direzione e velocità del flusso
3. le situazioni di tunnel di linee metropolitane interessati da allagamenti o sommersione da parte della falda circostante
4. il flusso idrico sotterraneo e la piezometria dell'area di studio secondo futuri scenari previsti di sviluppo metropolitano e di cambiamenti climatici e socio-economici
5. possibili soluzioni di mitigazione degli effetti dell'innalzamento del livello di falda con relative diminuzioni di interferenze con le strutture in sotterraneo.

Capitolo 1: L'inquadratura generale dell'area di studio: la città di Milano e il suo hinterland

La città di Milano si sviluppa nella parte nord-occidentale della Pianura Padana poco prima che i depositi del Quaternario che la contraddistinguono incontrino i depositi post-orogenici della catena alpina nella sua fascia pedemontana e poi l'Unità strutturale delle Alpi Meridionali.

I confini cittadini si estendono per 182 km², ma nello studio in oggetto si terranno in considerazione tutte le infrastrutture sotterranee, metropolitane che si spingono anche oltre il semplice confine per un'area d'interesse che risulterà pressoché doppia rispetto alla città in sé, come da figura 1.

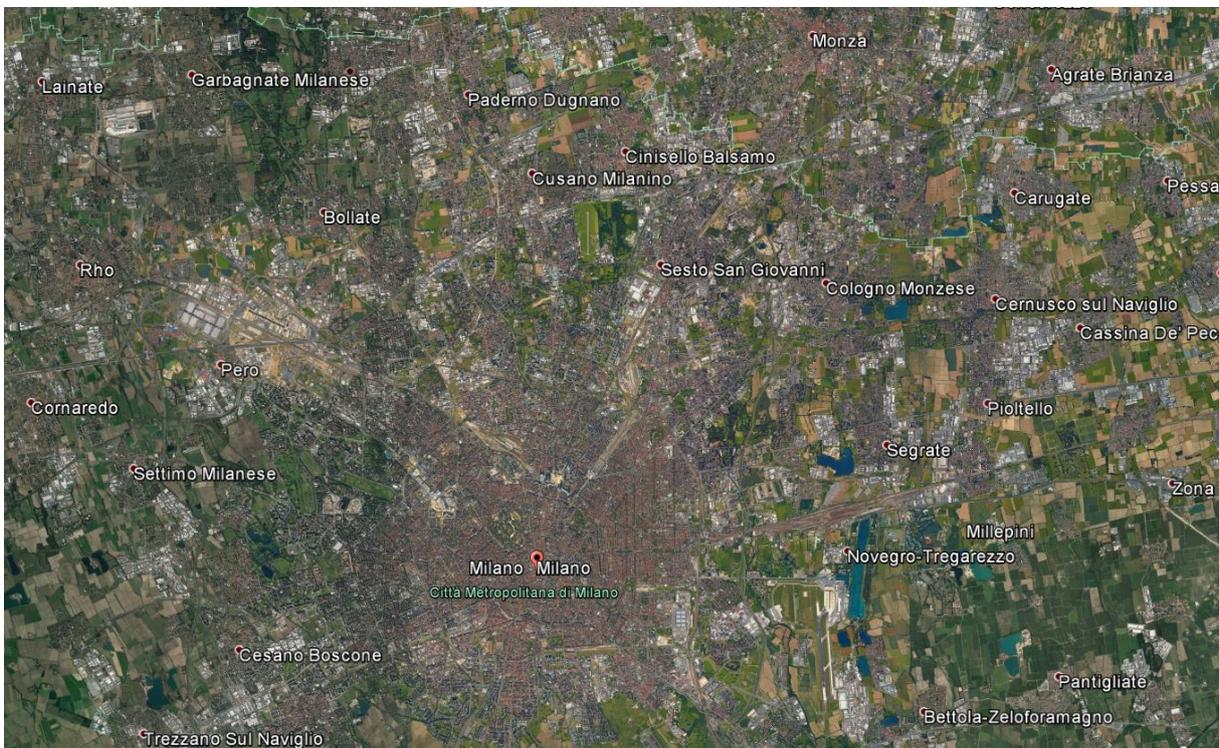


Figura 1 - La città di Milano con il suo hinterland

1.1 L'inquadratura geografica e morfologica

L'area presenta un lento degradare del piano campagna verso SSE nella parte settentrionale e verso SE nel settore meridionale con un gradiente decrescente, da 190 metri a 100 metri s.l.m. (figura 2); si trova perciò una superficie subpianeggiante.

Capitolo 1: L'inquadramento generale dell'area di studio: la città di Milano e il suo hinterland

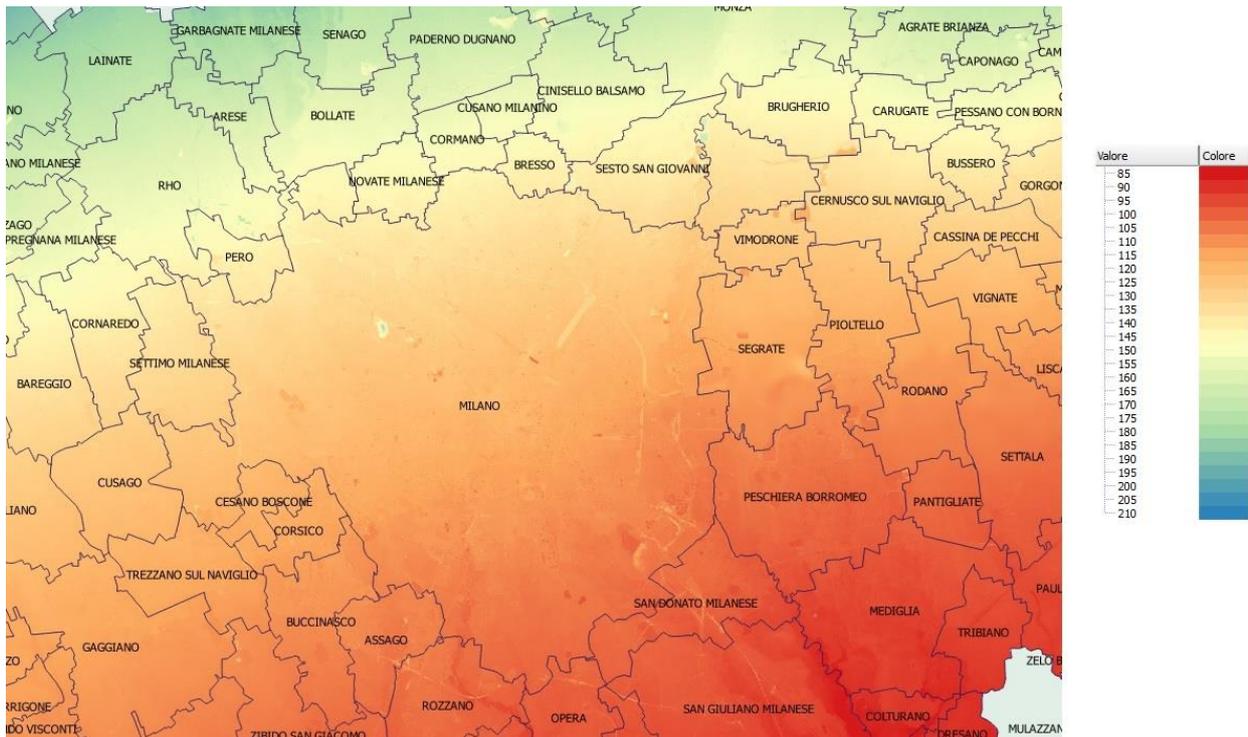


Figura 2 - Altimetria dell'area di studio

Al fine di studiare dettagliatamente l'area d'interesse, con riferimento a misurazioni svolte in ambito del Progetto CARG, si dispone di punti all'interno dell'area studiata di cui si conosce la quota sul livello del mare del piano campagna. Questi dati puntuali vengono processati all'interno del software Surfer, programma per il mappaggio 2D e 3D: a partire dalle limitate misurazioni disponibili, si ottiene una griglia continua di punti tramite procedimento detto di "kriging": esso è un metodo di regressione che permette di interpolare la grandezza nello spazio, minimizzando l'errore quadratico medio; viene individuato il più probabile valore di quota del piano campagna per quei punti senza valori noti; la grandezza inizialmente ignota è trattata come una variabile locale, cioè mediando una variabile casuale e una deterministica e viene calcolata come media pesata dei valori noti, con i pesi definiti sulle misure note, dipendenti dalla relazione spaziale tra i valori prossimi al punto incognito (se ad esempio un punto ignoto ha a poca distanza da sé un punto A e a distanza maggiore una misurazione B, al primo valore A viene dato un peso maggiore e quindi il punto ignoto risulterà avere un valore più prossimo ad esso piuttosto che a B). Infine si crea la mappa delle curve di livello a partire dalla griglia continua di punti (figura 3).

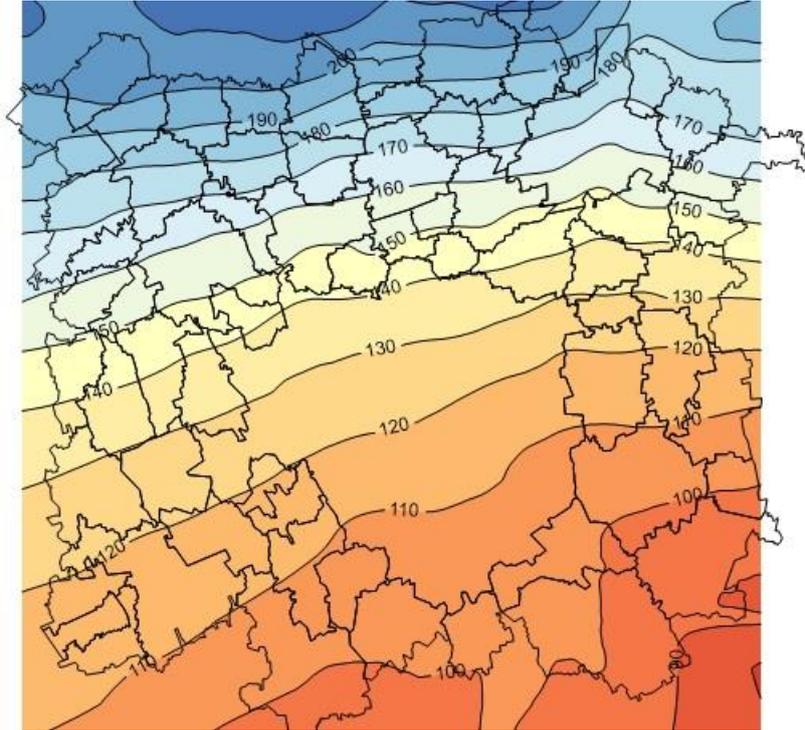


Figura 3 - Andamento del piano campagna nell'area di studio con relative curve di livello

1.2 L'inquadramento geologico

La città di Milano giace nella piana milanese, facente parte dell'area più settentrionale della Pianura Padana. Essa rappresenta l'affioramento morfologico del Bacino Padano, bacino sedimentario compreso tra le strutture alpine e quelle appenniniche; la successione sedimentaria risalente al Pliocene-Pleistocene ha carattere regressivo: alla base si trovano depositi di mare profondo, ricoperti dai risultati della sedimentazione sviluppatasi sia assialmente (lungo il corso del paleo Po), sia trasversalmente, per via dei depositi dei sistemi montani.

Il bacino marino che occupava fino al Miocene la Pianura Padana ha subito perciò un riempimento dovuto alla sedimentazione continentale del Quaternario, che ricoprendo gli strati marini ha originato l'odierna situazione geologica della Pianura.

L'inquadramento geologico regionale viene mostrato in figura 4.

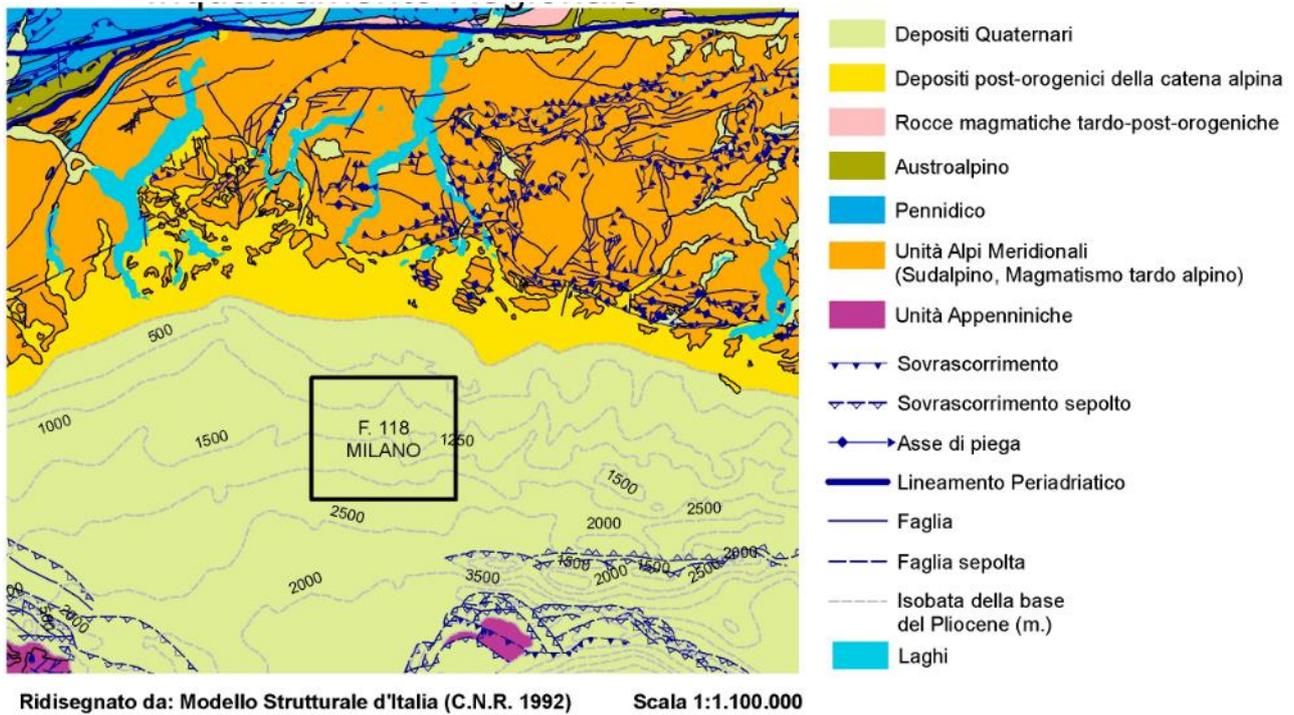


Figura 4 - Inquadramento geologico regionale (da Progetto CARG di Regione Lombardia)

Le caratteristiche geologiche e stratigrafiche derivanti da questa evoluzione sono ampiamente descritte in letteratura (Braga & Ragni, 1969; Comizzoli *et alii*, 1969; Orombelli, 1979; Francani & Pozzi, 1981); riguardo questo argomento più recentemente lo studio di Regione Lombardia & Eni (2002) e i sondaggi realizzati per il progetto CARG per la realizzazione di una moderna Carta Geologica hanno permesso un'ulteriore analisi stratigrafica dettagliata del sottosuolo in area milanese. Grazie ai dati della Banca Dati Geologica del Sottosuolo e alla creazione di una griglia di sezioni geologiche, si sono localizzate e datate le superfici di discontinuità stratigrafica e di conseguenza estensione e datazione di ogni strato. Nell'area milanese si è usufruito di 13 sezioni, 6 in direzione Est-Ovest e 7 in direzione Nord-Sud, le cui locazioni territoriali sono mostrate in figura 5.

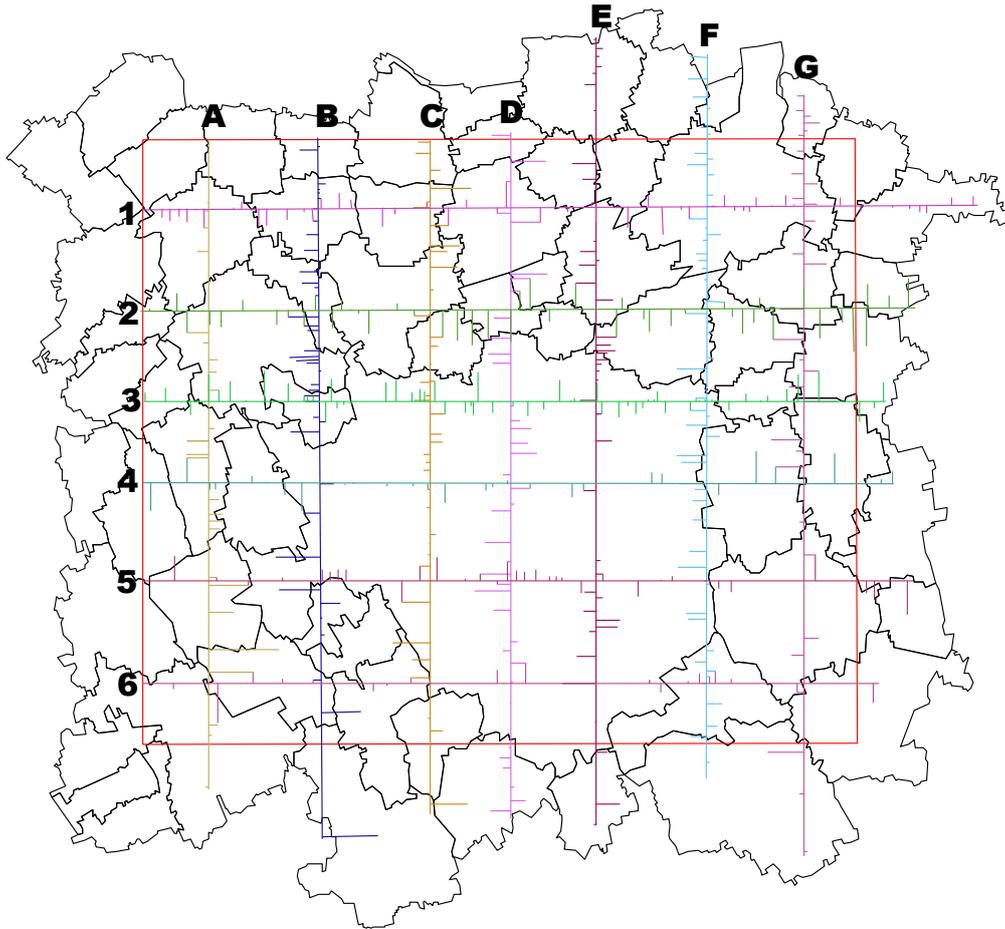


Figura 5 - Schema delle sezioni geologiche del progetto CARG (da Progetto CARG di Regione Lombardia)

Le sezioni E-O sono le seguenti:

- sezione 1: Lainate - Agrate Brianza: spesso strato di ghiaie sabbiose che si assottiglia verso E con intercalazioni di sabbie e limi a O
- sezione 2: Pogliano Milanese - Carugate: spesso strato di ghiaie sabbiose con intercalazione di sabbie al centro e sporadiche presenze di limi e argille
- sezione 3: Pregnana Milanese - Cernusco sul Naviglio: spesso strato di ghiaie sabbiose con forte intercalazione di limi a O (tra Pero e Milano) e costante presenza di sabbie e limi a E
- sezione 4: Bareggio - Rodano: spesso strato di ghiaie sabbiose con costanti intercalazioni di limi e sabbie
- sezione 5: Cusago - Pantigliate: spesso strato di ghiaie sabbiose con forte presenza di sabbie nella parte centrale (Milano) e costanti intercalazioni di limi
- sezione 6: Gaggiano - Mediglia: spesso strato di ghiaie sabbiose che si assottiglia verso E con intercalazioni di limi a O e strato di sabbia ben sviluppato nel centro e a E, al di sotto delle ghiaie.

In generale si nota un assottigliamento dello strato superiore di ghiaie verso Est al di fuori del confine della città, un aumento di presenza di sabbie andando verso Sud e un sempre presente strato di limi e argille al di sotto dello strato ghiaioso.

In direzione N-S si hanno invece le seguenti sezioni:

- sezione A: Lainate - Gaggiano: spesso strato di ghiaie sabbiose con costanti intercalazioni di sabbie e limi
- sezione B: Cesate - Zibido San Giacomo: spesso strato di ghiaie sabbiose con conglomerato a N, diffusa intercalazione di sabbie a S e sporadica presenza di limi
- sezione C: Limbiate - Zibido San Giacomo: spesso strato di ghiaie sabbiose con costante presenza di limi e sabbie
- sezione D: Varedo - Rozzano: spesso strato di ghiaie sabbiose che si assottiglia a S, con strato di sabbie al di sotto delle ghiaie (Milano) e varie intercalazioni di limi
- sezione E: Desio - Opera: strato di ghiaie a N e di sabbie in centro (Milano) e a S con intercalazioni di limi e argille
- sezione F: Veduggio - San Giuliano Milanese: spesso strato di ghiaie sabbiose che si assottiglia verso S, con sottostante strato di sabbie nell'area centrale (Milano) e a S con tipiche intercalazioni di limi e argille
- sezione G: Villasanta - San Giuliano Milanese: spesso strato di ghiaie sabbiose al centro, più sottile alle estremità, con strati di limi a N e a S e sporadica presenza di sabbie.

Il trend generale presenta una comparsa di presenza di sabbia a Sud (che diventa vero e proprio strato procedendo verso Est interessando il territorio di Milano) per poi diradarsi e scomparire al di fuori dei confini comunali e il già riscontrato strato di limi e argille sottostante al primo strato, sia che si tratti di ghiaie che di sabbie.

In ognuna delle sezioni ricavate, grazie alla conoscenza generale geologica ed idrogeologica della piana milanese, si è mostrato non solo la semplice stratigrafia, ma anche le unità litostratigrafiche di riferimento e l'andamento piezometrico.

Come risultato dell'analisi nell'area milanese si identificano unità di sottosuolo che confermano che la successione stratigrafica ha carattere regressivo, passando da depositi marini a depositi transizionali e poi continentali tipici del Calabriano e registra il riempimento del mare pre-Quaternario.

Le unità geologiche (con denominazione secondo ISPRA, 2015) sono così distribuite dalla affiorante alla più profonda (Regione Lombardia & Eni, 2002; Muttoni *et alii*, 2003; Scardia *et alii*, 2012; ISPRA, 2015) (tabella 1):

Denominazione ISPRA	Età	Spessore [m]
PLCc o LS - supersistema Lombardo Superiore	Pleistocene medio - Olocene	60
PLCa o LI - supersistema Lombardo Inferiore	Calabriano - Pleistocene medio	80
PLMc o PD - supersistema Padano	Calabriano	400 circa
PLMa	Gelasiano - Calabriano tardo	700 circa
PL	Pliocene Inferiore/medio	500 circa
MESb	Messiniano	50
MESa	Oligocene - Miocene	---

Tabella 1 - Unità geologiche del sottosuolo milanese

Di particolare interesse sono i tre supersintemi più superficiali, che vengono descritti più approfonditamente dal più antico al più recente:

- **Supersistema Padano PD** (unità litostratigrafica tradizionale del Villafranchiano);
è formato da una porzione basale attribuibile al Pleistocene inferiore e al Calabriano e da deposizioni transizionali e anche continentali di origine lacustre; questo strato si ispessisce verso S: a Milano ha uno spessore di varie centinaia di metri; il tetto è costituito dalla superficie di inconformità QC1 secondo ISPRA, 2015, mentre la base è la superficie di inconformità QM1 secondo ISPRA, 2015; la porzione sommitale del supersistema, raggiunta dai sondaggi del CARG, è costituita da sabbie da molto fini a medie e argille con locali presenze di corpi grossolani che corrispondono ai corpi conglomeratici del Ceppo; questo supersistema ha avuto come ambiente di sedimentazione una piana alluvionale; nella parte inferiore del supersistema invece non sono arrivati i sondaggi del CARG ma grazie ai profili dei pozzi forniti da Eni -Agip si sa che depositi sabbiosi con intercalazioni argillose si incontrano in questo ambiente di origine marina; il passaggio tra le due porzioni, ossia dall'ambiente marino a quello transizionale fino a quello continentale, avviene proprio lungo un'altra superficie di inconformità, la QM2 di ISPRA,2015

- **Supersistema Lombardo Inferiore LI**
ha come tetto la superficie di inconformità QC3 secondo ISPRA, 2015 e le fa da base la superficie di inconformità QC1 secondo ISPRA, 2015; il significativo cambio di sedimenti rispetto al sottostante supersistema Padano è attribuito all'instaurarsi di maggiori glaciazioni nell'epoca pleistocenica; è composto da corpi spessi di sabbie medie e grossolane con ghiaie e poca presenza di ciottoli; anche questi depositi sono ascrivibili ad un ambiente di piana alluvionale e comprende:
 - conglomerati e arenarie passanti a ghiaie e sabbie, ben visibili nella parte nord della Pianura mentre si assottigliano velocemente per poi non essere presenti nella piana del Po (unità litostratigrafica tradizionale del Ceppo)
 - i ripiani più elevati dell'alta pianura; si raccordano con il livello fondamentale da monte tramite dei terrazzi o gradatamente lungo piani inclinati per immergersi sotto il livello fondamentale (quando non sono stati erosi), cambiando gradualmente la granulometria sempre più fine (tradizionalmente indicato come depositi fluvioglaciali Riss-Mindel)

- **Supersistema Lombardo Superiore LS** (indicato tradizionalmente come depositi fluvioglaciali Würm)
costituisce il "Livello fondamentale della Pianura Padana" e la base è costituita dalla superficie di inconformità QC3 secondo ISPRA, 2015; si presenta come ghiaie grossolane

Capitolo 1: L'inquadramento generale dell'area di studio: la città di Milano e il suo hinterland

con ciottoli, con contenuti livelli di sabbie da medie a ghiaiose; l'ambiente di sedimentazione è una piana alluvionale fluvio-glaciale; le varie unità geologiche di superficie sono comprese al suo interno.

Si specifica che si possono trovare superficialmente alluvioni più recenti, soprattutto negli alvei dei corsi d'acqua principali, con ghiaie che degenerano a materiali di granulometria più fine verso Sud.

Una sezione trasversale della formazione geologica della Pianura Padana è qui presentata con indicazione della posizione dell'area milanese (figura 6).

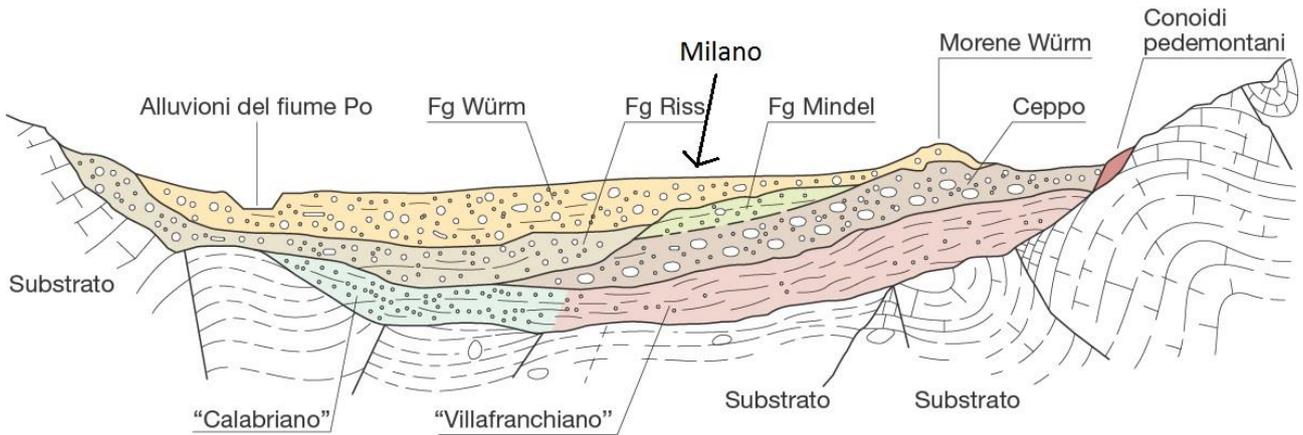


Figura 6 - Sezione trasversale della struttura geologica della Pianura Padana (da "Risorse idriche sotterranee" di Gattinoni P.)

La carta geologica inerente all'area di studio (Foglio 118) definita da ISPRA attraverso il Progetto CARG è mostrata in figura 7; dal più recente al più antico si osservano i seguenti sistemi e unità:

- sistema del Po POI
- supersistema dei laghi LCN
- subsistema di Ronchetto delle rane LCN₄
- unità di Bulgarograsso BXE
- unità di Minoprio BMI
- unità di Guanzate BEZ (le tre unità facenti parte del supersistema di Besnate).

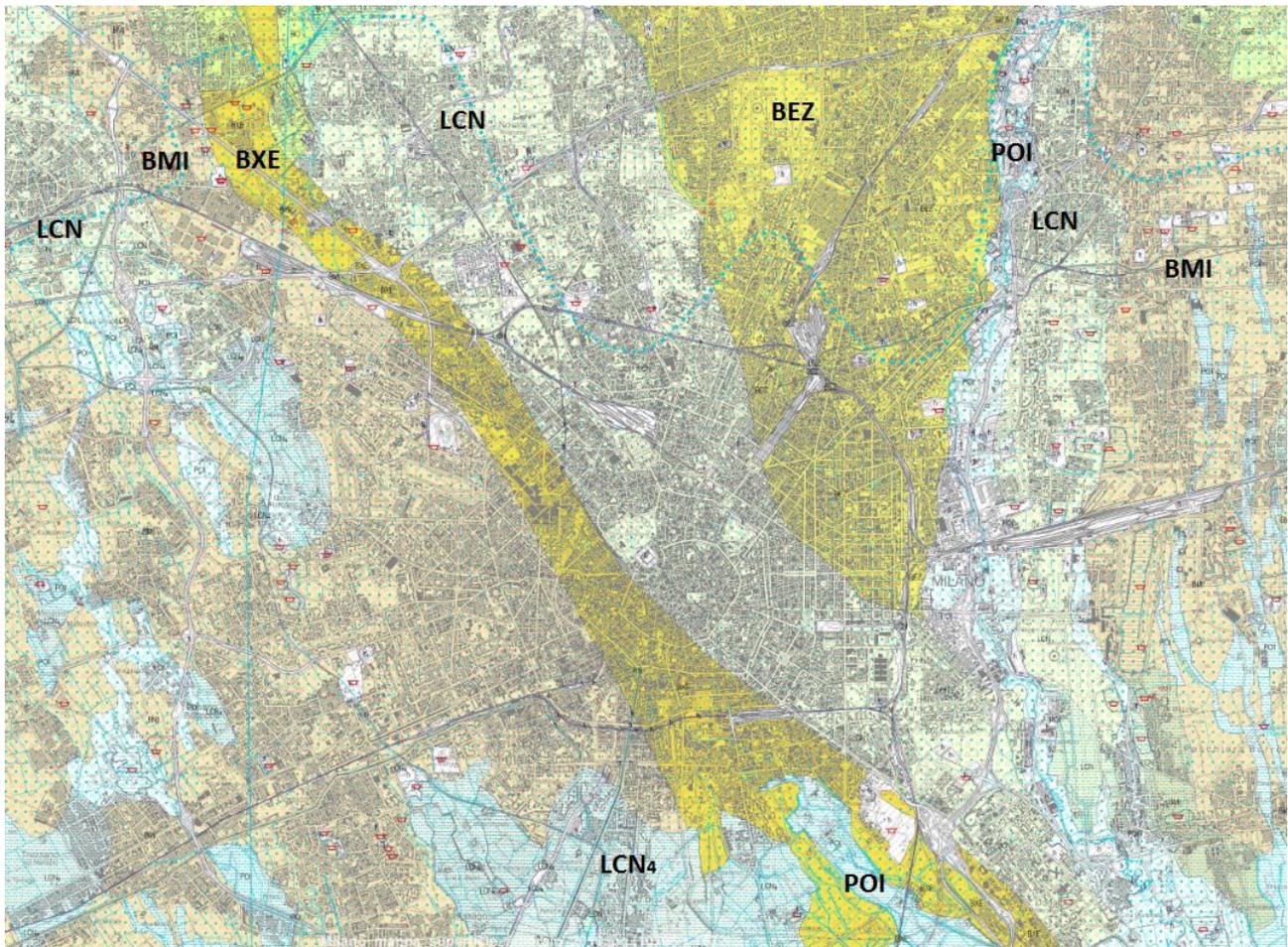


Figura 7 - Carta geologica dell'area di studio con indicazione dei vari sistemi e unità geologiche (da Progetto CARG di Regione Lombardia)

1.3 L'inquadramento idrogeologico

Nel sottosuolo della Pianura Padana vengono riconosciute secondo gli studi recenti di Regione Lombardia & Eni (2002) tre litozone con granulometria via via decrescente:

- Litozona ghiaioso-sabbiosa
prevalgono litotipi grossolani con lenti argillose di limitata estensione; lo spessore varia dal centinaio di metri nel settore settentrionale alle poche decine di metri in quello meridionale
- Litozona sabbioso-argillosa
presenta argille e limi intervallati da sabbie; si verifica un ispessimento in direzione occidentale (ad ogni modo con una buona variabilità di valori di spessore)
- Litozona argillosa
comprende argille e limi con modestissime presenze di sabbie; nella media pianura giace ad una profondità di oltre 200 metri, mentre nell'alta pianura affiora a 130 metri dal piano campagna.

La prima litozona rappresenta un ambiente di trasporto e di sedimentazione continentale ad energie elevate, la litozona intermedia un ambiente di transizione e l'ultima un ambiente marino di sedimentazione.

Strettamente connessi con la litologia sono i sistemi acquiferi presenti nella Pianura Padana:

- **Acquifero tradizionale**
si distingue tra acquifero freatico superficiale, il quale raggiunge una profondità massima di 45 metri dal piano campagna, e un acquifero semiconfinato separato dal primo da un aquitard semipermeabile: ben visibile nella pianura meridionale, l'aquitard tende ad assottigliarsi verso N e verso E e a scomparire rendendo impossibile la distinzione tra i due corpi acquiferi; nella fascia settentrionale è alimentato dalle precipitazioni e dalle irrigazioni, mentre nella parte meridionale è la ricarica da monte ad alimentarlo; la base dell'acquifero tradizionale coincide con il sopraggiungere della litozona intermedia, quella sabbioso-argillosa
- **Acquifero profondo**
sono i livelli permeabili presenti nella litozona sabbioso-argillosa; ospita falde in pressione ed è ben separato dagli acquiferi sovrastanti; è alimentato dalla ricarica da monte e dall'acqua che fluisce da locali interruzioni degli strati impermeabili che lo delimitano.
- **Acquifero marino**
sono gli acquiferi più profondi nelle argille marine.

Franconi & Pozzi (1981) hanno proposto una suddivisione in unità idrogeologiche per la quale nell'acquifero tradizionale si sviluppano il I Acquifero e il II Acquifero, mentre l'intero acquifero profondo è occupato dal III Acquifero.

Le indagini della Regione Lombardia & Eni (2002) hanno dato una nuova interpretazione degli acquiferi dal punto di vista delle unità idrostratigrafiche:

- **Gruppo Acquifero A**
porzione superficiale dell'acquifero tradizionale, generalmente libero e attualmente sfruttato in modo intensivo; le litologie più grossolane prevalgono con ghiaie a matrice sabbiosa con intervalli sabbiosi limitati;
- **Gruppo Acquifero B**
porzione più profonda dell'acquifero tradizionale, semiconfinato; dominano la litologia ghiaie a matrice sabbiosa e sabbie grossolane, con contenute intercalazioni di argilla limosa;
- **Gruppo Acquifero C**
porzione superiore dell'acquifero profondo; è costituito da limi argillosi e sabbiosi

- Gruppo Acquifero D
porzione più profonda dell'acquifero profondo

Si indicano immersione e quota base dei livelli acquiferi principali in tabella 2:

Acquifero	Immersione	Quota base s.l.m. [m]
Gruppo A	S-SE	50 - 150
Gruppo B	S-SE	-50 - +130
Gruppo C	S-SE	-200 - +100

Tabella 2 - Caratteristiche degli acquiferi principali

Nel territorio di Milano si osserva un'ottima corrispondenza tra la suddivisione litografica, la classificazione idrostratigrafica della Pianura Padana e i supersintemi riconosciuti.

La litozona ghiaioso-sabbiosa nei quali sono compresi i gruppi acquiferi A e B presenta le granulometrie tipiche del supersintema Lombardo (avente come base l'acquifero B), così come la sottostante litozona sabbioso-argillosa con gli acquiferi C e D è prevalentemente costituita da materiali più fini con rare presenze di granulometrie grossolane, in parallelo con quanto accade nel supersintema Padano (con base l'acquifero D), come mostrato in tabella 3.

Unità litostratigrafiche	Unità idrostratigrafiche	Unità geologiche
Martinis & Mazzarella, 1971	Eni, 2002	Muttoni, 2003 & ISPRA, 2015
Litozona ghiaioso-sabbiosa	Gruppo A	supersintema Lombardo Superiore
	Gruppo B	supersintema Lombardo Inferiore
Litozona sabbioso-argillosa	Gruppo C	porzione superiore supersintema Padano
	Gruppo D	porzione inferiore supersintema Padano

Tabella 3 - Unità litostratigrafiche, idrostratigrafiche e geologiche del sottosuolo milanese

Si riporta inoltre una schematica suddivisione degli acquiferi con relativa tipologia di falda e relazioni reciproche (figura 8).

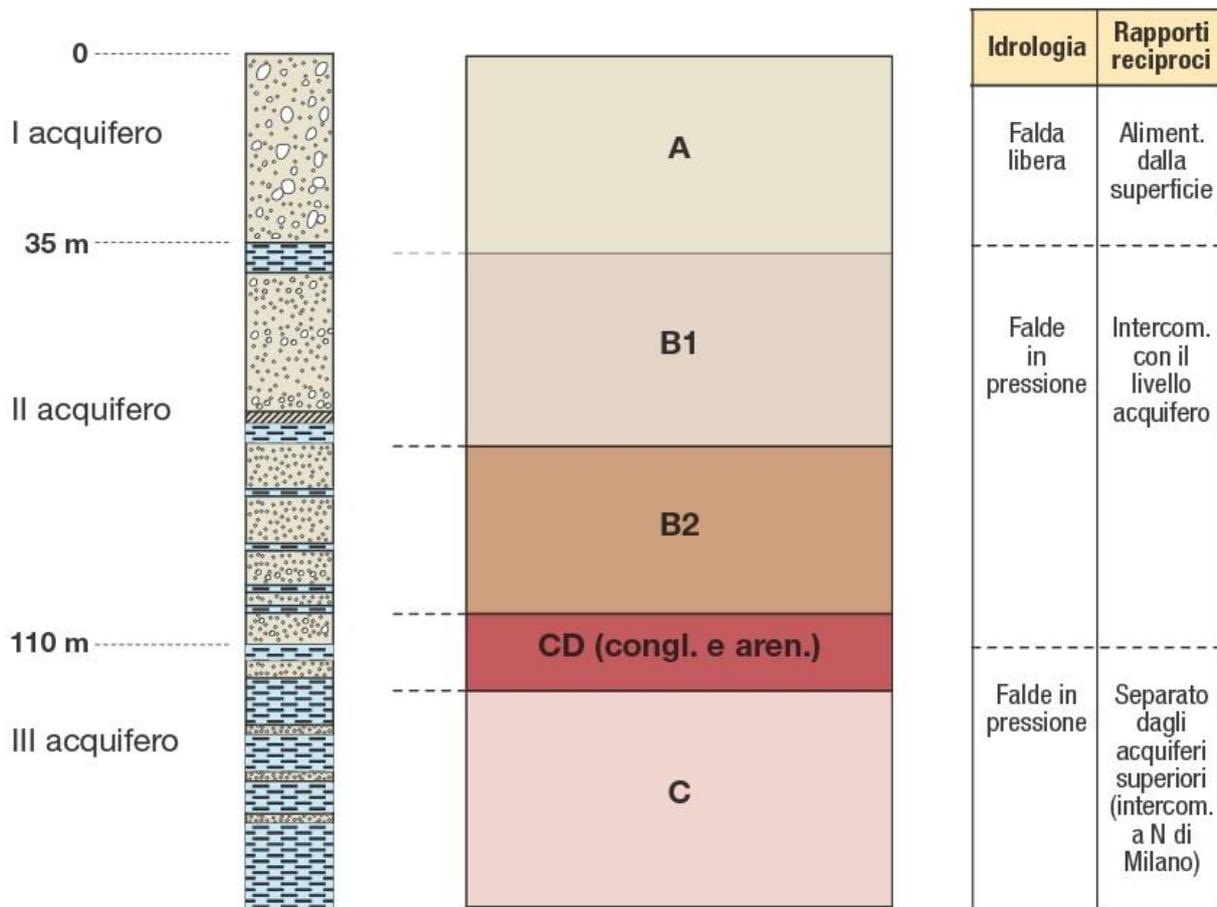


Figura 8 - Schema verticale degli acquiferi (da "Risorse idriche sotterranee" di Gattinoni P.)

Come detto, la separazione idraulica tra i gruppi acquiferi A e B (acquifero tradizionale) nel settore milanese non è sempre continua e a tratti assente; il passaggio da acquifero B a C è invece sempre visibile.

Da notare come gli acquiferi B e II coincidano tra i due diversi approcci, mentre l'andamento della base del Gruppo Acquifero A non sempre coincide con la base del I Acquifero, posta solitamente più superficialmente.

Prendendo in studio la classificazione di Francani & Pozzi (1981), si identificano ora la posizione della base, le caratteristiche idrauliche (permeabilità e trasmissività) e l'andamento piezometrico degli acquiferi I e II.

- I. L'andamento della base non è regolare pur presentando un trend di approfondimento da N a S; oltre a presentarsi più in profondità, il suo spessore diminuisce da 50 m a 20 m nel settore meridionale; insorgono anomalie dovute a fenomeni erosionali, in corrispondenza dei paleoalvei dei corsi d'acqua Lambro e Seveso.

La permeabilità a causa dell'eterogeneità dell'acquifero presenta valori molto variabili, con un trend decrescente verso S.

L'andamento del livello di falda libera ha linee di flusso in direzione NNO-SSE, la soggiacenza media è elevata nel settore settentrionale e diminuisce verso S, la piezometria ha una struttura radiale convergente, attenuata nella parte meridionale.

- II. La base coincide con la base dell'acquifero tradizionale e con la base del supersistema Lombardo Inferiore; presenta un andamento regolare con un approfondimento da N a S, con conseguente ispessimento verso Sud; anche qui si vedono anomalie dovute a fenomeni erosionali in presenza dei paleoalvei dei corsi d'acqua principali. Nell'estremo settore nord-occidentale la base varia da una quota di circa 100 metri s.l.m. fino a 70 m s.l.m. (con pendenze variabili dall'1% al 1.5%), per poi assumere un andamento più regolare in profondità e in pendenza verso S e verso E; nell'area nord-orientale si assiste ad una risalita della superficie di base; a livello della città nella parte centro-meridionale le isobate sono direzionate E-O con pendenza inferiore (intorno allo 0.5%); al di là del confine meridionale la base dell'acquifero assume valori sotto il livello del mare perdendo la direzione E-O.

La trasmissività, intesa come permeabilità moltiplicata per tutto lo spessore dell'acquifero, assume valori da $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ a $7 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ particolarmente elevati nell'area milanese, dove prevalgono le ghiaie e dove si raggiungono i massimi valori di spessore dell'acquifero; verso S la trasmissività non è altrettanto alta poiché nonostante la frazione grossolana si mantenga prevalente, lo spessore dell'acquifero è limitato. Come per la permeabilità dell'acquifero, il trend non è regolare.

L'andamento della falda semiconfinata subisce l'interferenza delle centrali di pompaggio, poiché la maggior parte delle acque prelevate ad opera dell'Acquedotto di Milano provengono da questo livello acquifero; ne consegue una depressione piezometrica nell'area comunale della città. L'asse di drenaggio principale è ancora quello della falda freatica, ossia NNO-SSE, ma se ne sviluppa un secondo nel settore NE della città; le linee piezometriche hanno un andamento radiale convergente nella zona centrale milanese, radiale divergente nelle aree periferiche.

Il dislivello piezometrico tra le due falde è elevato nell'area nord-occidentale con differenze fino a 7 metri, mentre si attenua nel settore nord-orientale; in città e nel settore meridionale la differenza di carico è invece pressoché nulla.

Per l'individuazione precisa della base degli acquiferi, si dispone di una serie di misurazioni in vari punti nel sottosuolo dell'area d'interesse, riguardanti la quota sul livello del mare della base. Si procede ancora ad una loro elaborazione tramite Surfer, ottenendo una griglia continua di punti grazie al kriging e una mappa delle curve isobate visibili in figura 9.

Dall'elaborazione si nota come trovano conferme le peculiarità mostrate nella descrizione generale degli acquiferi, in particolare quanto derivato da Francani & Pozzi: l'andamento della base, come mostrato in figura 9, è fortemente irregolare, soprattutto nella zona a Nord-Est del comune di Milano.

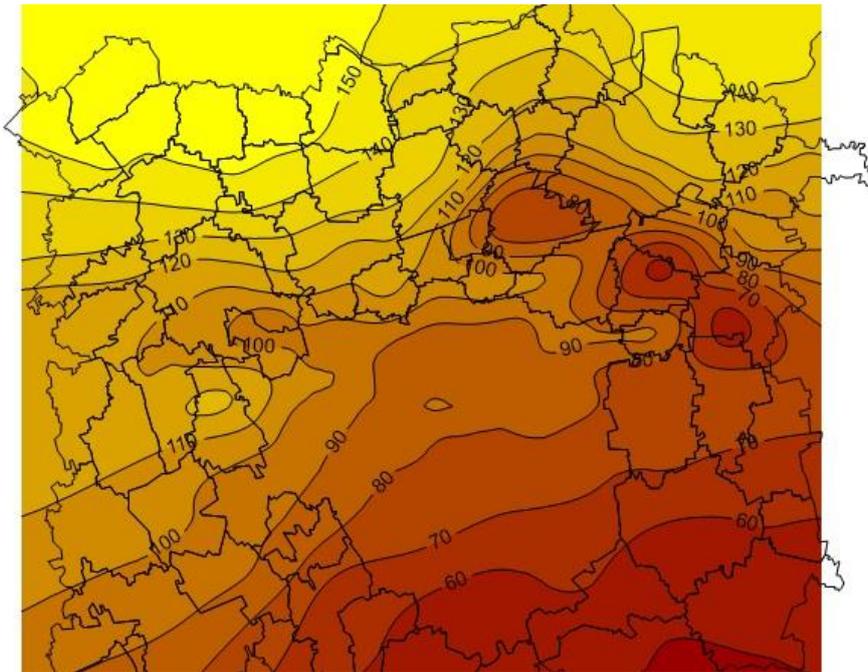


Figura 9 - Andamento della base del primo acquifero nell'area di studio

Per l'aquitard insistente tra acquifero A e B si conosce il suo spessore e si può ricavare una mappa delle curve di livello della sua base tramite somma dello spessore coi valori della base dell'acquifero A appena trovati tramite Surfer. L'aquitard di separazione manca nel settore nord-orientale dell'area di studio: I e II Acquifero sono in comunicazione, perciò l'acquifero tradizionale è indifferenziato. All'altezza di Milano il livello poco permeabile compare, diventa più continuo e aumenta di spessore procedendo verso SE, originando una netta separazione tra i livelli acquiferi. Nella parte occidentale dell'area l'aquitard è sempre presente e segue il trend tipico dell'intera pianura, ossia l'ispessimento verso Sud. In figura 10 sono riportate in rosso la zona a Est dove si considera l'aquitard assente (spessore inferiore a 3 metri) e in ocre le zone con aquitard discontinuo.

Lo stesso percorso sfruttando le potenzialità di Surfer è eseguito per la base del secondo acquifero (unità idrostratigrafica dell'acquifero B): anche in questo caso si trovano conferme rispetto alla descrizione anticipata: l'andamento basale è più regolare e solo nel settore nord-occidentale si individuano irregolarità alla quota pari a 100 metri (figura 11).

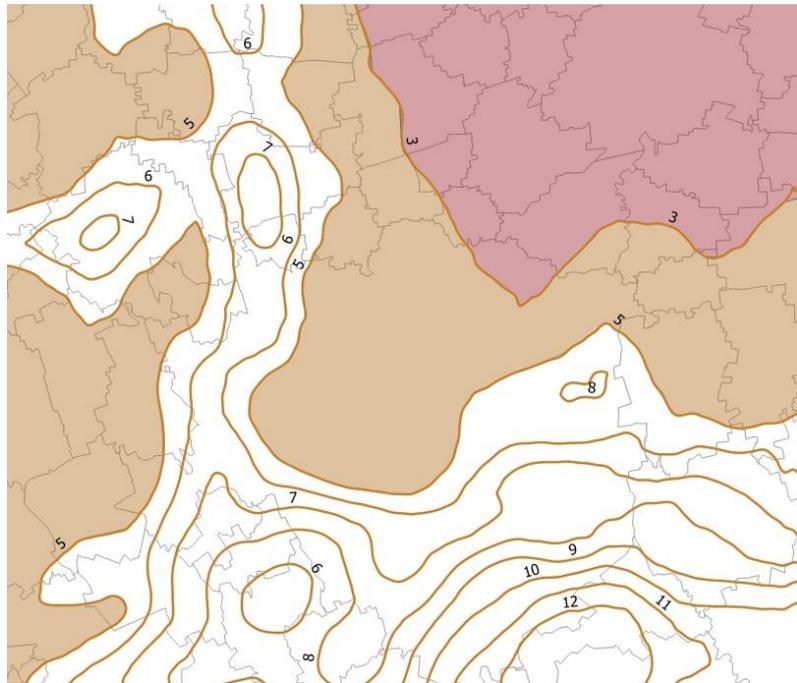


Figura 10 - Spessore dell'aquitard con in rosso zona con aquitard assente e in ocra zona con aquitard discontinuo

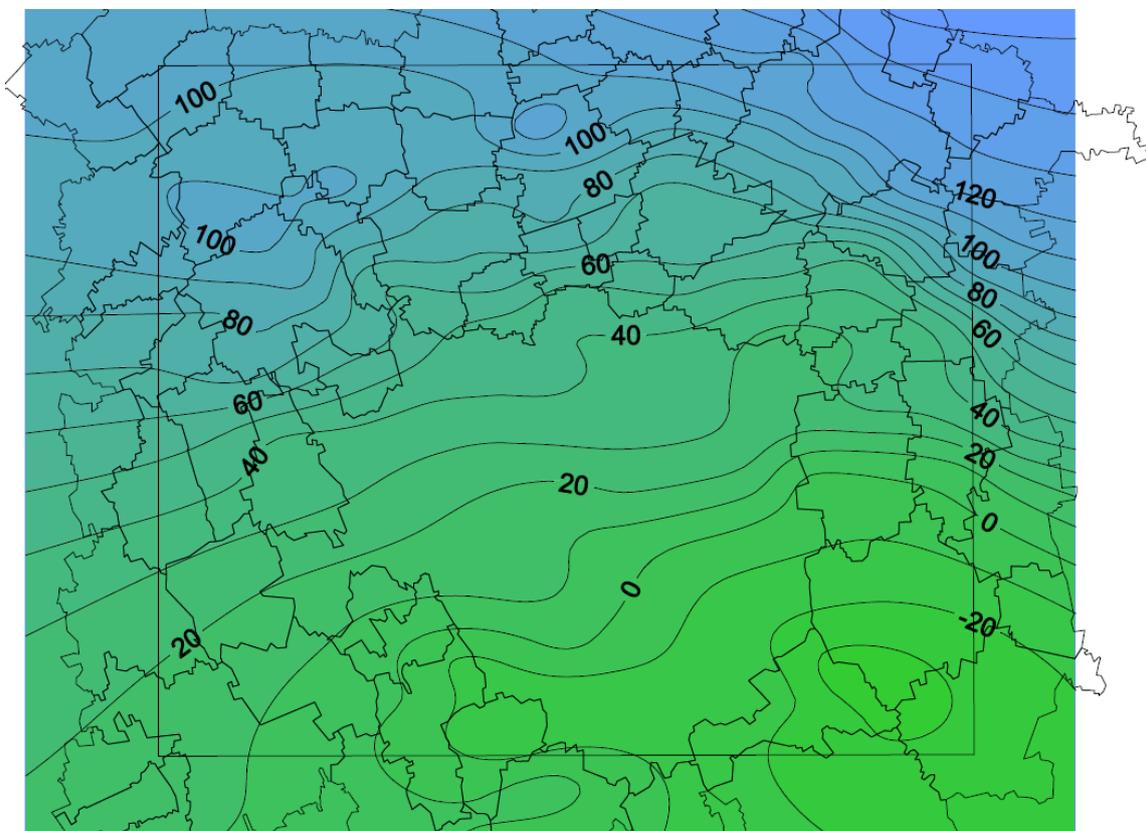


Figura 11 - Andamento della base del secondo acquifero nell'area di studio

Sono presenti numerosi canali artificiali per la gestione delle portate in arrivo da monte:

- il Canale Scolmatore di Nord Ovest, suddiviso nel Ramo Seveso, che intercetta tutti i corsi d'acqua a partire dal Seveso fino al Ticino ben fuori dai confini comunali, e nel Ramo Olona, che scolma l'Olona per poi congiungersi con il Ramo Seveso
- il Deviatore Olona lamina parte delle portate di piena e le immette nuovamente nell'Olona nella zona Sud della città, una volta terminato il suo tratto tombinato
- il già citato Naviglio della Martesana, un canale navigabile a tratti di antica progettazione, recapita le acque nel Cavo Redefossi, che a SE confluisce nel Lambro
- il Deviatore Redefossi evita eccessive portate di piena nell'omonimo Cavo e le fa confluire nel Lambro.

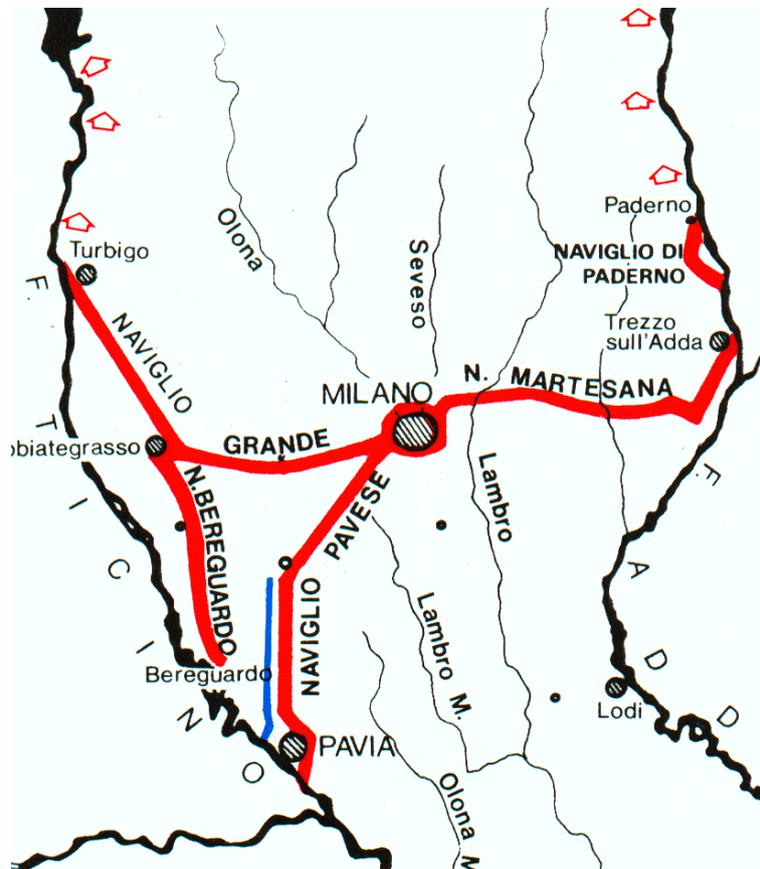


Figura 13 - Il sistema idrografico, con particolare attenzione al sistema dei Navigli, nella piana milanese (da Regione Lombardia, settore coordinamento per il territorio)

Si nota come tra i corsi principali il Lambro sia l'unico a non essere intercettato dal Canale Scolmatore, bensì riceve i due Redefossi e il Lambro meridionale nato dall'immissione delle acque del Deviatore Olona con l'Olona stesso. È inoltre l'unico a raggiungere il Po.

Capitolo 1: L'inquadramento generale dell'area di studio: la città di Milano e il suo hinterland

Come mostrato in figura 13, completano lo schema idrografico l'insieme dei Navigli che furono progettati per collegare i due fiumi principali della Lombardia: l'Adda a E e il Ticino a O, entrambi distanti una ventina di chilometri dalla città: il Naviglio Grande, il Pavese, la nota Martesana e il Canale Villoresi.

La commistione tra rete naturale e canali artificiali dai fini di navigazione, utili all'irrigazione o con obiettivi di protezione lascia intendere il grande sforzo umano fatto nel corso degli anni per realizzare un reticolo che ben si amalgamasse con le necessità e le esigenze della città.

Si specifica ora l'idrografia prettamente insistente nel territorio dell'area di studio in figura 14.

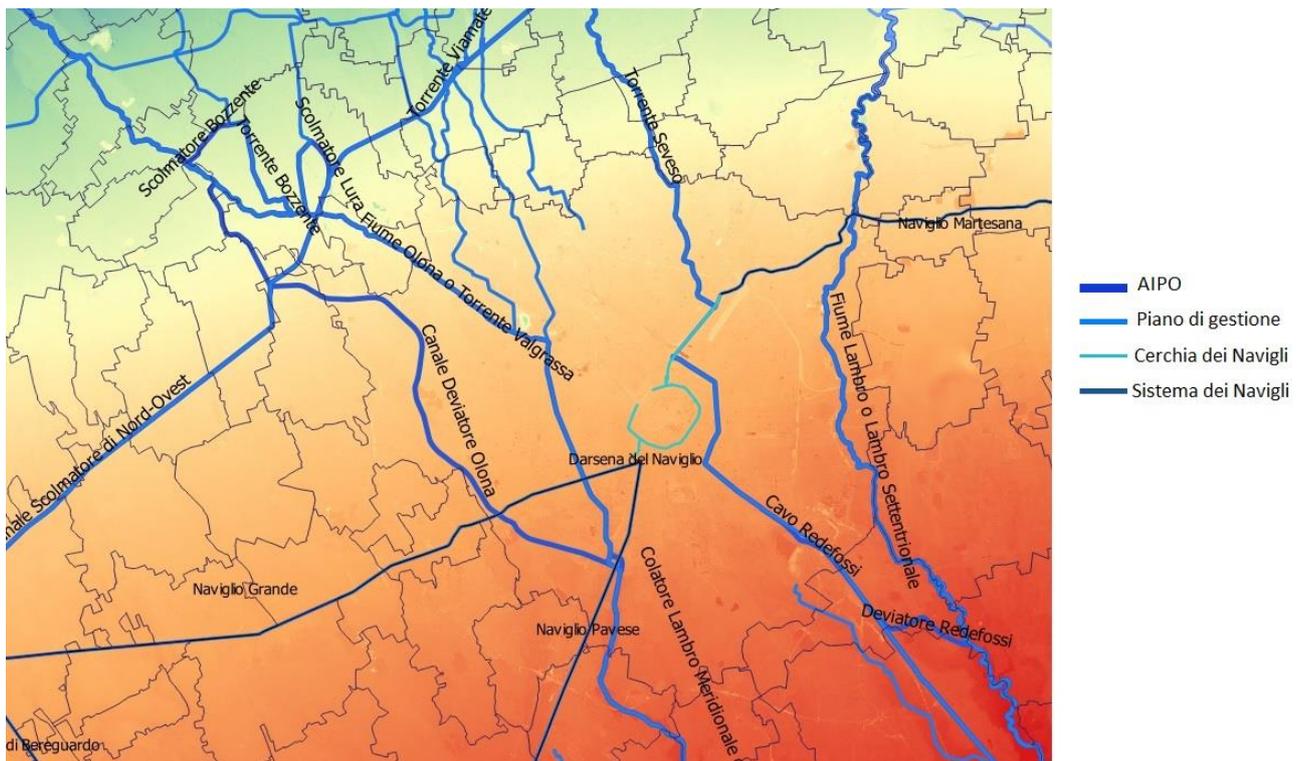


Figura 14 - Idrografia principale nell'area di studio

Sono presentati in figura i principali corsi d'acqua:

- in blu-linea spessa sono i principali fiumi e canali del sistema idrografico, di competenza dell'Agenzia interregionale del fiume Po AIPO (Seveso, Lambro, Olona, deviatore Olona e Redefossi, scolmatori Lura e Bozzente)
- in blu chiaro-linea sottile i corsi d'acqua del Piano di Gestione delle acque, piano che non comprende tra i principali corsi il deviatore Olona e il deviatore Redefossi
- in azzurro la cerchia interna dei Navigli a circondare il centro storico milanese
- in blu scuro-linea sottile i Navigli esterni alla città, tutti facenti parte anche del Piano di Gestione delle acque.

1.5 Gli aspetti climatologici

Il clima nell'area milanese, assimilabile a quello della Pianura Padana ma che risente anche della posizione ai piedi della fascia alpina, è riconducibile a quello continentale: elevate sono le escursioni termiche tra inverno e estate, piuttosto basse le temperature medie invernali (la temperatura minima media del mese di gennaio nella stazione di Milano Linate è di -2°C), temperature estive molto alte con il fenomeno dell'afa (la temperatura massima media del mese di luglio sempre nella stazione di Milano Linate è di 29°C) (figura 15).

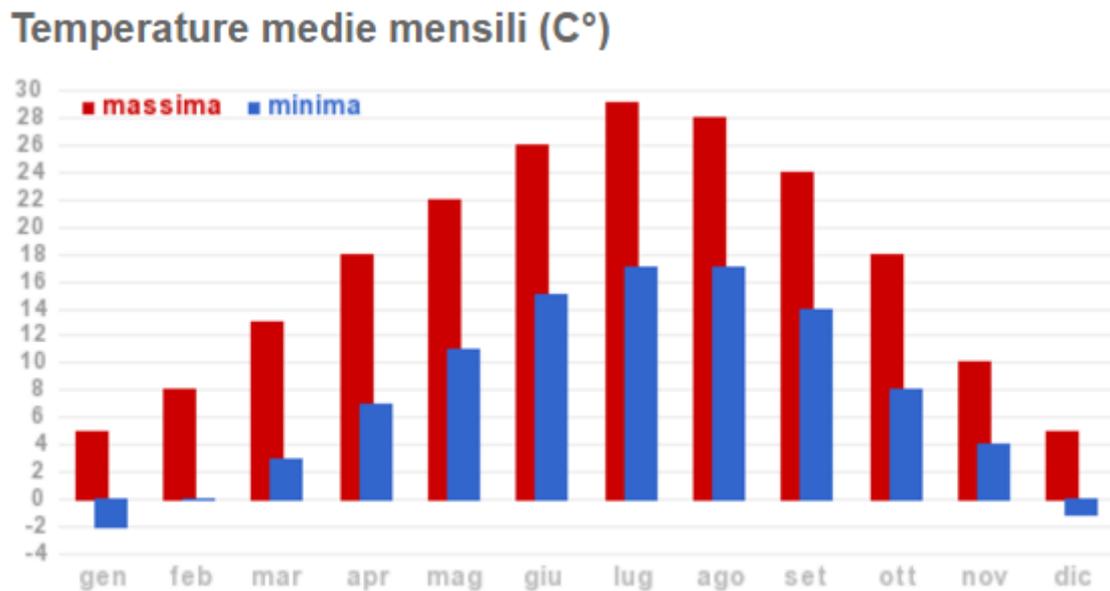


Figura 15 - Temperature massima e minima medie mensili per la stazione di Milano Linate (da paolociraci.it)

La temperatura media annua è invece di 13.7°C relativa al XX secolo per la stazione di Milano Brera, nel centro esatto della città, di 13.8°C per il trentennio di riferimento dell'Organizzazione Mondiale della Meteorologia 1961-1990 (figura 16). Si nota come la differenza sulla media sia pressoché trascurabile, ma è interessante capire che a fine secolo i mesi freddi vedono temperature medie sempre superiori alla media secolare, mentre avviene il contrario per le stagioni calde.

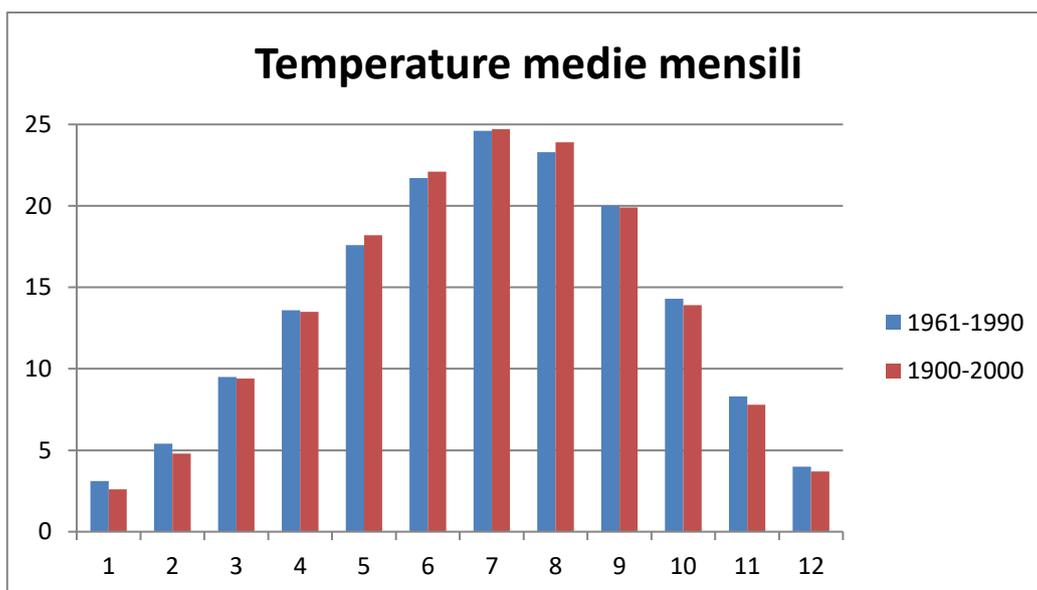


Figura 16 - Temperature medie mensili per la stazione di Milano Brera

A differenziare l'area dall'andamento tipico dei climi continentali sono le elevate precipitazioni: il loro valore annuo medio alla stazione di Milano Linate è di 945 mm (900 mm per la stazione di Brera) con maggiore piovosità nella stagione primaverile e nei mesi autunnali di Ottobre-Novembre, dove si registrano le più alte precipitazioni medie mensili (figura 17).

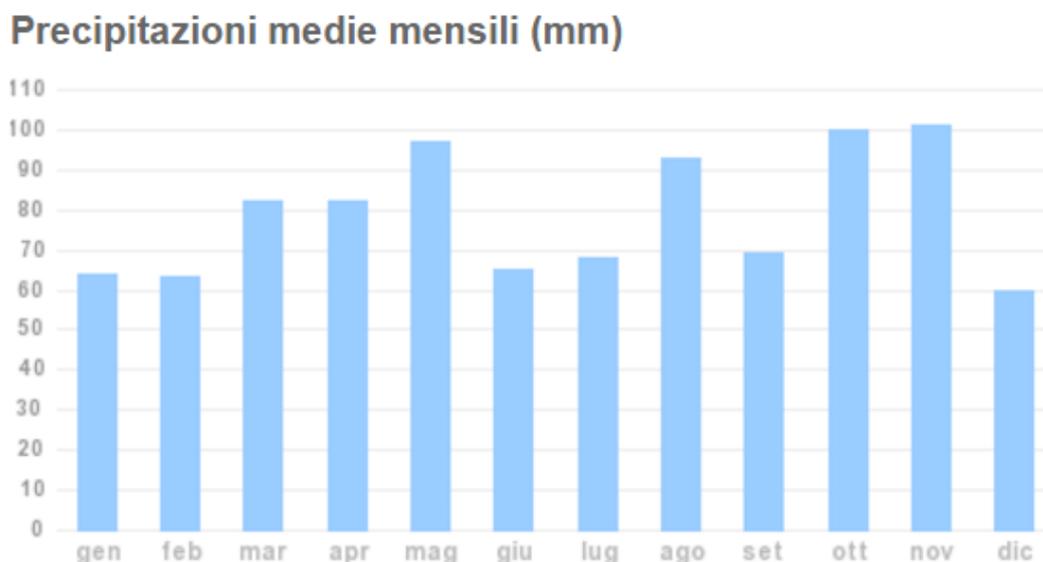


Figura 17 - Precipitazioni medie mensili per la stazione di Milano Linate (da paolociraci.it)

Confrontando le precipitazioni nella stazione di Brera per il XX secolo e il trentennio 1961-1990 si capisce come le precipitazioni siano nettamente inferiori per il trentennio di fine secolo: i 980 mm della media secolare diventano 895 mm per il trentennio a fine secolo (figura 18).

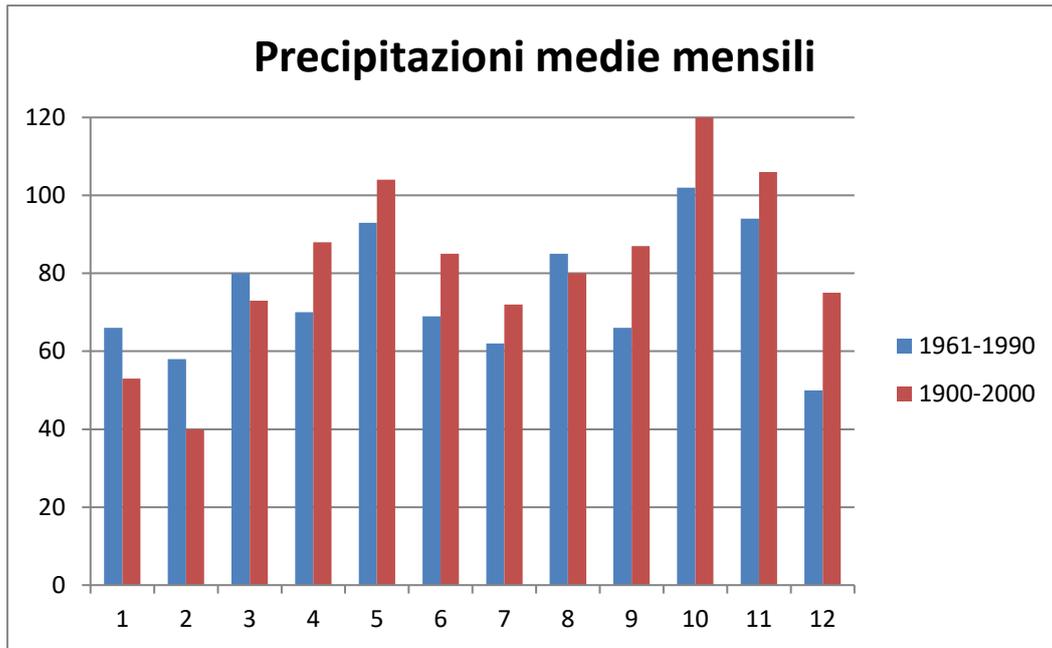


Figura 18 - Precipitazioni medie mensili per la stazione di Milano Brera

Si guarda ora non solo alle precipitazioni totali annue, ma anche ai giorni piovosi e all'intensità delle precipitazioni (Brunetti *et alii*, 2001) con dati relativi al periodo 1951-1996 (che incorporano il trentennio di riferimento): le precipitazioni totali medie annue del periodo rispetto al trend generale mostrano una diminuzione del 20% circa in estate e inverno non completamente bilanciata da un aumento in primavera e minimo in autunno e un chiaro trend di diminuzione del numero di giorni piovosi; come conseguenza del leggero trend negativo delle precipitazioni e di quello più forte riguardante i giorni piovosi, si ha un aumento dell'intensità di precipitazione, costante in ogni stagione.

Queste conclusioni sono confermate con quanto definito a scala regionale (la parte settentrionale dell'Italia) per un intervallo temporale ben più ampio, dal 1833 al 1996 (Buffoni *et alii*, 1999): a livello annuale le precipitazioni hanno un chiaro trend negativo (con un andamento in diminuzione in autunno), stimate al 10% in meno rispetto la media generale.

Si vuole ora aggiornare l'intervallo temporale di studio delle precipitazioni al periodo 2000-2009 (ISTAT, 2010), che, sebbene più breve rispetto agli intervalli considerati, può essere utile a descrivere il trend di diminuzione delle precipitazioni negli ultimi anni: Milano presenta una media annuale di precipitazioni pari a 880 mm, in discesa anche in confronto al trentennio 1961-1990; conferma del trend è data dallo scarto percentuale della precipitazione media annua rispetto al valore climatico del trentennio precedente al periodo di studio 2000-2009, scarto quasi sempre negativo e sceso fino al 5% nel 2006-2007.

In conclusione si può dire che l'andamento della temperatura nell'ultimo secolo e mezzo nell'area milanese ha subito quel lieve ma costante aumento che è riscontrabile a tutti i livelli terrestri e una diminuzione delle precipitazioni, in leggero contrasto con quanto è avvenuto nelle vicine regioni mediterranee dalla seconda metà del XX secolo (secondo dati IPCC, 2013).

esponenziale l'utilizzazione della zona non satura del sottosuolo a profondità sempre maggiori per la creazione di sistemi di trasporto, parcheggi e anche attività commerciali (opere che vennero eseguite senza la auspicabile previsione progettuale di adeguate opere di protezione, la mancanza della quale sta ancora influenzando oggi giorno la metropoli).

Dalla fine degli anni '70 si inizia ad assistere invece ad uno spostamento verso l'alto delle quote piezometriche in concomitanza con un periodo di precipitazioni eccezionali abbinato alla riduzione dei prelievi idrici industriali dovuti alla riduzione dell'attività industriale, come da figura 20.

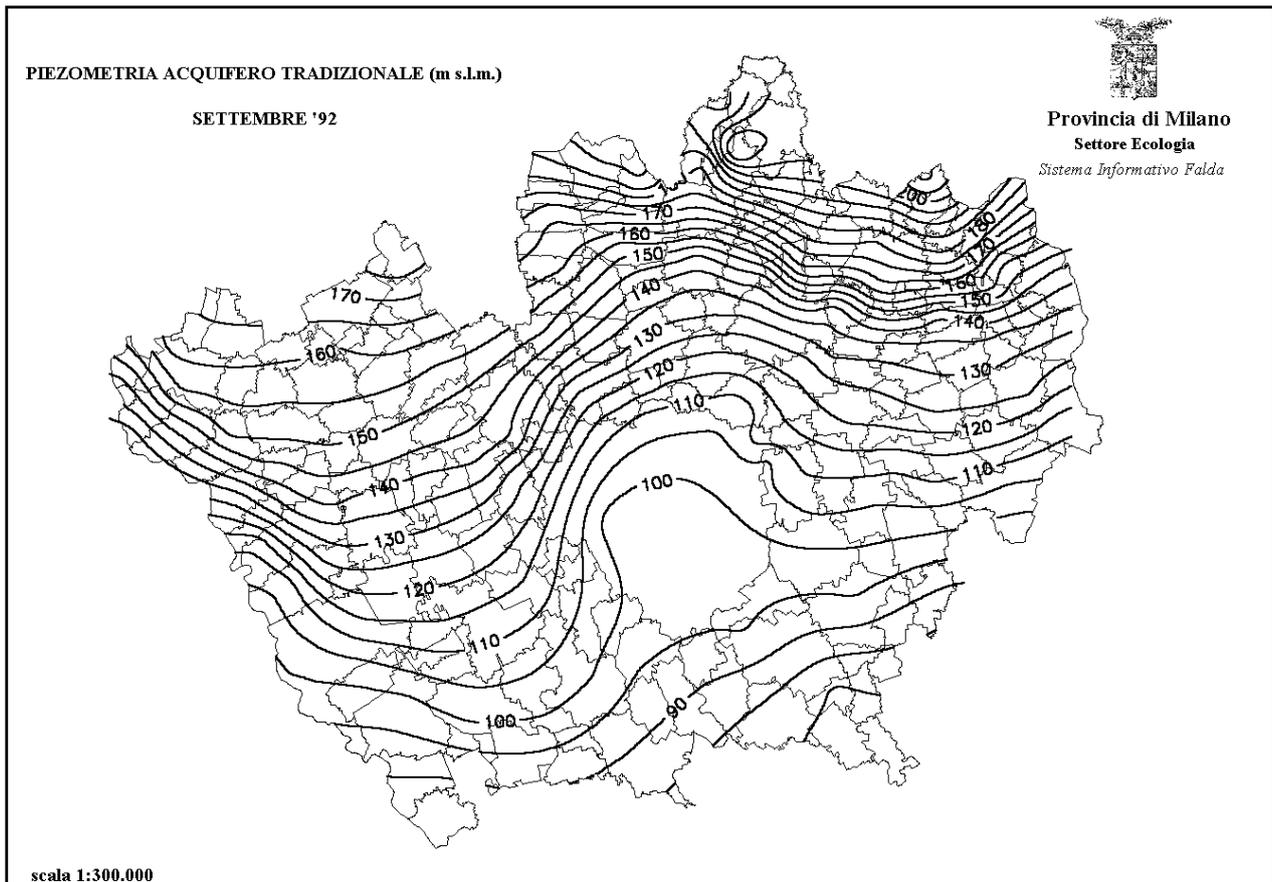


Figura 20 - Carta piezometrica della Provincia di Milano nel 1992

Il trend di innalzamento è confermato dalla situazione nel 2011, dove il posizionamento della isopieza pari a 100 metri s.l.m. è ormai al confine meridionale della città, mentre nel 1992 la stessa risultava ben più centrale nel territorio comunale.

Si possono vedere quindi due diversi andamenti della falda superficiale:

1. drastico abbassamento dovuto agli ingenti prelievi in tempo di boom economico con minima soggiacenza raggiunta nel 1975
2. risalita ciclica dal 1976 (ancora in atto), lenta e progressiva con cicli di quindici anni circa, dovuta alla chiusura o delocalizzazione di numerose industrie con conseguente ricollocazione dei punti di prelievo in aree lontane dal centro urbano.

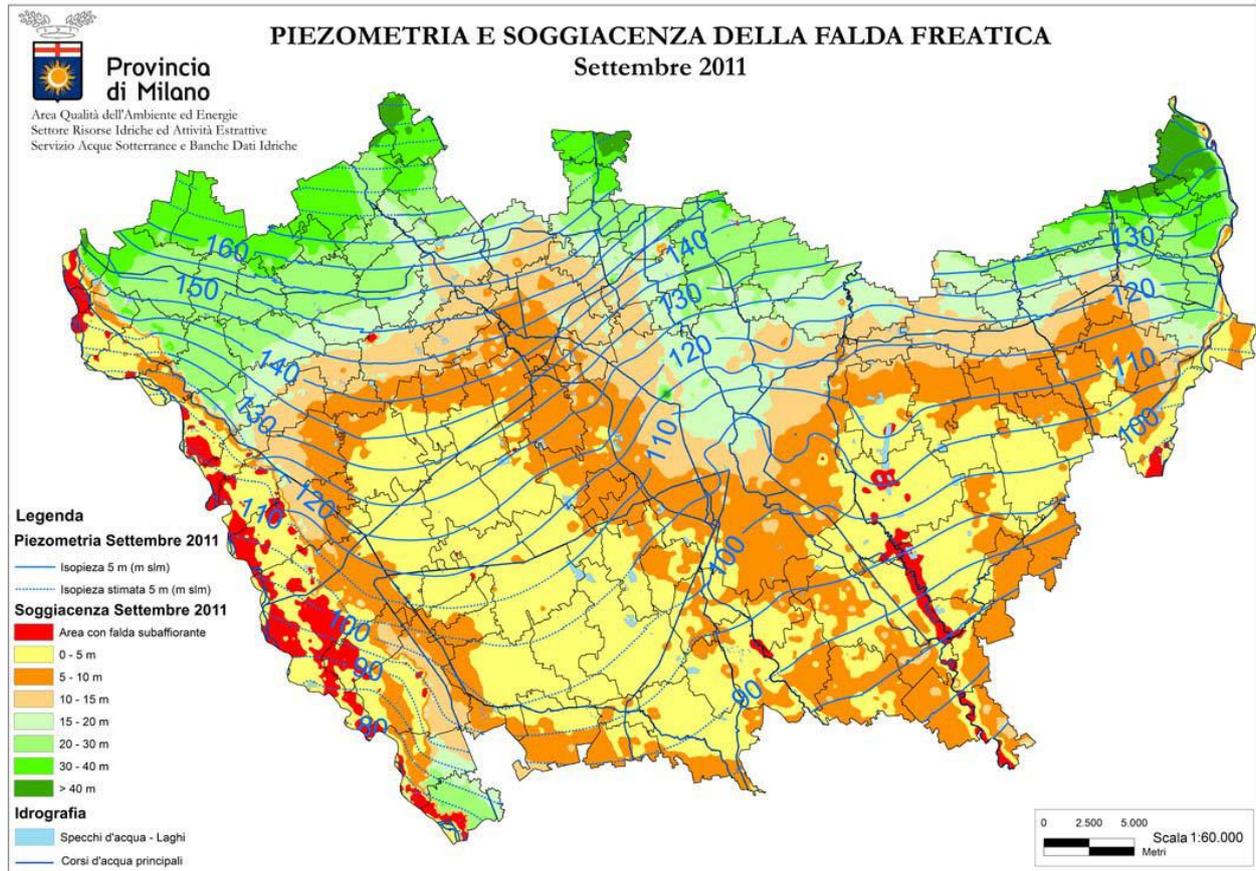


Figura 21 - Carta piezometrica nella Provincia di Milano nel 2011

Dalla Figura 21 si può notare anche la soggiacenza, ossia la distanza della falda freatica dal piano campagna: nell'area comunale varia dai 5 ai 15 metri e si trova conferma di quanto detto in fase di definizione degli acquiferi: la soggiacenza media è elevata nel settore settentrionale e diminuisce verso S e la piezometria ha una struttura radiale convergente, attenuata nella parte meridionale.

Si possono analizzare altri fattori rientranti nel bilancio idrologico che potrebbero essere cause minori dell'innalzamento del livello piezometrico ma comunque concomitanti con l'andamento dei prelievi dipendenti dalle attività economiche industriali (Francani *et alii*, 2005):

- l'irrigazione non è cambiata da fine anni '70 (anche se si è verificata una costante diminuzione dei prelievi idrici dedicati a questa attività), quindi nemmeno il suo contributo alla ricarica di acqua nel sottosuolo
- le precipitazioni non sono maggiori rispetto agli anni di abbassamento della falda, anzi come indicano i dati delle stazioni milanesi la pioggia sta subendo un trend negativo di diminuzione; solo nei primi anni di risalita piezometrica si è vista una buona correlazione con un periodo di estrema piovosità: nell'intervallo 1975-1979 i valori di precipitazioni furono del 30% superiori rispetto alle medie registrate negli ultimi 30 anni

- le perdite dal sistema di trasporto delle acque non sono trascurabili e si stimano pari al 18% della portata totale estratta dai pozzi; considerando i prelievi ridotti e la costanza della percentuale di perdite, si ha un decremento dell'inflow di acque sotterranee, non identificando le perdite dalla rete idrica fattori per l'innalzamento della piezometria
- la contaminazione del primo acquifero individuata negli anni '80 ha portato a spostare i prelievi d'acqua potabile agli acquiferi inferiori, riducendo i volumi estratti dal primo acquifero.

Analisi più specifiche riguardanti il solo territorio del comune di Milano sono state eseguite dalla Metropolitana Milanese S.p.A., società di ingegneria nata per progettare e realizzare le linee metropolitane della città. Essa monitora lo stato qualitativo e quantitativo della falda attraverso controlli mediante analisi chimiche e chimico-fisiche delle acque emunte dai pozzi e mediante rilievi periodici dei livelli di falda in corrispondenza di pozzi e piezometri (frequenza mensile per quei piezometri di cui si hanno a disposizioni lunghe serie storiche, trimestrali per i restanti); la rete di monitoraggio piezometrico comprende 121 punti di controllo sparsi uniformemente sul territorio comunale, selezionati in base a gradi di protezione strutturale e ambientale elevati e ad accessibilità facile; in tutto si raccolgono dati su 362 piezometri con la quota piezometrica assoluta della falda. L'analisi statistica dei dati raccolti ha permesso alla MM di produrre cartografie riguardanti la piezometria e la soggiacenza.

Si studia l'andamento della quota piezometrica della falda superficiale a partire dal periodo di inversione di tendenza dell'andamento piezometrico (fine anni '70) seguendo la divisione comunale in 9 zone, definiti municipi, mostrato in figura 22: si nota come, indipendentemente dal valore iniziale della quota, il trend è chiaramente ascendente per tutti i punti che stazionano nella fascia centrale del comune; il solo piezometro al limitare della zona 8 presenta un andamento non monotono e un valore medio nettamente superiore agli altri, confermando quanto definito dalla descrizione delle unità idrostratigrafiche per la zona nord-occidentale.

Capitolo 2: La piezometria nella città di Milano

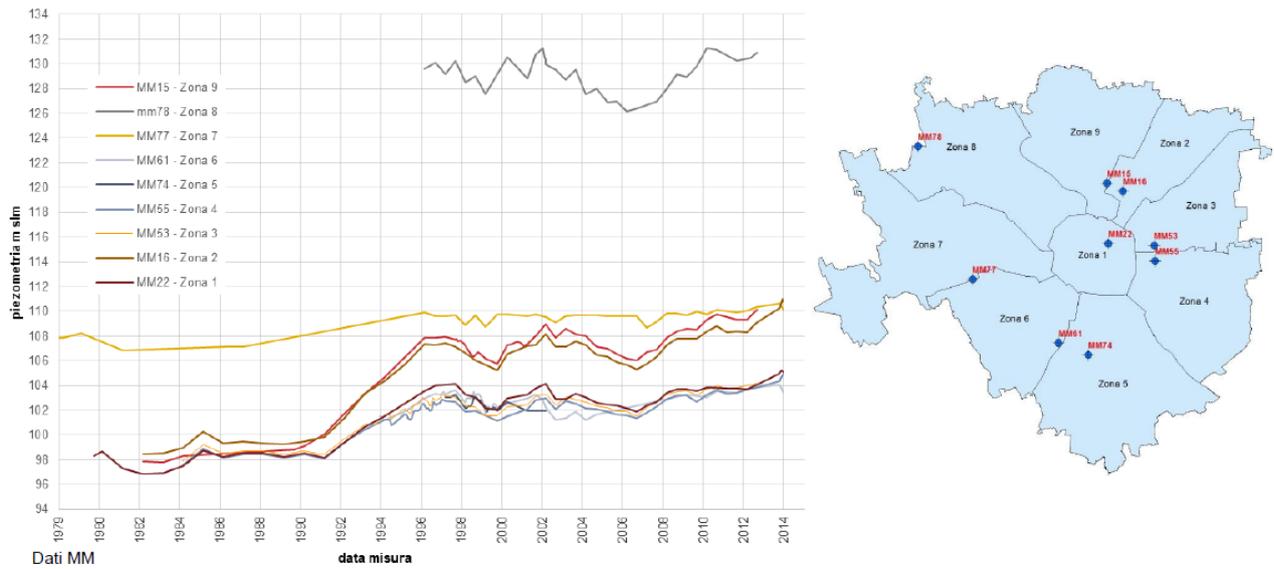
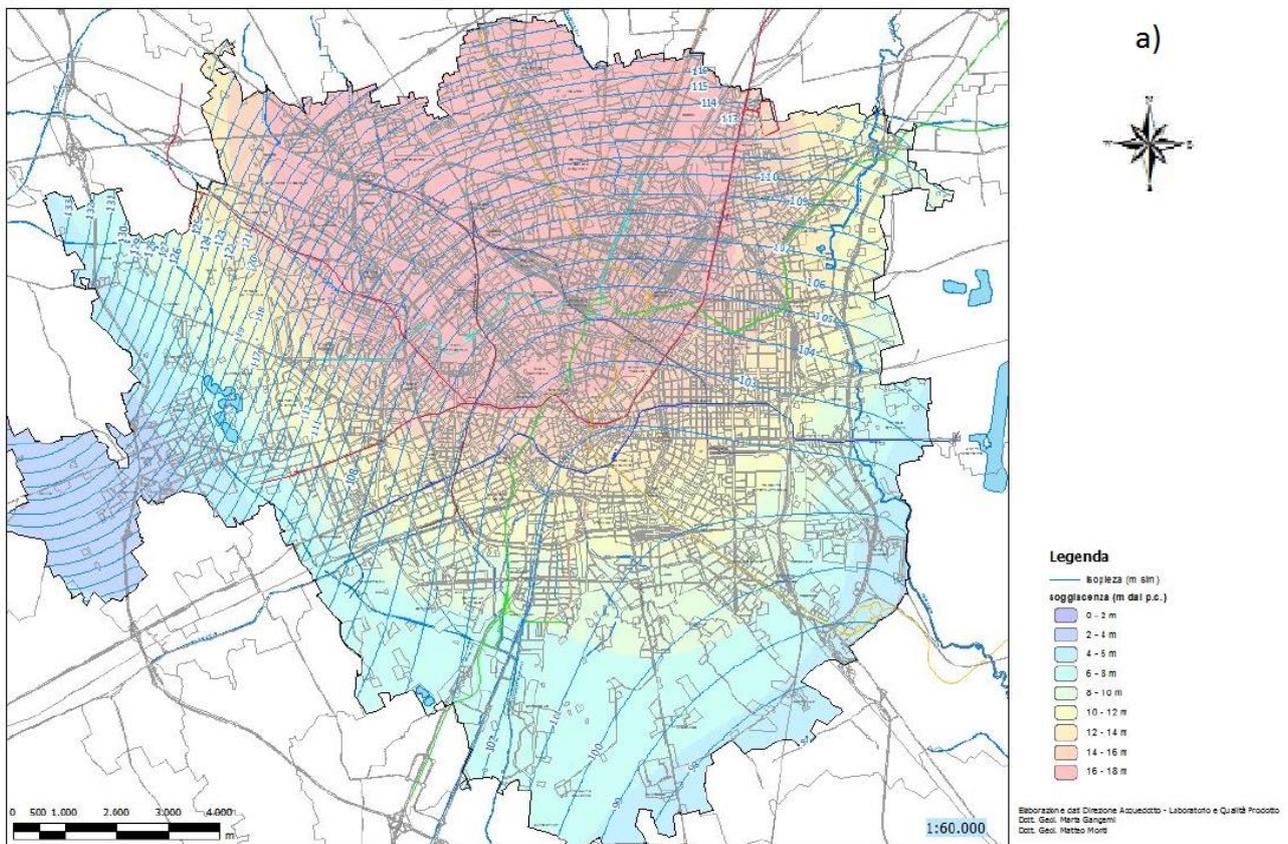


Figura 22 - Andamento quota piezometrica falda superficiale secondo municipi (da Metropolitana Milanese S.p.A.)

Si confrontano ora le carte piezometriche e della soggiacenza della falda superficiale riferite agli anni 2000 e 2014 (figura 23): in soli 14 anni nella parte settentrionale si assiste ad un incremento della quota piezometrica anche di 10 metri, con variazione verso S via via decrescente, ma si può sicuramente affermare che in qualsiasi punto della carta i valori piezometrici sono in salita.



Capitolo 2: La piezometria nella città di Milano

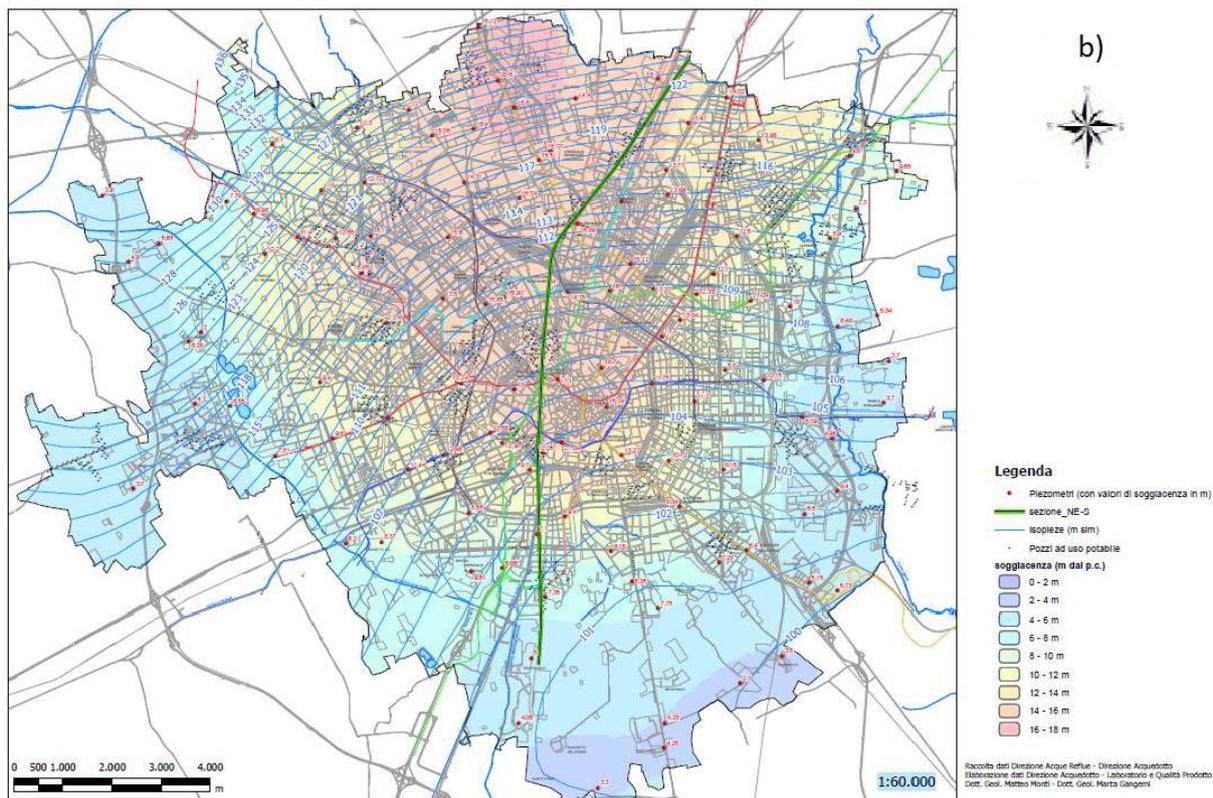


Figura 23 - Carta piezometrica e della soggiacenza della falda freatica per a) settembre 2000 e b) ottobre 2014 (da Metropolitana Milanese S.p.A.)

Si presenta infine la carta della differenza della soggiacenza tra i due anni in figura 24.

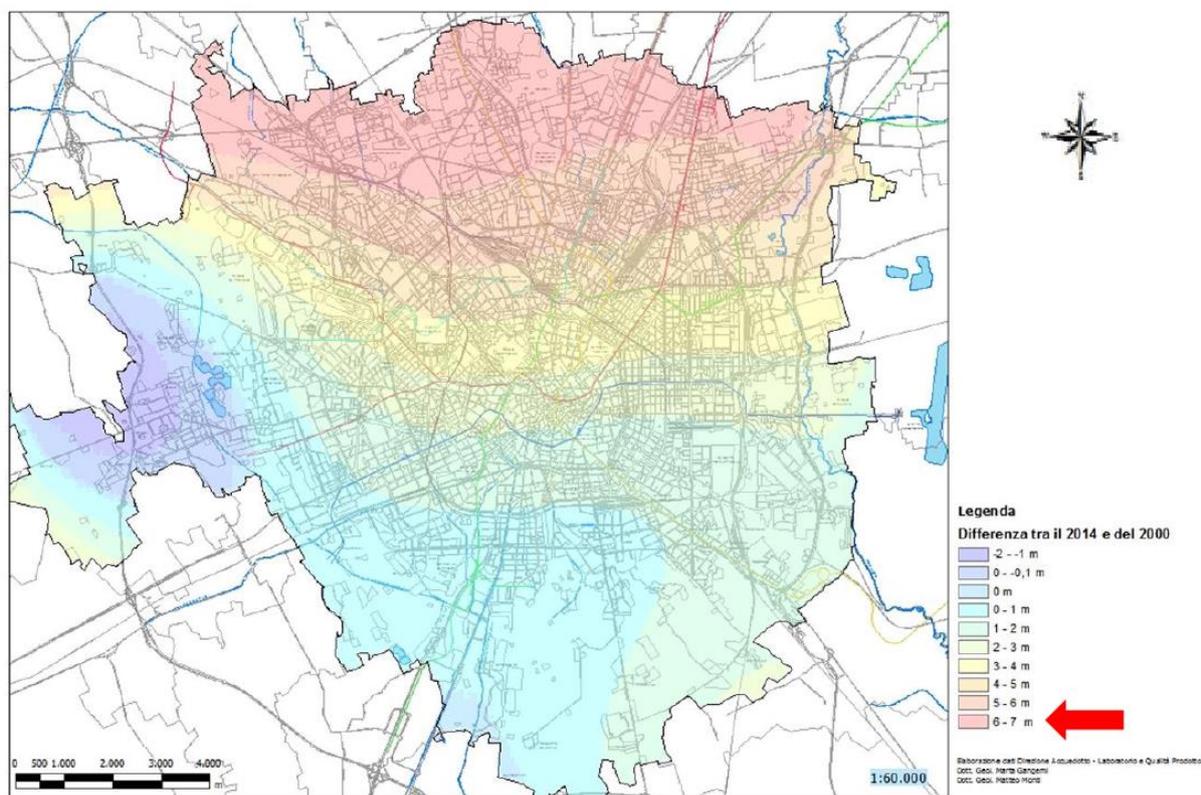


Figura 24 - Differenza della soggiacenza della falda freatica settembre 2000/ottobre 2014 (da Metropolitana Milanese S.p.A.)

É chiaro come la distanza tra la falda superficiale e il piano campagna sia diminuita tranne in un minimo settore a O, con significative conseguenze per quelle strutture sotterranee che si vedono raggiunte da un livello d'acqua non presente in fase di progettazione.

2.1 L'analisi dei prelievi idrici

Si è visto come l'utilizzo dei prelievi sia il fattore dominante nel delineare l'andamento del livello piezometrico; a definire la pressione antropica sull'acquifero intervengono la numerosità dei pozzi e i volumi annui prelevati dai vari settori di utilizzo: sapendo che il prelievo da acque superficiali nel comune di Milano non è significativo rispetto a quello da acque sotterranee, si studiano gli andamenti dei prelievi sia pubblici che privati.

I prelievi pubblici (civile per uso domestico e per il settore terziario) mostrano un netto aumento nel periodo di massimo sviluppo economico per poi stabilizzarsi e incominciare una lenta decrescita a fine anni '70; di andamento opposto è la soggiacenza, ma ad un'inversione di tendenza dei prelievi corrisponde sempre un'inversione anche nella soggiacenza (figura 25).

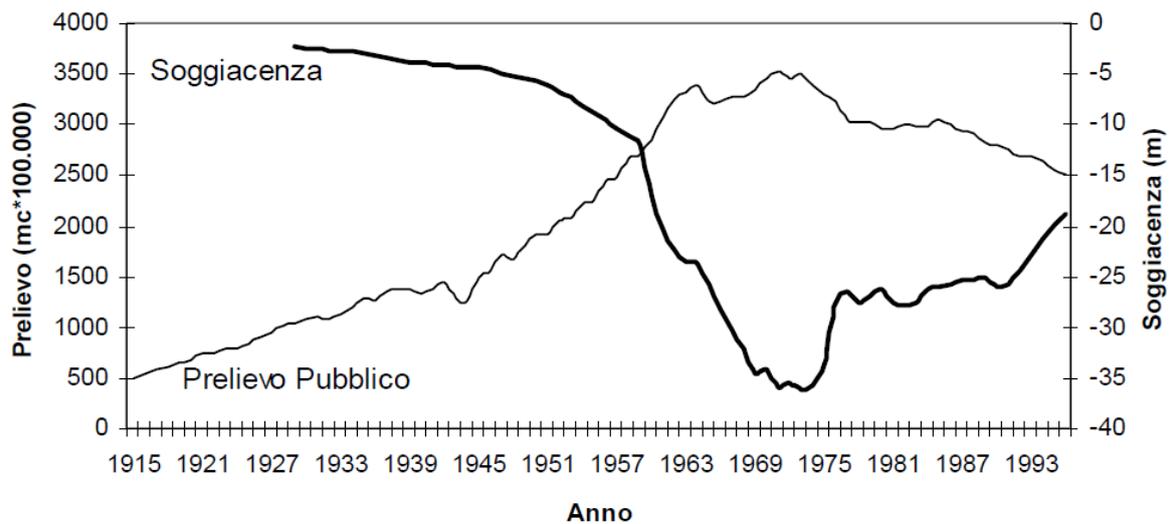


Figura 25 - Andamento prelievo pubblico e soggiacenza (da "Metodi di previsione della piezometria nell'area milanese" di Francani V. et alii)

Prelievi pubblici	
Anno	Quantità [m ³ /s]
1909	1
1960	8,8
1975	11,1
1997	8

Tabella 4- Prelievi pubblici in diversi momenti storico-economici

Dalla tabella 4 si nota come il massimo valore dei prelievi sia stato raggiunto proprio nell'anno di minima soggiacenza, il 1975.

Le variazioni del prelievo pubblico inoltre sono attribuibili in gran parte all'evoluzione demografica della città: aumentando il numero di residenti, aumenta il prelievo civile e quindi pubblico, come visibile in figura 26); ad ugual modo se i residenti diminuiscono: dal 1971 al 1996 si osserva una diminuzione della popolazione pari a 23%, riscontrabile nel crollo di 27 punti percentuali dei prelievi pubblici.

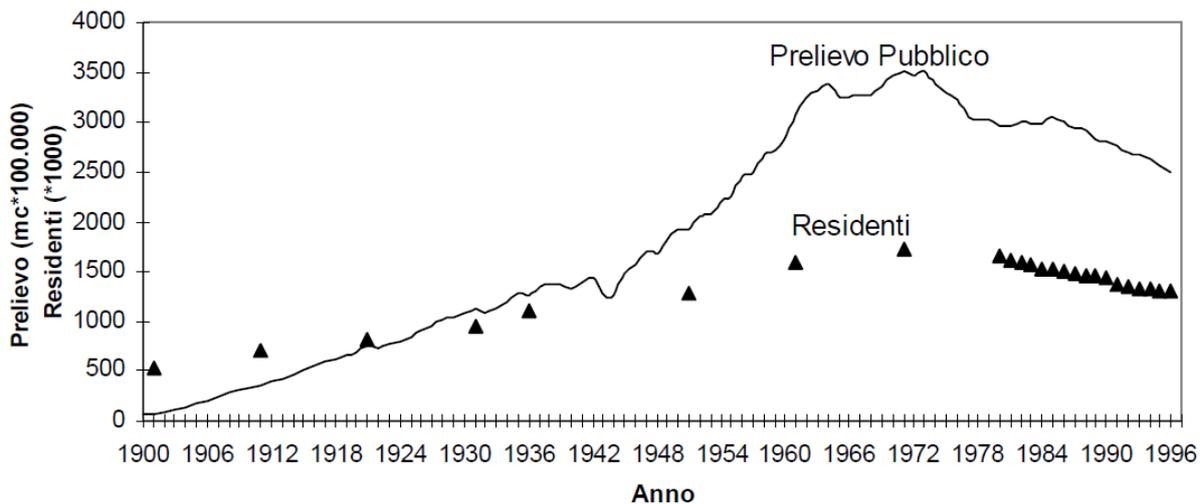


Figura 26 - Andamento prelievo pubblico e residenti (da "Metodi di previsione della piezometria nell'area milanese" di Francani V. et alii)

Fattore che aiuta a capire il prelievo solo di tipo civile è l'indice di consumo pro capite, costantemente cresciuto nel corso degli anni (oggi circa 250 litri al giorno per ogni abitante); la differenza tra il valore dell'indice e quello del rapporto prelievo pubblico - residenti è dovuta all'inserimento di molte attività terziarie a partire dagli anni '50 che spiega come il trend dei prelievi pubblici e quello demografico siano concordi ma non strettamente correlati (nel grafico di figura 26 dal 1950 al primo massimo del prelievo pubblico la forbice tra i due andamenti cresce proprio per l'importanza assunta dal terziario). L'andamento dei prelievi non dipende quindi univocamente dall'evoluzione demografica, ma anche dai cambiamenti del contesto economico e si calcola che a partire dall'inversione di tendenza di fine anni '70 il decremento lineare dei prelievi pubblici sia del 18%, dovuto alla diminuzione dei residenti non compensata completamente dalla crescita dei consumi pro capite (in tal caso nonostante il minor numero di abitanti i prelievi sarebbero potuti rimanere costanti).

I prelievi privati sono variabili in base alle necessità delle industrie e alla loro numerosità (figura 27): aumentavano nel periodo di industrializzazione cittadina, ma in seguito alla dismissione di molti impianti (soprattutto meccanici e chimici) e all'avvento del terziario, hanno avuto un netto e costante calo (decremento pari al 25% nell'ultimo ventennio per Francani, 2012, dovuto non solo alla deindustrializzazione ma anche all'uso reversibile delle acque nei poli industriali); questo andamento negli ultimi anni rappresenta un contributo alla risalita delle acque di falda.

In particolare si è assistito ad una riduzione dei prelievi privati pari al 73% negli anni 1979-1997 (da 96 a 26 milioni di m³) e addirittura del 50% in 7 anni, dal 1990 al 1997 (da 51 a 26 milioni di m³), diminuzione molto significativa nell'area industriale a nord di Milano: a Sesto San Giovanni i prelievi privati sono crollati da 41.6 a 4.9 milioni di m³ nel periodo 1980-1997, ossia 88%.

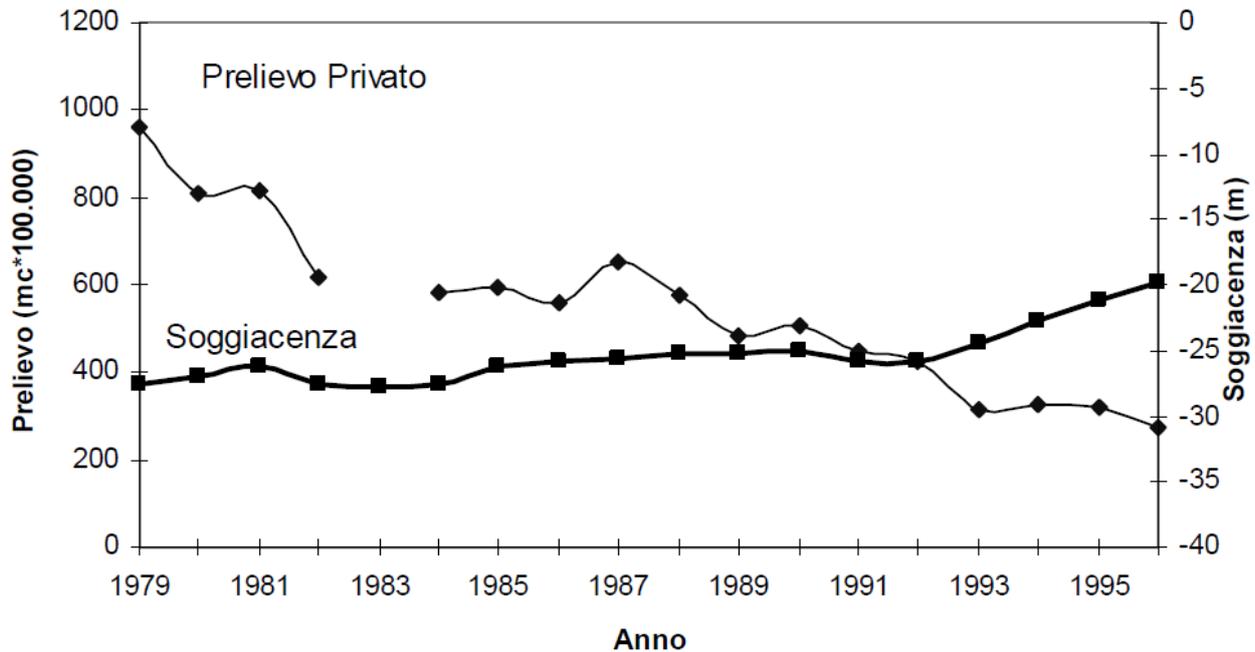


Figura 27 - Andamento prelievo privato e soggiacenza (da "Metodi di previsione della piezometria nell'area milanese" di Francani V. et alii)

In generale il deficit totale di prelievi a Milano è stimato di 66 milioni di m³ all'anno nel periodo di innalzamento del livello del primo acquifero, mentre dal 1993 al 2011 i prelievi totali si sono ridotti del 12% e ipotizzando che l'attuale situazione socioeconomica si protragga nell'immediato futuro si stima un tasso di decrescita annuo dei prelievi totali di 3 punti percentuali (Francani *et alii*, 2012).

2.2 L'interazione tra piezometria e infrastrutture sotterranee

Lo sviluppo infrastrutturale al di sotto del livello del piano campagna nella metropoli è intrinsecamente legato all'andamento dei livelli piezometrici della falda libera. Milano, così come varie città europee (Barcellona su tutte), ha assistito ad uno straordinario sviluppo sotterraneo sfruttando l'abbassamento piezometrico conseguenza della proliferazione di attività industriali nell'area cittadina ai tempi del boom economico; l'abbassamento del livello acquifero può portare però a fenomeni di subsidenza locali o a larga scala nei sedimenti recenti, con conseguente pericolo per le costruzioni in loco; la subsidenza può essere causata dal pompaggio diretto, ma anche dalla costruzione stessa di strutture sotterranee che possono fungere da dreni o da barriere

per il flusso naturale della groundwater, rispettivamente decrescendo o alzando il livello idrico locale (Marinos & Kavvas, 1997): in questi casi si tratta di subsidenza locale. Si può incontrare invece una subsidenza di tipo regionale in caso di eccessivi prelievi idrici.

D'altro canto conseguenza del declino delle attività industriali è la risalita dei livelli piezometrici: non solo i ridotti prelievi industriali portano al recupero del carico idraulico, ma questo fenomeno è stato esacerbato anche da un aumento di ricarica causato dalle perdite dei sistemi di fornitura d'acqua e delle condutture fognarie ("leakage") che in città densamente popolate sono molto estesi. L'innalzamento del livello di falda affligge quindi quelle strutture urbane che, come già anticipato, sono state progettate in tempi di depressione di tale livello senza previsione di un suo futuro recupero di carico. A Milano sono diventati frequenti problemi di infiltrazione d'acqua ("seepage") nei tunnel della metropolitana, nei parcheggi sotterranei fino ai piani interrati delle abitazioni.

Si sottolinea l'interferenza duale tra strutture sotterranee e livello piezometrico: quest'ultimo influisce sulle strutture così come la loro costruzione provoca variazioni nel flusso idrico e nel livello piezometrico locale (figura 28).

Conseguenze negative della risalita piezometrica possono essere anche: il progressivo allagamento di spazi sotterranei e di scavi temporanei, la ridotta capacità dei sistemi di drenaggio, in particolare in caso di violenti precipitazioni (sempre più frequenti negli ultimi anni nonostante la diminuzione media delle piogge) e il fenomeno dell'uplift per le strutture come tunnel e fondazioni, il sollevamento dallo loro sede verso le strutture sovrastanti.

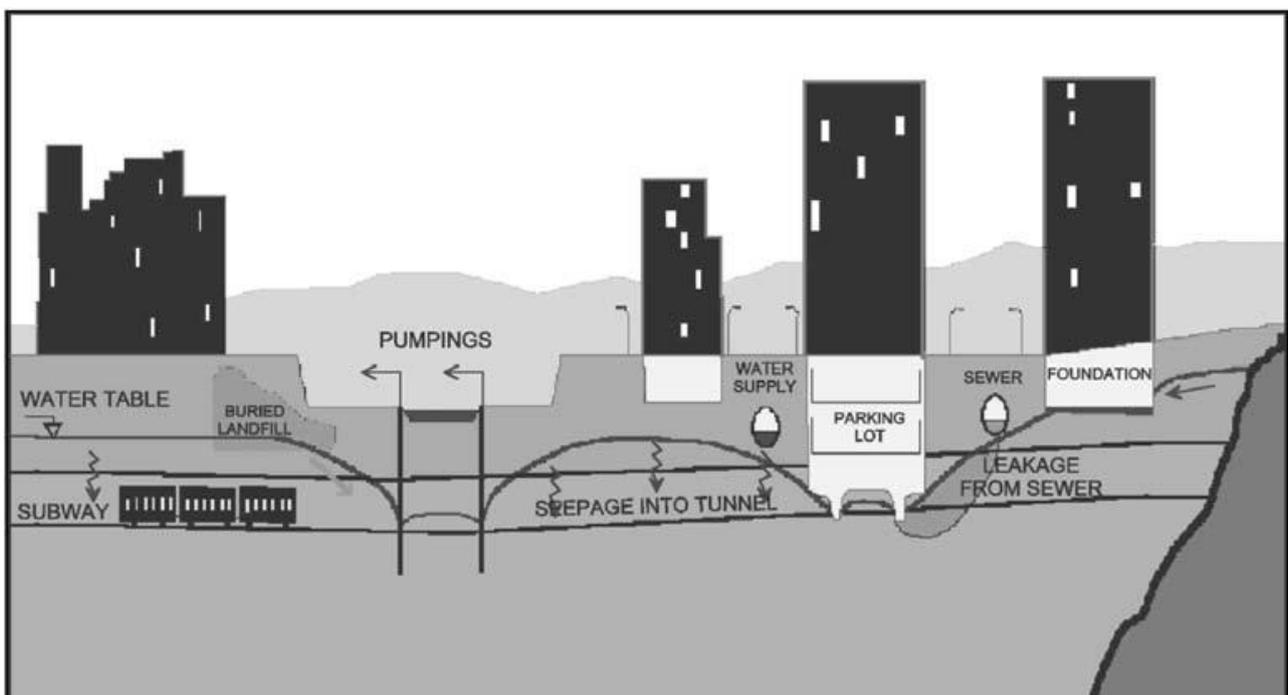


Figura 28 - Interferenze tra strutture sotterranee in città e livello piezometrico (da "Introductory review of specific factors influencing urban groundwater" di Vazquez E. et alii)

Per far fronte non solo all'innalzamento del livello piezometrico, ma più in generale alla fluttuazione nel tempo dell'andamento del livello di groundwater, varie soluzioni implementabili nel breve termine sono proposte (Francani, 2005):

- l'individuazione del cosiddetto 'sustainable piezometric level', un livello auspicabile di altezza di falda controllabile attraverso la regolamentazione dei prelievi idrici
- l'attuazione di interventi sulla rete di irrigazione superficiale, per esempio l'impermeabilizzazione del canale Villoresi nell'hinterland settentrionale (in effetti questa soluzione ha trovato incentivo in vista di Expo 2015 e si prevede la conclusione dei lavori per fine 2017, in ritardo di un anno rispetto alle stime iniziali)
- la possibilità di incrementare il flusso d'acqua in uscita con estrazioni idriche da laghi di cava, mediante pompaggi artificiali appositi (in vicinanza di luoghi che devono essere protetti)
- lo sviluppo e la costruzione di pozzi di drenaggio con funzione di accumulo temporaneo
- un più efficiente uso dell'irrigazione.

Riguardo al terzo punto, si trovano conferme dell'utilità del pompaggio idrico da laghi di cava per un determinato periodo temporale, in caso di prevista criticità per strutture sotterranee, grazie a Beretta *et alii* (2004): attraverso un pompaggio sperimentale in una cava nella zona a sud-est di Milano, avvenuto con valori di prelievo idrico progressivamente crescenti a diversi intervalli temporali, si è visto come questa tipologia di intervento sul regime di groundwater porti gli effetti desiderati nell'intorno della cava con vantaggi in diversi ambiti:

- declino del livello piezometrico indotto dal pompaggio con un drawdown visibile fino a vari chilometri dal sito
- possibilità di controllare facilmente la stabilità della cava
- possibilità di scarico delle acque prelevate nei canali superficiali con miglioramento della qualità delle acque di superficie
- economicità di operazione e gestione rispetto ad altri interventi con tale finalità.

É chiaro come di particolare interesse sono quelle strutture e infrastrutture dal carattere pubblico, dai parcheggi sotterranei alle linee della metropolitana: in questo elaborato si vogliono mettere in mostra le relazioni che intercorrono tra linee metropolitane e livello piezometrico della falda libera nell'area milanese, con l'intento di verificare gli effetti dell'innalzamento piezometrico in atto sul sistema metropolitano, considerando anche possibili scenari futuri nel breve-medio termine che coinvolgano la realizzazione di nuove tratte del sistema di collegamento sotterraneo e che vaghino anche i previsti cambiamenti socioeconomici e climatici. Per questo motivo è effettuata un'analisi dettagliata della rete di trasporti sotterranea milanese.

2.2.1 La metropolitana di Milano

La rete metropolitana conta allo stato attuale 4 linee che si sviluppano per un totale di 101 chilometri con 113 stazioni. Il sistema è interno al comune di Milano per il 73% della sua lunghezza (69 km), mentre 29 stazioni si trovano al di fuori dei confini comunali (25%), a testimonianza del grande sviluppo per raggiungere l'hinterland, area che comprende 4 milioni di residenti circa.

Le 4 linee sono delineate in figura 29, descritte in tabella 5 e così identificate:

- M1 (rossa): da Sesto FS (stazione ferroviaria del comune di Sesto San Giovanni) a Rho Fiera/Bisceglie
- M2 (verde): da Assago/Abbategrasso a Gessate/Cologno Nord (stazione del comune di Cologno Monzese)
- M3 (gialla): da San Donato Milanese a Comasina
- M5 (blu): da Bignami a San Siro Stadio.

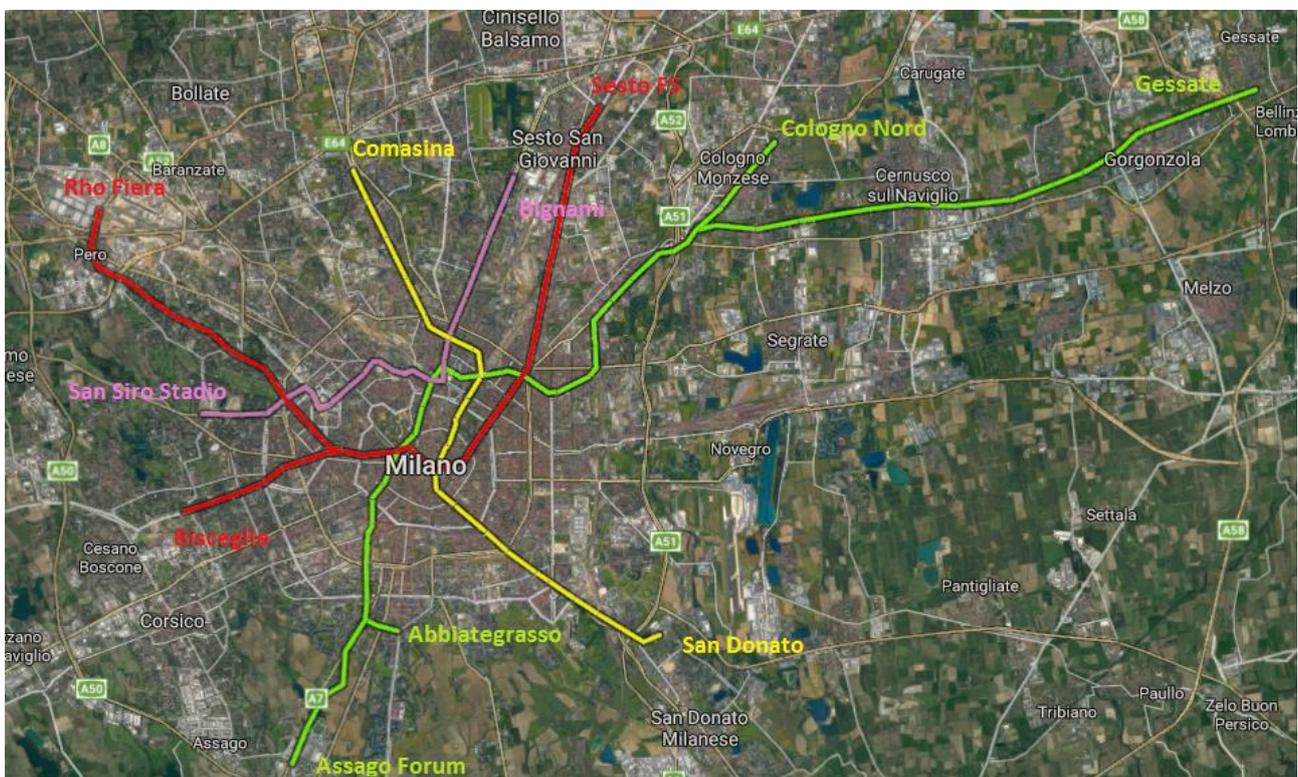


Figura 29 - Lo schema attuale della metropolitana di Milano

La linea 1 collega Sesto San Giovanni, alla periferia NE di Milano, con il quartiere di Bisceglie a Ovest oppure il polo fieristico di Rho Fiera a NO. Con i suoi 27 km di lunghezza e 38 stazioni, è stata la prima esperienza italiana nel settore delle costruzioni sotterranee urbane, con la progettazione dal 1952 e l'inizio lavori nel 1957.

La linea 2 partendo da Gessate o Cologno Monzese, comuni a NE della città, e arrivando nella periferia S del comune, è particolarmente importante perché tocca tutte le maggiori stazioni ferroviarie milanesi: Lambrate, Centrale, Garibaldi, Cadorna e Porta Genova. Per la sua realizzazione è stato necessario costruire gallerie sovrapposte (la stazione di Sant'Agostino è su tre

livelli) così come stazioni sopraelevate e a piano campagna nel tratto a E. É composta da 35 stazioni che si sviluppano su 40 km.

La linea 3 si estende per 16 km con 21 stazioni dalla periferia N del quartiere di Comasina al confine col comune di San Donato Milanese a SE. La sua realizzazione sul finire degli anni '80 è la prima a risentire della forte presenza di acque di falda, che costrinse al ricorso a soluzioni tecnologiche innovative come il congelamento del terreno alla temperatura di -196°C mediante azoto liquido.

La linea 5 è la prima di tipo 'leggero', ossia prevede l'utilizzo di rotabili più corti e quindi stazioni di dimensioni più contenute (lunghezza lineare di 50 metri invece di 110) grazie all'automazione integrale, che evita la presenza di conducenti. La linea più recente, inaugurata nel 2013, è attualmente estesa per 13 km con 19 stazioni.

Linea	Opera	Lunghezza [km]	Stazioni	Inaugurazione
M1	Sesto FS - Rho Fiera/Bisceglie	27	38	1964
M2	Assago Forum/Abbiategrasso - Gessate/Cologno Nord	40	35	1969
M3	San Donato - Comasina	17	21	1990
M5	Bignami - San Siro Stadio	16	19	2013

Tabella 5 - Descrizione delle linee metropolitane attualmente attive

Si specifica che nelle analisi di questo elaborato si terrà conto anche del passante ferroviario, poiché interrato nel suo percorso da Lancetti (a NO di Porta Garibaldi) a Porta Vittoria, con uno sviluppo di 7 km per un totale di 6 stazioni sotterranee.

Inoltre una nuova linea è in fase di completa costruzione: per 15 km la linea 4 (blu) attraverserà il comune a partire dalla zona SO della stazione ferroviaria di S. Cristoforo nel quartiere di Lorenteggio per arrivare all'aeroporto di Linate a E per un totale di 21 stazioni; si avrà un progressivo abbassamento del livello del piano banchina rispetto al piano campagna procedendo verso Ovest: nella parte orientale fino al centro città la galleria sarà abbastanza superficiale, per poi allontanarsi dal piano campagna dovendo intersecare le già presenti linee 2 e 3 al limite meridionale della zona storica della città. Anche la linea 4 sarà a completa automazione con rotabili più corti e quindi stazioni di dimensioni più contenute (lunghezza lineare di 50 metri invece di 110). Le metodologie di costruzione prevedono la minimizzazione degli impatti in superficie (data la densità abitativa del settore percorso dalla linea) e l'adattamento al sottosuolo che denota già la presenza di altre infrastrutture e una significativa presenza d'acqua.

Data la volontà di considerare lo sviluppo futuro del sistema di trasporto sotterraneo, si mostrano ora in figura 30 tutte le tratte in fase di costruzione o di progettazione (con loro caratteristiche principali in tabella 6), che dimostrano innanzitutto la volontà di incorporare la zona NE dell'hinterland (Monza e dintorni) nel tessuto di trasporti cittadino (con l'intenzione di prolungare ulteriormente la linea lilla a E di Monza per raggiungere la Villa Reale e il Parco di Monza a N):

Linea	Opera	Lunghezza	Stazioni	Stato	Tempistiche
M1	Sesto FS - Cinisello/Monza	1,9	2	in costruzione	2017
M1	Bisceglie - Baggio	3	3	in progettazione	-
M2	Cologno Nord - Vimercate	9,7	5	in progettazione	-
M3	San Donato - Paullo Est	14,8	6	in progettazione	-
M4	San Cristoforo - Linate	15	21	in costruzione	2022
M5	Bignami - Monza	6,3	5	in progettazione	-
M5	San Siro Stadio - Settimo	4,5	4	in progettazione	-

Tabella 6 - Descrizione dei progetti di sviluppo delle linee metropolitane

Si sottolinea come il prolungamento fino a Vimercate sia al momento accantonato, poiché data l'estensione dell'ampliamento la soluzione progettuale è stata definita sovradimensionata ed economicamente inefficiente. Sono invece già in fase di studio nuovi piccoli prolungamenti della M4 fino a Corsico e della M2 fino a Rozzano.

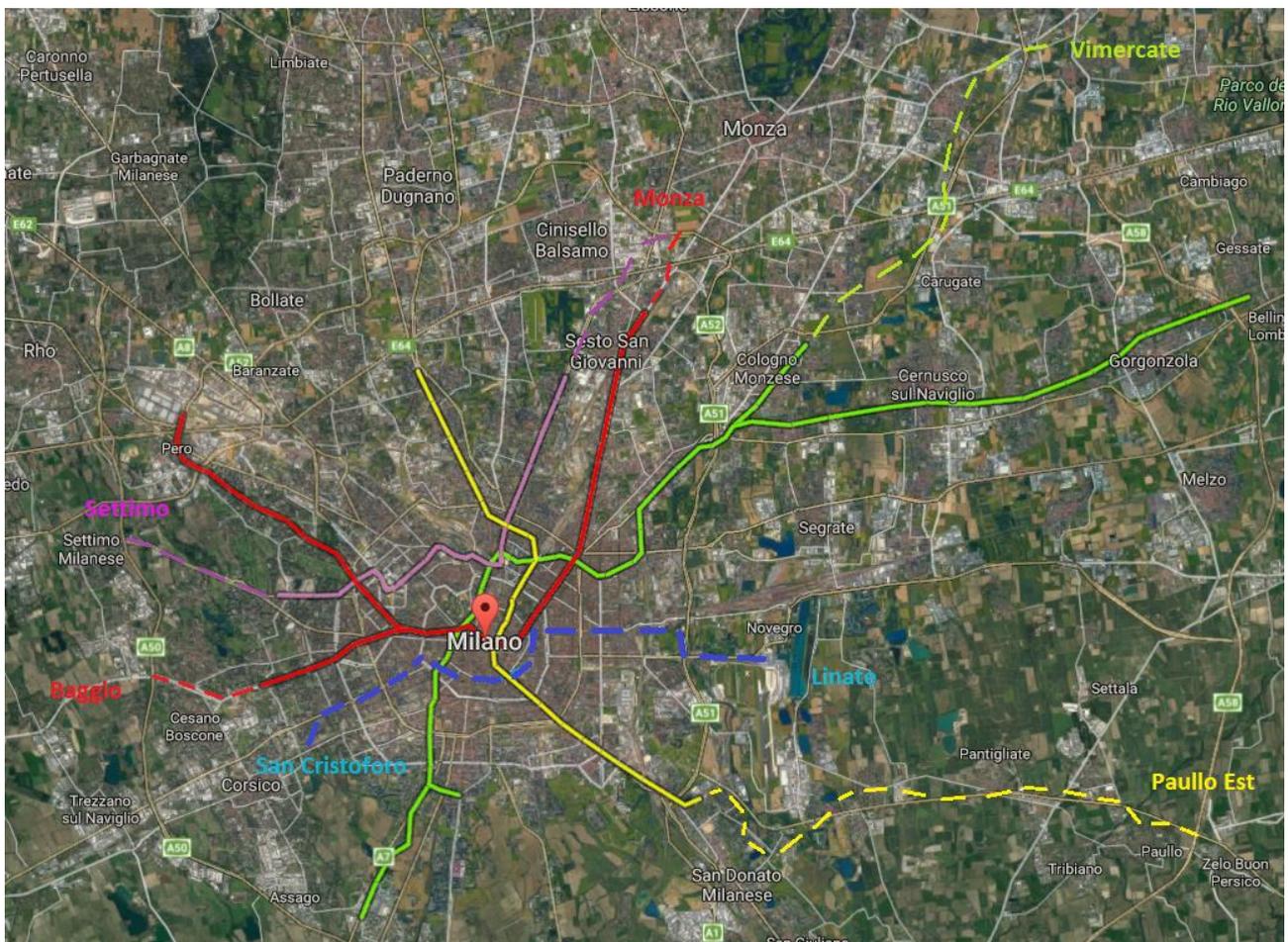


Figura 30 - Il possibile schema futuro della metropolitana di Milano

2.3 Le previsioni future sugli aspetti climatologici e i prelievi

Avendo studiato la variazione temporale nell'ultimo secolo degli aspetti climatologici fondamentali e del livello piezometrico nell'area milanese, in ottica di previsione dell'evoluzione futura della falda freatica, si cerca ora di prevedere l'andamento dei principali fattori climatici che possano influire su di essa per poi concentrare ulteriormente l'attenzione sui prelievi idrici.

2.3.1 Gli aspetti climatologici futuri

Si analizza il rapporto dell'anno 2013 dell'Intergovernmental Panel on Climate Change, un gruppo internazionale di stima del cambiamento climatico che riordina e valuta le informazioni scientifiche e tecniche rilevanti per tale scopo.

Si considera una gran quantità di modelli appartenenti a vari progetti di identificazione dei cambiamenti climatici. Le previsioni vengono implementate a partire dai dati relativi al periodo di riferimento 1986-2005 e sono riguardanti periodi futuri altrettanto estesi. I risultati sono raggiunti a scala globale e particolarizzati a livello macroregionale (l'area mediterranea per esempio), ma utili informazioni riguardo una scala subregionale come quella indagata sono ottenibili grazie al livello di dettaglio raggiunto.

La temperatura media annua in superficie nell'Italia del Nord è stimata crescere di quasi 3°C entro la fine del secolo, seguendo così il trend verificatosi nello scorso secolo, così come le precipitazioni, che vengono stimate crescere nella maggior parte delle latitudini corrispondenti all'area di studio, non subiscono un aumento medio annuo: si stima sì nella stagione invernale un aumento del 10% circa delle precipitazioni, ma l'opposto nelle restanti stagioni; la primavera non vedrà eccessivi cambiamenti nel breve termine (il periodo di riferimento per IPCC è il ventennio 2046-2065), mentre diminuiranno le precipitazioni nel lungo termine fino al 10%. La stagione estiva subirà la maggiore riduzione di piogge con un decadimento anche del 30% nel prossimo secolo, così come in autunno si avrà un deciso calo (nel lungo periodo fino al 20%). Lo stesso IPCC esprime la probabilità che queste previsioni sottostimino la portata dei cambiamenti piuttosto che prevedere il caso peggiore 'a favore di sicurezza'.

Si nota come si prevede un andamento alquanto uniforme per il bacino mediterraneo, in contrasto con le latitudini equivalenti, mentre nello scorso secolo la diminuzione di precipitazione nell'area milanese non era così concorde col bacino di riferimento.

Si riconosce uno stretto rapporto tra temperatura media e precipitazioni: in generale a scala globale all'aumentare dell'una aumentano le altre, mentre nel bacino mediterraneo si stima che ad ogni grado di riscaldamento della temperatura media corrisponderà una diminuzione delle precipitazioni, fino al 3%.

Altri fattori climatici possono essere studiati:

- l'umidità relativa in superficie (che ha un notevole effetto sulle precipitazioni) nello scenario peggiore scende di qualche punto percentuale come media annua rispetto al periodo di riferimento 1986-2005, con picchi previsti fino a -7% in estate (la stagione con la maggiore diminuzione di precipitazioni)
- l'umidità del suolo nei 10 cm di terreno più superficiali è stimata ridursi notevolmente, quasi 2 mm, ossia il valore massimo per le valutazioni effettuate da IPCC e la regione più colpita sarà propria quella mediterranea; si attribuisce questo trend negativo all'allargamento dell'influenza della circolazione della Cella di Hadley, che può avere come conseguenza anche l'inibizione delle precipitazioni (effettivamente prevista nella fascia mediterranea); inoltre si stima questa diminuzione con alta confidenza, con la stessa probabilità con cui si prevede il riscaldamento a livello globale
- il runoff medio annuo viene valutato decrescere in modo consistente causa ancora i cambiamenti nella circolazione di Hadley in relazione con la riduzione delle piogge e un aumento di evapotraspirazione indotto dal riscaldamento; la diminuzione si attesta intorno ai 2 mm al giorno, sebbene per il bacino mediterraneo modelli climatici regionali hanno dimostrato che il runoff comincerà il trend negativo solo dopo il 2050 (Sanchez-Gomez & Somot, 2009)
- l'evaporazione va incontro a un leggero trend positivo dagli effetti però trascurabili: se a scala globale l'andamento dell'evaporazione rispecchia quello delle precipitazioni (il bacino mediterraneo per esempio vede la diminuzione di entrambi i fattori), l'area continentale del Nord Italia si differenzia ancora dal bacino di riferimento.

Si trovano decise conferme nell'andamento dei fattori principali nell'area: utilizzando dati dell'IPCC per il periodo di riferimento 1971-1990, si sono raggiunte delle previsioni di trend (mediati sui risultati di vari modelli) assai concordi con l'IPCC: per l'orizzonte temporale del 2050 si stimano un aumento di temperatura media di 2°C per l'area milanese e una non sensibile variazione delle precipitazioni (anche il rapporto dell'IPCC, 2013 non definisce una chiara diminuzione delle precipitazioni a breve termine, bensì a lungo termine) (Milano, Ruelland *et alii*, 2012); anche secondo Iglesias, Garrote *et alii* (2007) lo scenario per il periodo degli anni '50 del nostro secolo prevede un aumento di temperatura tra 1.5°C e 3.5°C con una riduzione di precipitazione che arriva al 20% con variabilità stagionale. Stesso risultato per Giorgi & Lionello (2008).

Si studiano ora variazioni previste nel trend generale di precipitazioni e temperature per il periodo 2071-2100 partendo dai dati del già citato trentennio di riferimento 1961-1990, sfruttando modelli di simulazione regionali (Coppola & Giorgi, 2009): si mostra in figura 31 che il riscaldamento ha una marcata stagionalità, che varia da 3°C in inverno al massimo dei 5°C in estate (calcolati come differenza tra valori proiettati e dati osservati nel trentennio di riferimento).

Capitolo 2: La piezometria nella città di Milano

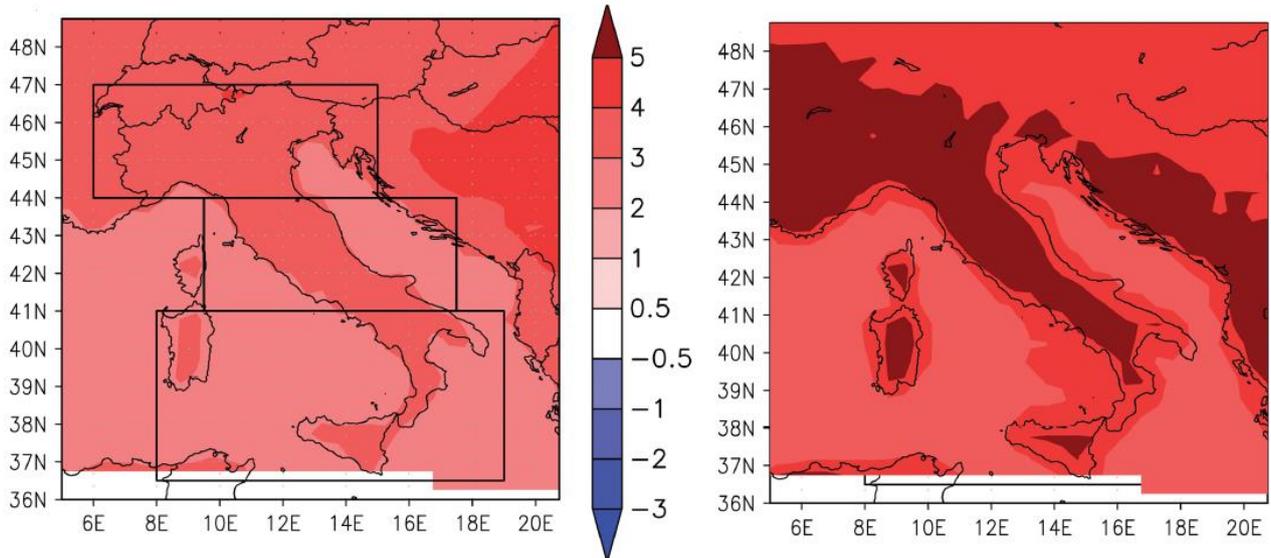


Figura 31 - Variazione di temperatura media in inverno (sx) e in estate (dx) (da "An assessment of temperature and precipitation change projections over Italy" di Coppola E. & Giorgi F.)

Il territorio milanese si prevede andare incontro ad una sostanziale riduzione delle precipitazioni in estate (fino al 40% in meno), mentre in inverno si assiste ad una leggera crescita (si sottolinea come in fase di valutazione delle capacità del modello nel confronto tra simulazioni di prova e dati osservati nel periodo di riferimento si sia notata una sottostima non trascurabile dei livelli di precipitazione nella stagione invernale) con una netta differenza di trend con la parte meridionale del paese (figura 32): si nota qui il vantaggio di analisi a scala dettagliata, con le quali i risultati delle simulazioni possono variare sensibilmente tra zone molto vicine, dettaglio non raggiunto per esempio dalle analisi dell'IPCC.

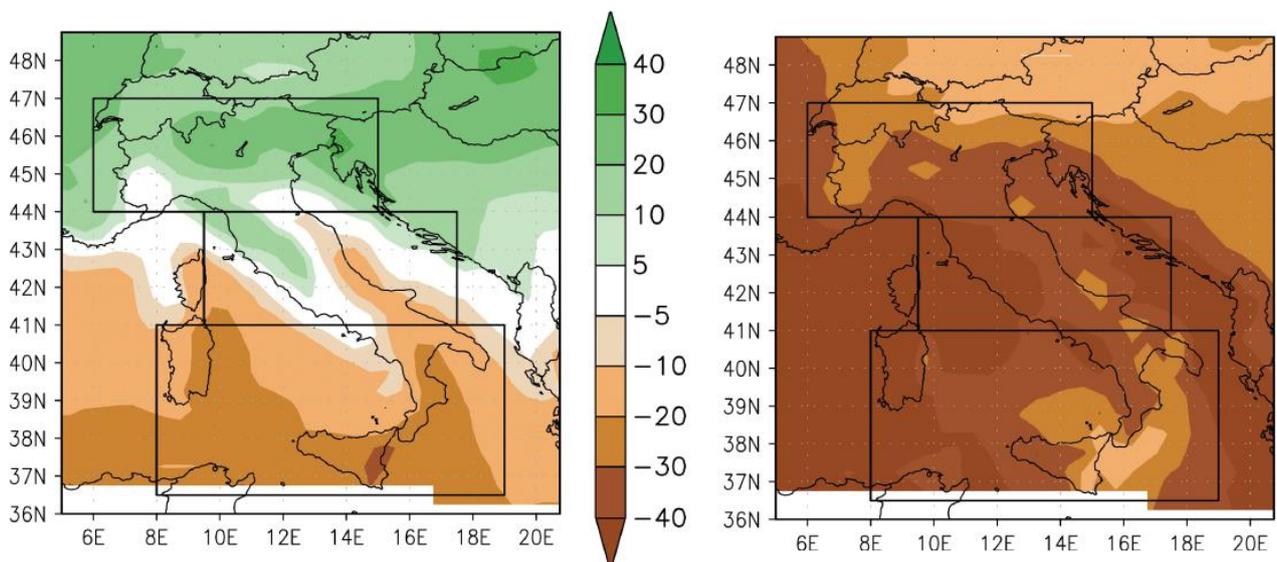


Figura 32 - Variazione di precipitazioni in inverno (sx) e in estate (dx) (da "An assessment of temperature and precipitation change projections over Italy" di Coppola E. & Giorgi F.)

Data la dipendenza dalla stagionalità, si mostrano i cambiamenti previsti per la macroregione dell'Italia del Nord:

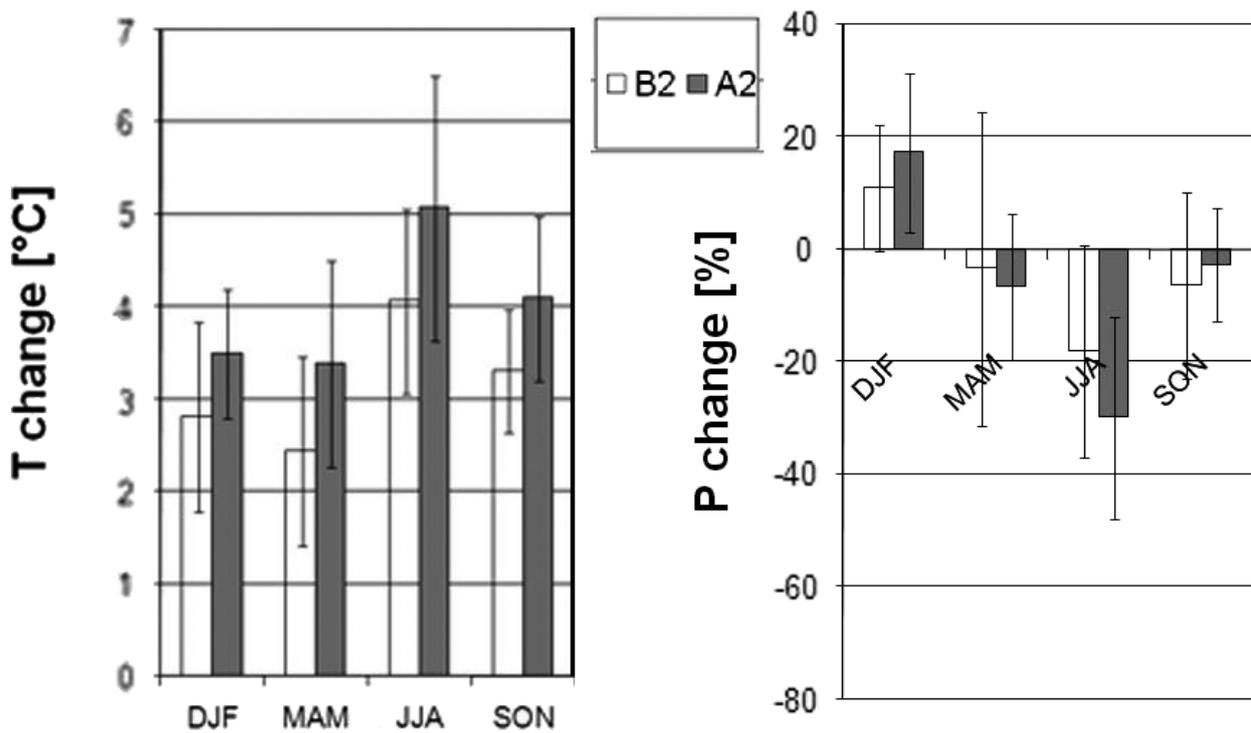


Figura 33 - Variazioni stagionali di temperatura media (sx) e precipitazioni (dx) per Nord Italia (da "An assessment of temperature and precipitation change projections over Italy" di Coppola E. & Giorgi F.)

In figura 33 compaiono le previsioni per due differenti scenari, con alta concentrazione di CO₂ (A2) o bassa concentrazione (B2): a peggior scenario corrispondono maggiori variazioni. Sono presenti anche le differenze tra i singoli modelli per una sola stagione misurate come standard deviation dei valori di cambiamenti tra i modelli, standard deviation che sono da considerare come indici di incertezza per le simulazioni. Indipendentemente dallo scenario, il segno e l'ordine di grandezza dei cambiamenti sono identici; per quelli climatici la standard deviation è molto minore del valore ottenuto, quindi le previsioni possono essere considerate molto robuste, invece manca tale robustezza per le precipitazioni.

Infine si presentano i cambiamenti stagionali relativi a tre periodi temporali nel nostro secolo nel Nord Italia (figura 34): nonostante l'utilizzo di un modello basato su dati generali a scala globale (GMC), i risultati per il periodo corrispondente ai casi precedenti sono pressoché identici se non nella proiezione delle precipitazioni invernali (molto inferiori).

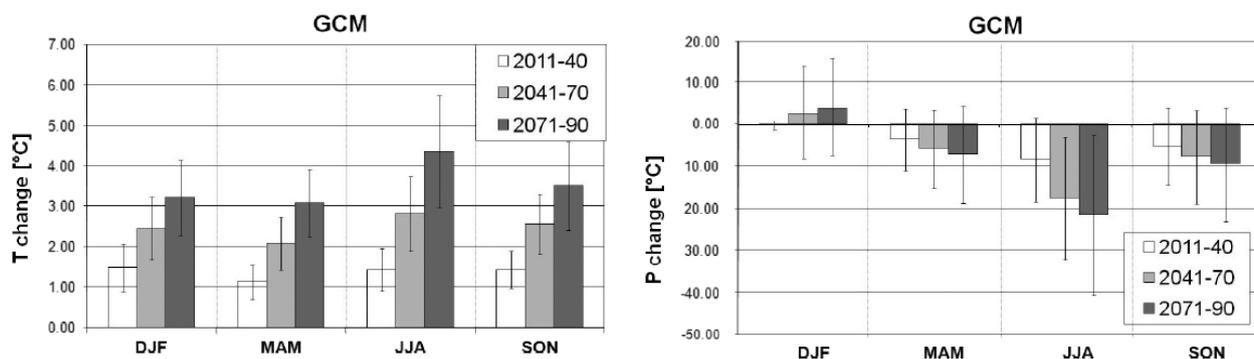


Figura 34 - Variazioni di temperature medie (sx) e precipitazioni (dx) per modello CMIP3 per Nord Italia (da "An assessment of temperature and precipitation change projections over Italy" di Coppola E. & Giorgi F.)

Per entrambi i fattori, aumentando l'orizzonte temporale, una crescita monotona nella magnitudo dei cambiamenti è visibile, in dipendenza sempre monotona dalla forzante GHG (greenhouse gas), una categoria di gas in atmosfera la cui evoluzione nel tempo definisce gli scenari di sviluppo (anche IPCC basa i suoi scenari su questo fattore).

Le previsioni sulle variazioni delle principali variabili sono di seguito sintetizzate in tabella 7:

	IPCC (2013) e altri (rif. 1986-2005)		Coppola & Giorgi (2009) (rif. 1961-1990)		
periodo	2050	2100	2100		
temperatura	2° C	3° C	inverno	3° C	
			primavera	3° C	
			estate	5° C	
			autunno	4° C	
precipitazioni	inverno	10%	10%	inverno	15%
	primavera	--	-10%	primavera	-10%
	estate	-10%	-30%	estate	-30%
	autunno	-10%	-20%	autunno	-10%

Tabella 7 - Previsioni a medio e lungo termine dei fattori climatologici di temperatura e precipitazioni

2.3.2 I prelievi idrici futuri

Si è già discusso di come i prelievi idrici per scopi pubblici o privati siano la principale componente ad indirizzare l'andamento del livello piezometrico e della loro decrescita annua del 3% con la proiezione dell'attuale situazione socioeconomica.

Una stima più particolareggiata può essere attuata considerando le previsioni non solo sulla popolazione, ma anche sulle aree irrigate e sulle richieste idriche future (Milano, Ruelland *et alii*, 2012): si studiano i prelievi idrici per fini d'irrigazione e per il settore domestico, includendo in esso l'acqua per uso civile, potabile e per le attività del settore terziario; non sono considerati i prelievi industriali: lo studio si applica infatti a tutto il bacino mediterraneo, dove rappresentano una minima quantità rispetto alla totalità dei prelievi, ma con la consapevolezza che in Italia il loro ammontare non è certo trascurabile (Margat, 2004, stima il nostro paese con i più alti valori di

prelievi industriali, pari a 14 km³ all'anno). Si ricorda che i prelievi dalle acque superficiali nell'area milanese è pressoché trascurabile, quindi l'andamento dei prelievi trovato riguarderà direttamente la groundwater disponibile per irrigazione e uso domestico.

Si trova la richiesta d'acqua unitaria a scala regionale come rapporto tra acqua estratta dal sistema più le risorse idriche 'non convenzionali' (acqua di scarto riutilizzata per scopi agricoli d'irrigazione) e l'area irrigata o la popolazione della regione a seconda dell'uso. Si moltiplica la richiesta idrica unitaria per l'area irrigata o la popolazione del bacino, si corregge con un indice di efficienza e si trova la richiesta d'acqua totale; infine si sottraggono le risorse non convenzionali e si raggiunge il valore netto dei prelievi idrici per ogni settore a livello di bacino.

Si tiene conto per l'orizzonte del 2050:

- aggiornare nel tempo il valore di richiesta idrica unitaria seguendo le variazioni del fabbisogno idrico nell'irrigazione
- le variazioni nel tempo dell'estensione delle aree irrigate
- una quantità mantenuta costante di colture irrigate
- l'indice di efficienza calcolato come rapporto tra indice attuale e quello da raggiungere come obiettivo (diminuzione delle perdite di rete e miglioramento delle tecniche d'irrigazione si stimano poter portare l'efficienza agricola al 72% e domestica al 80%)
- i trend di aree irrigate e efficienza sono considerati a livello nazionale (l'Italia ha abbassato gli obiettivi di efficienza in accordo con una stima di fattibilità)
- il trend futuro della popolazione è estratto dallo scenario socioeconomico delle Nazioni Unite (UNPD, 2001).

Le previsioni nell'area d'interesse sono in netto disaccordo col resto del bacino mediterraneo: le aree irrigate sono previste decrescere del 18%, così come il trend di diminuzione della popolazione continua nettamente; la disponibilità di acqua superficiale non subirà variazioni significative, mentre i prelievi idrici totali (i quali vengono sfruttati nel Nord Italia più che in ogni altro bacino del Mediterraneo) sono destinati a scendere del 20%, principalmente a causa del calo dei prelievi domestici di uso civile. Questo trend, seppur di decisa diminuzione, è più contenuto rispetto al risultato di Francani *et alii* (2012), in cui la situazione economica d'inizio secolo (la peggiore del Dopoguerra) ipotizzata proseguire nel medio termine può avere portato alla sovrastima nella caduta dei prelievi totali (qui sotto riportati in figura 35).

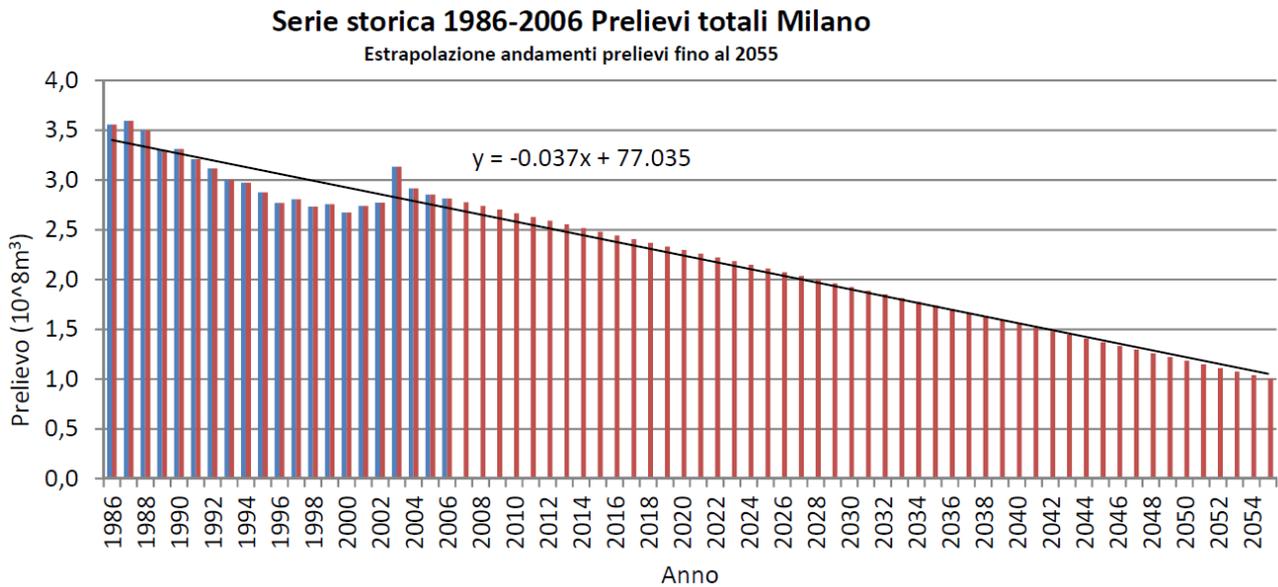


Figura 35 - Stima dei prelievi futuri (da "Metodi di previsione della piezometria nell'area milanese" di Francani V. et alii)

I fattori che più influenzano le variazioni di prelievi idrici e le previsioni sugli stessi prelievi sono riportate di seguito (tabella 8):

	Milano et alii (2012)	Francani (2012)
periodo	2050	
aree irrigate	-18%	
popolazione	-20%	
prelievi idrici	-20%	-60%

Tabella 8 - Previsione a medio termine dei fattori antropici e socio-economici

Strettamente correlato ai prelievi d'acqua è lo stress idrico, un indice che descrive il rapporto tra la totalità dei prelievi idrici sulla disponibilità d'acqua, utilizzato per esprimere l'intensità della pressione antropogenica sulle risorse disponibili. Se si considerano solo gli effetti climatici, il bacino dell'area milanese dovrebbe mantenersi sui medesimi livelli di stress idrico, ossia una situazione di media preoccupazione; se al contrario si modificano gli effetti antropogenici (i prelievi d'acqua), la prevista diminuzione dello sfruttamento della risorsa sotterranea dovrebbe portare l'area di studio da una situazione di medio stress ad uno stress basso. Considerando in conclusione entrambi gli effetti, climatico e antropico, l'attuale situazione di stress dovrebbe mantenersi costante grazie alla diminuzione dei residenti, delle aree irrigue e all'efficienza aumentata. Va ricordata l'assenza dei prelievi industriali che rientrerebbe nelle cause antropogeniche di modifica del water stress: sicuramente la pressione umana sulla risorsa sarebbe maggiore, ma tale da non procurare un peggioramento verso una condizione di stress alto.

Considerando che l'attuale stato di stress idrico è considerato di medio livello (20%-40%), gli effetti elencati portano pressoché nulle variazioni nell'orizzonte temporale del 2050 (tabella 9):

	effetti climatici	effetti antropogenici	entrambi effetti
stress idrico	20%-40%	10%-20%	20%-40%

Tabella 9 - Stress idrico in funzione degli effetti climatici e antropogenici

Si pone l'attenzione infine ad un particolare che per il bacino milanese può avere grande importanza: gli effetti dello scioglimento nivale, in particolare l'anticipazione dello scioglimento nel tempo (conseguenza diretta del surriscaldamento globale), non sono considerati in nessuna previsione, nonostante sia chiara l'influenza sullo stress idrico nei bacini con presenza montuosa: una maggiore disponibilità di risorsa idrica per i prelievi renderebbe l'indice di stress idrico meno severo; l'area milanese risente della presenza alpina a monte, quindi lo scioglimento nivale aumentato porterebbe ad un input ulteriore nel bilancio idrogeologico dell'area non controbilanciato dai prelievi previsti crollare, potendo influire (seppur in minima parte) all'ormai costante innalzamento del livello delle acque sotterranee.

Capitolo 3: L'implementazione e la simulazione del modello di flusso

3.1 Fasi di implementazione del modello

L'implementazione di un modello di flusso è così articolata:

1. definizione dell'obiettivo
2. realizzazione del modello concettuale
3. scelta del codice di calcolo
4. implementazione del modello concettuale nel codice di calcolo
5. calibrazione e simulazione del modello
6. validazione
7. applicazione del modello

1 Definizione dell'obiettivo

Si definisce come obiettivo dell'implementazione del modello lo studio dell'influenza delle strutture sotterranee, in particolare della metropolitana milanese, sul flusso idrico dell'acquifero e l'identificazione delle condizioni di presenza idrica per le infrastrutture metropolitane.

2 Realizzazione del modello concettuale

Si realizza il modello concettuale, ossia la schematizzazione del sito, che consente di rappresentare il reale sistema di flusso e trasporto in modo semplificato ma efficace; per una descrizione puntuale e di qualità, è necessario disporre di una grande quantità di dati ed elaborarli appropriatamente per realizzare un modello dettagliato dal punto di vista idrogeologico e strutturale (stratigrafie, sezioni geologiche, caratteristiche litologiche e valori di permeabilità), da quello dinamico naturale (precipitazioni, ricarica, temperature) e da quello antropico (pozzi di pompaggio o estrazione, prelievi vari).

Si sfruttano i dati derivanti dai già citati studi di Regione Lombardia & Eni (2002) e dai sondaggi del Progetto CARG per l'individuazione delle caratteristiche geologiche e stratigrafiche, le elaborazioni cartografiche eseguite con Surfer per la struttura, posizione e spessore degli acquiferi e le note prove di permeabilità per la definizione dei valori di conducibilità idraulica; per i fattori climatici si usufruisce dei dati delle principali stazioni meteorologiche del territorio milanese.

Tra le indagini a disposizione si hanno anche prove penetrometriche dinamiche SPT (Standard Penetration Test), perlopiù realizzate con punta conica a diverse profondità e a differenti intervalli di penetrazione tra un sito e un altro, e 150 prove DPSH (dynamic penetrometer super heavy), con individuazione dei colpi d'avanzamento ogni 30 centimetri.

3 Scelta del codice di calcolo

Per studiare l'influenza reciproca tra livello piezometrico e infrastrutture sotterranee metropolitane dell'area di studio, si sceglie di utilizzare come software di riferimento Groundwater

Vistas (versione 6), programma per la modellazione del flusso delle acque sotterranee anche in 3D e del trasporto dei contaminanti nel sottosuolo, con possibilità di calibrazione e ottimizzazione della soluzione tramite analisi di sensitività.

In esso è possibile creare un modello che riproduce l'area d'interesse e le caratteristiche geomorfologiche del sottosuolo, con relativo inserimento dei parametri descrittivi le peculiarità fisico-chimiche (permeabilità, ricarica d'acqua etc) fondamentali per una corretta simulazione del flusso d'acqua nel sottosuolo e dei contaminanti ivi trasportati.

Si specifica che per la simulazione del flusso idrico sotterraneo si utilizza il codice di calcolo 'MODFLOW'; si riporta in Appendice A una descrizione dei concetti chiave alla base del flusso d'acqua nei terreni, le sue equazioni governanti e come queste sono implementate in MODFLOW.

4 Implementazione del modello concettuale nel codice di calcolo

A seconda del livello di precisione desiderato si procede con la scelta della discretizzazione orizzontale e verticale del modello, le eventuali condizioni iniziali da cui partire, le proprietà del modello (permeabilità, ricarica etc) e le condizioni al contorno (una loro descrizione particolareggiata è sviluppata al paragrafo 3.2 e 3.3). Si specifica che sono sviluppati due diversi modelli: il primo per lo studio del flusso senza l'inserimento delle condizioni derivanti dalla presenza delle infrastrutture sotterranee metropolitane, il secondo, più raffinato, che considera anche le linee metropolitane e relative proprietà influenzanti l'acquifero.

5 Calibrazione e simulazione del modello

Implementato il modello, si effettua la simulazione, i cui risultati sono confrontati con valori valutati in campo, i targets di calibrazione, con l'obiettivo di verificare l'efficacia del modello concettuale sviluppato. Residui e valutazioni statistiche post-calibrazione sono presentati al paragrafo 3.4, così come i risultati della simulazione e relative analisi al paragrafo 3.5.

6 Validazione

La validazione porta a confermare l'affidabilità del modello, che deve dare risultati adeguati anche con condizioni diverse da quelle della fase di calibrazione, ossia continuare a rispecchiare i dati reali dei targets. Si è validato il modello grazie ai sondaggi piezometrici nei targets noti svolti nel Marzo 2015 e nel Febbraio 2016.

7 Applicazione del modello

Sfruttare il modello anche per scenari futuri di andamento del flusso idrico sotterraneo in dipendenza di variate condizioni al contorno (le previste variazioni socio-economiche che portano ad un diverso sfruttamento della risorsa idrica o la variazione delle precipitazioni e l'aumento della temperatura causa cambiamento climatico).

3.2 L'implementazione del codice di calcolo

Per la definizione della grandezza spaziale del dominio si considerano la posizione e lo sviluppo planimetrico delle linee metropolitane; si conclude che risulterebbe eccessivo modellizzare l'intera estensione geografica considerata nella costruzione delle sezioni geologiche. Si sceglie di ridurre il dominio di studio ad un'area rettangolare che escluda il tratto terminale della linea verde in direzione E e gli eventuali prolungamenti futuri della tratta fino a Vimercate per la linea verde e della tratta della linea gialla progettata per raggiungere Paullo; il dominio è così esteso (tabella 10):

Limite	Comune	Coor. Monte Mario		Coord. WGS84	
		Est	Nord	Longitudine	Latitudine
Superiore sinistro	Lainate	1503880	5045342	9°2'57,696"	45°33'41,126"
Superiore destro	Brugherio	1523870	5045342	9°18'19,792"	45°33'39,697"
Inferiore sinistro	Gaggiano	1503880	5027360	9°2'57,192"	45°23'58,445"
Inferiore destro	S. Giuliano Milanese	1523870	5027360	9°18'16,653"	45°23'57,023"

Tabella 10 - Limiti geografici del dominio di studio

Per entrambi i modelli si costruisce una griglia composta da celle quadrate con spaziatura in direzione E-O Δx pari alla spaziatura in direzione N-S Δy corrispondente a 25 metri per una suddivisione in 720 righe e 800 colonne, per un totale di 57600 celle coprenti un'area di 360 km².

Il dominio viene suddiviso verticalmente in tre layers, ognuno corrispondente ad uno strato acquifero: il primo layer parte dal piano campagna e coincide in estensione verticale con l'acquifero A, il secondo con l'aquitard e l'ultimo con l'acquifero B. Si sfruttano qui le sopra descritte elaborazioni mappali tramite Surfer, che hanno fornito l'andamento del piano campagna, della base dell'acquifero A, dell'aquitard e della base dell'acquifero B. Il dominio che ne risulta è perciò regolare in sezione orizzontale, mentre assai irregolare in direzione verticale: la spaziatura in questa direzione Δz è infatti variabile per ogni cella e per ogni layer.

Si assegnano di conseguenza i valori delle proprietà *'bottom elevation'* e *'top elevation'*, attraverso la definizione matriciale delle quote sul livello del mare riguardanti la parte inferiore (bottom) e la parte superiore (top) di ogni cella per ciascun layer.

Si ottengono i seguenti andamenti delle quote *'top elevation'* (con relativa sezione trasversale) e *'bottom elevation'* (figura 36 e figura 38).

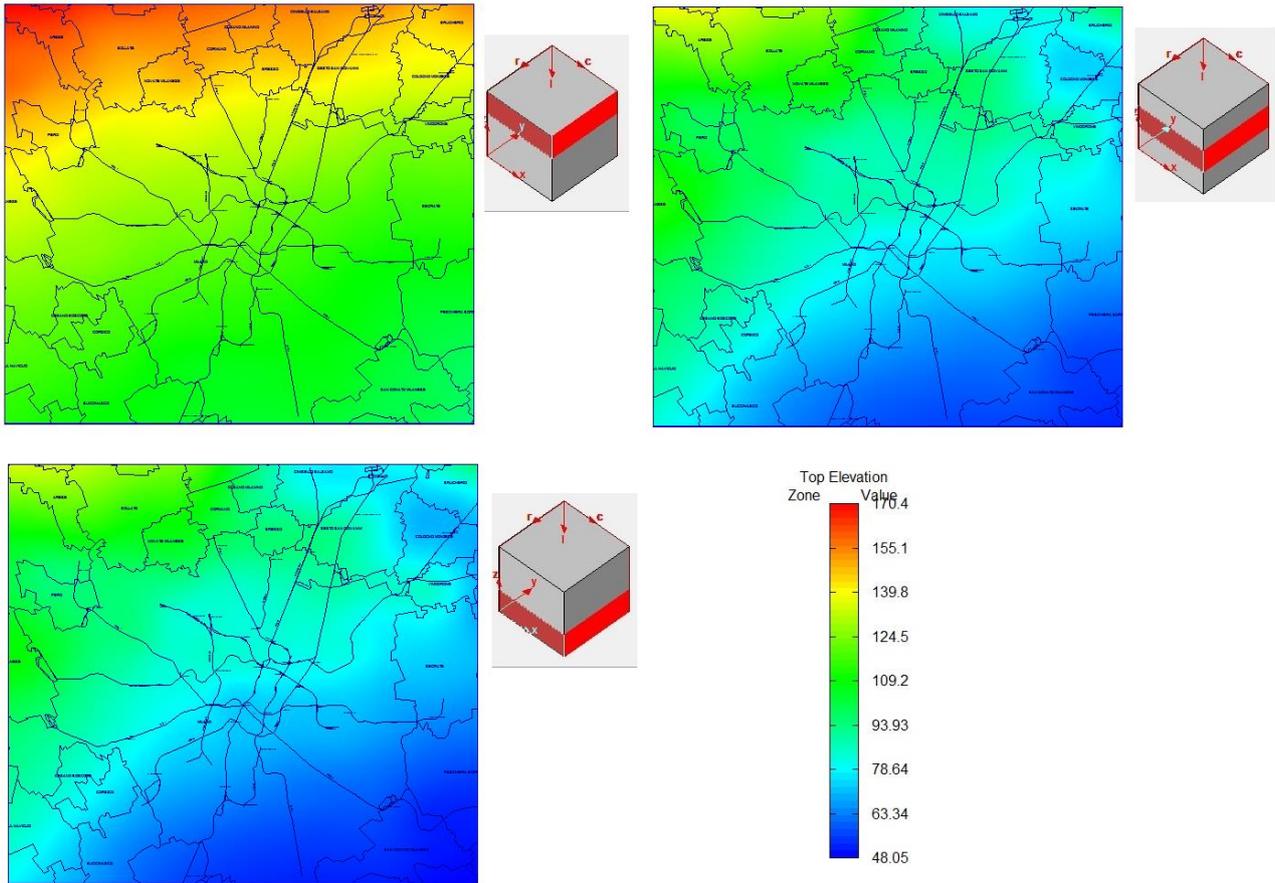


Figura 36 - Sviluppo planimetrico della quota sommitale delle celle per ogni layer del modello

A titolo esemplificativo si mostra una sezione trasversale del dominio da Nord a Sud in figura 37 (si specifica che data la variabilità spaziale dei parametri morfologici e strutturali degli acquiferi la sezione trasversale non è costante nel dominio, ma varia continuamente):

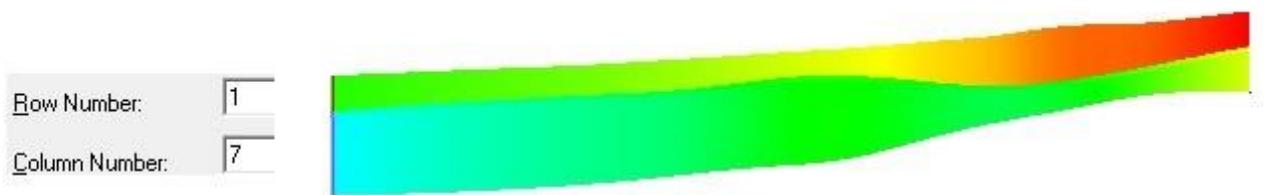


Figura 37 - Sezione trasversale del dominio

Si nota in figura 37 l'irregolarità delle basi degli acquiferi, il limitato spessore dell'aquitard del layer 2 e la concordanza cromatica con le viste planari della 'top elevation': essendo righe e colonne numerate dall'angolo superiore sinistro, la sezione in figura 37 è posta in posizione occidentale nel modello, dove si hanno le maggiori quote del piano campagna (in rosso) e dove il tetto del secondo acquifero non raggiunge profondità elevate (in azzurro).

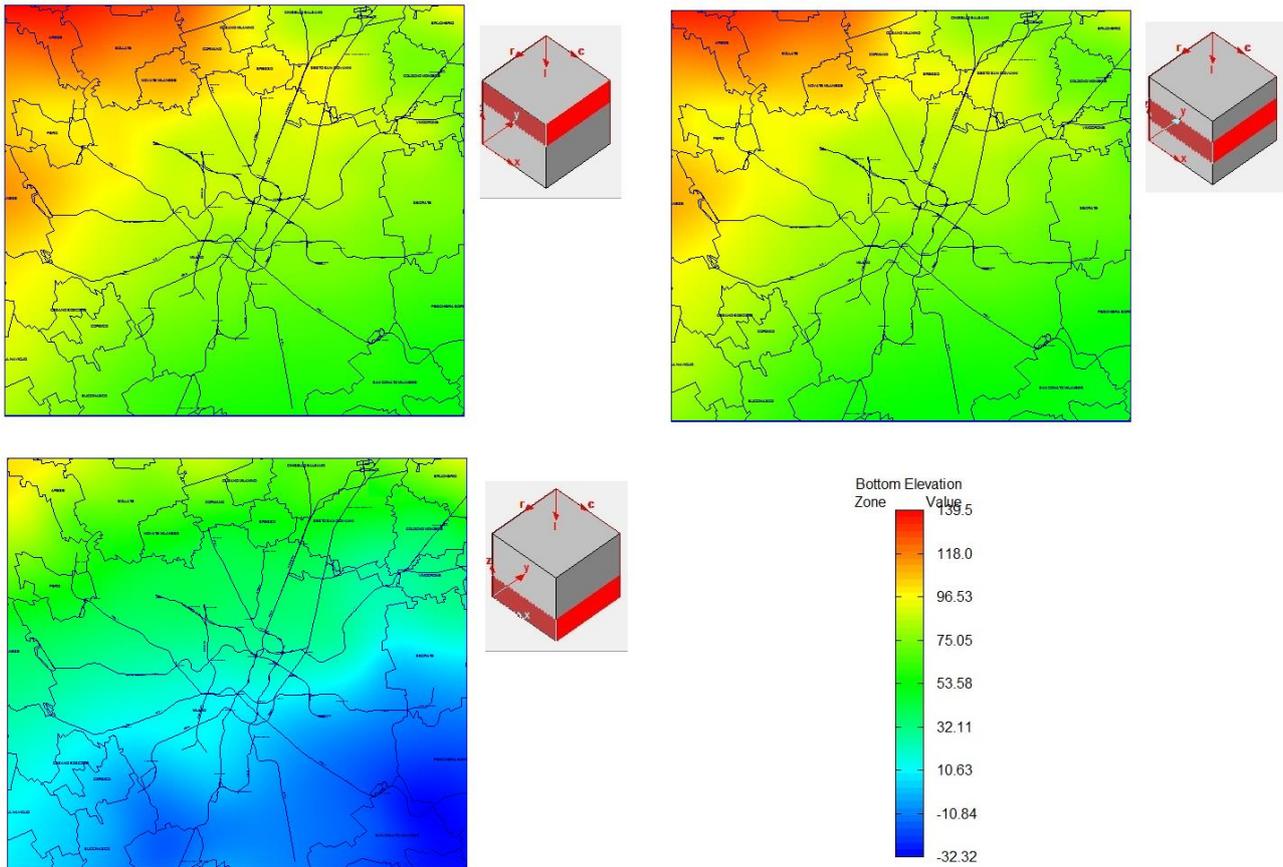


Figura 38 - Sviluppo planimetrico della quota basale delle celle per ogni layer del modello

Implementato il dominio, si inseriscono le condizioni al contorno: si mettono dei valori noti di livello piezometrico sul contorno del dominio ('constant head', rappresentanti condizioni al contorno di tipo di Dirichlet) ricavabili dalla carta piezometrica regionale del 2014; tutte le celle del bordo esterno del dominio vengono imposte ad un valore piezometrico che da piezometria più recente risulta avere maggiore gradiente decrescente lungo i contorni diretti N-S piuttosto che lungo quelli E-O (il confine inferiore ha condizioni variabili solo di una ventina di metri data l'influenza della depressione piezometrica che abbassa fortemente il gradiente).

Per il layer 1 si impostano le seguenti constant head:

- contorno superiore: CH variabili comprese tra 162.9 m e 134 m
- contorno destro: CH variabili comprese tra 134 m e 89.1 m
- contorno sinistro: CH variabili comprese tra 162.9 m e 108.6 m
- contorno inferiore: CH variabili comprese tra 108.6 m e 89.1 m.

Come detto si hanno a disposizione inoltre prove di permeabilità del suolo, dalle quali si ricavano valori di riferimento che vengono interpolati su tutto il dominio per caratterizzare i tre livelli acquiferi: sotto l'ipotesi di isotropia in direzione planare x-y, si hanno dei valori di permeabilità orizzontale in direzione x k_x equivalenti a quelli in direzione y k_y , mentre la permeabilità verticale k_z è in generale un ordine di grandezza inferiore. I valori inizialmente inseriti sono poi variati in

fase di calibrazione del modello, poiché la permeabilità rappresenterà il parametro che più influenza il risultato della simulazione (si specifica che essendo un caso isotropo ad una variazione della permeabilità orizzontale lungo la coordinata x è fatta corrispondere una uguale variazione della componente lungo y). I valori riportati nella tabella 11 sono quelli ricavati dalla fase di calibrazione e saranno utilizzati come valori di partenza per le successive simulazioni:

Kx [m/s]	Ky [m/s]	Kz [m/s]	Colore
0,0017	0,0017	0,0001	
0,0026	0,0026	0,0002	
0,0042	0,0042	0,0003	
$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1.5 \cdot 10^{-8}$	
$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$1.5 \cdot 10^{-7}$	
$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$	
$4.7 \cdot 10^{-5}$	$4.7 \cdot 10^{-5}$	$4.7 \cdot 10^{-6}$	
$7.8 \cdot 10^{-5}$	$7.8 \cdot 10^{-5}$	$7.8 \cdot 10^{-6}$	
0,0004	0,0004	$4 \cdot 10^{-5}$	

Tabella 11 - Valori di permeabilità idraulica conseguenti a calibrazione del modello

Si riporta in figura 39 la distribuzione della permeabilità per i tre acquiferi.

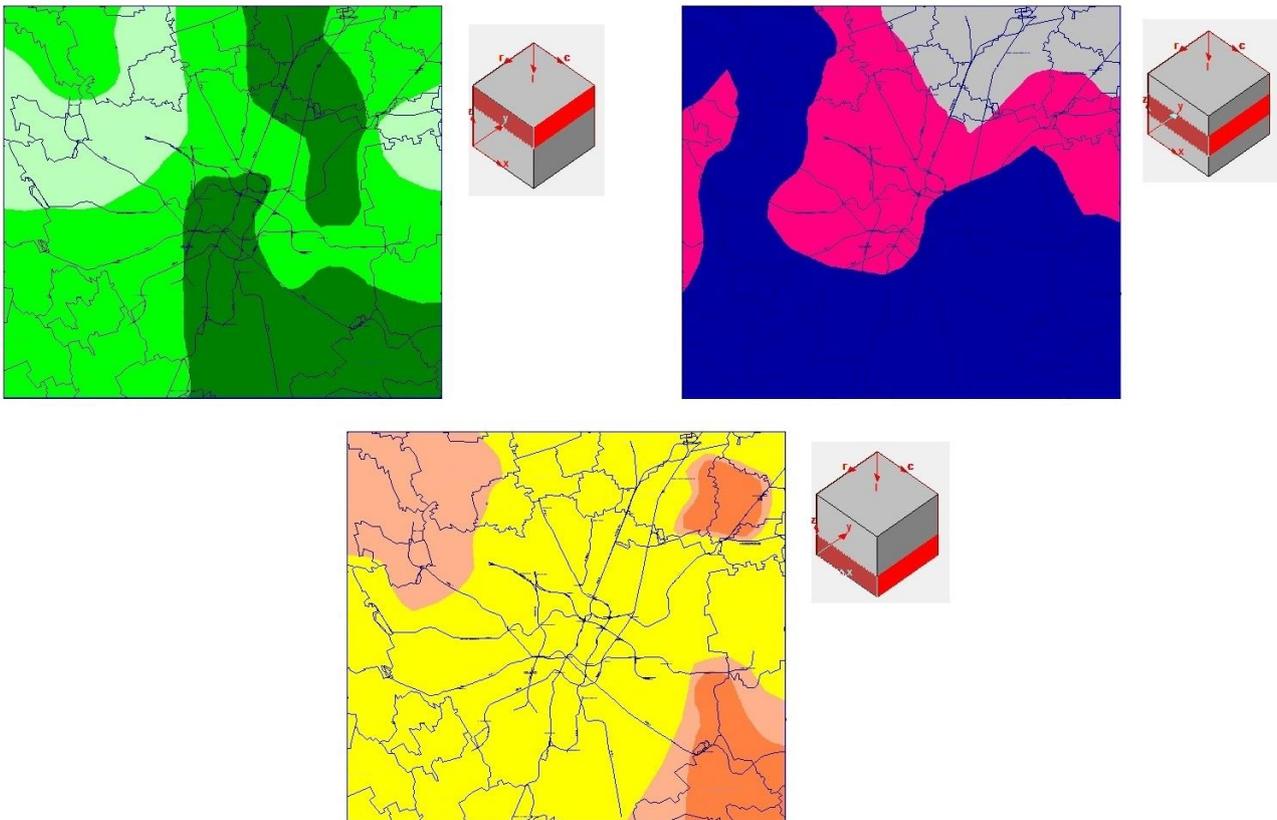


Figura 39 - Distribuzione spaziale della permeabilità nei tre layer del modello

Il terreno ospitante l'acquifero superficiale presenta dei valori di permeabilità intorno a 10^{-3} m/s, nell'aquitard questi valori scendono a circa 10^{-7} m/s, infine nello strato corrispondente all'acquifero B i valori risalgono ma risultano inferiori rispetto alla zona affiorante poiché, come noto dallo studio delle litozone, aumentando la profondità aumenta la presenza sabbiosa già all'interno della prima litozona ghiaioso-sabbiosa: essi si attestano intorno ai 10^{-5} - 10^{-6} m/s.

Questo buon livello di dettaglio nella descrizione della variabilità spaziale della proprietà idrogeologica può essere maggiormente utile in un mezzo eterogeneo, in particolare modo per lo studio del trasporto di contaminanti, per di più in un modello a livello subregionale dove la differenza tra conducibilità idraulica orizzontale e verticale influenza fortemente il risultato della modellazione (Zheng *et alii*, 2003).

Si definisce ora un'ulteriore proprietà del modello, la ricarica superficiale: il recharge in ambito urbano è fortemente modificato rispetto a situazioni naturali indisturbate e risulta essere il parametro più complicato da stimare nel bilancio idrico dell'acquifero; la diretta infiltrazione è decisamente ridotta in contesti urbani data l'impermeabilità della maggior parte delle aree cittadine, ma allo stesso tempo avviene una radicale decrescita dell'evapotraspirazione con aumento di acqua disponibile nel suolo. In città nuove fonti di ricarica sono presenti, come i sistemi di fornitura idrica e i collettori fognari. Nel caso di studio si è considerato un valore di ricarica dipendente da:

- precipitazioni, secondo valori di riferimento del Marzo 2014, le quali danno un contributo calcolato con la metodologia di Thornthwaite attorno ai 30 cm annui
- irrigazioni, solo nella zona meridionale dell'area, con un contributo pari a 35 cm/anno
- perdite da sistemi di fornitura idrica, quantificate dalle autorità di gestione in 5 cm annui e 5 mm annui rispettivamente per la zona Nord e per la zona centrale.

Per semplicità si è assunto che nella zona coincidente con il comune di Milano, data l'intensa urbanizzazione e la conseguente assenza di possibilità di infiltrazione d'acqua nel sottosuolo (con le sole perdite dei servizi idrici a contribuire), si abbia un valore di recharge nettamente inferiore all'area dell'hinterland (figura 40), sapendo però che tale netta distinzione non può avere chiaro riscontro fisico. I valori assegnati per ogni zona del dominio sono riportati in tabella 12:

Recharge [m/s]	Colore
$6.3 \cdot 10^{-8}$	Ciano
$2.5 \cdot 10^{-10}$	Rosso
$3.5 \cdot 10^{-8}$	Grigio

Tabella 12 - Valori di recharge applicati alle tre zone del dominio di studio

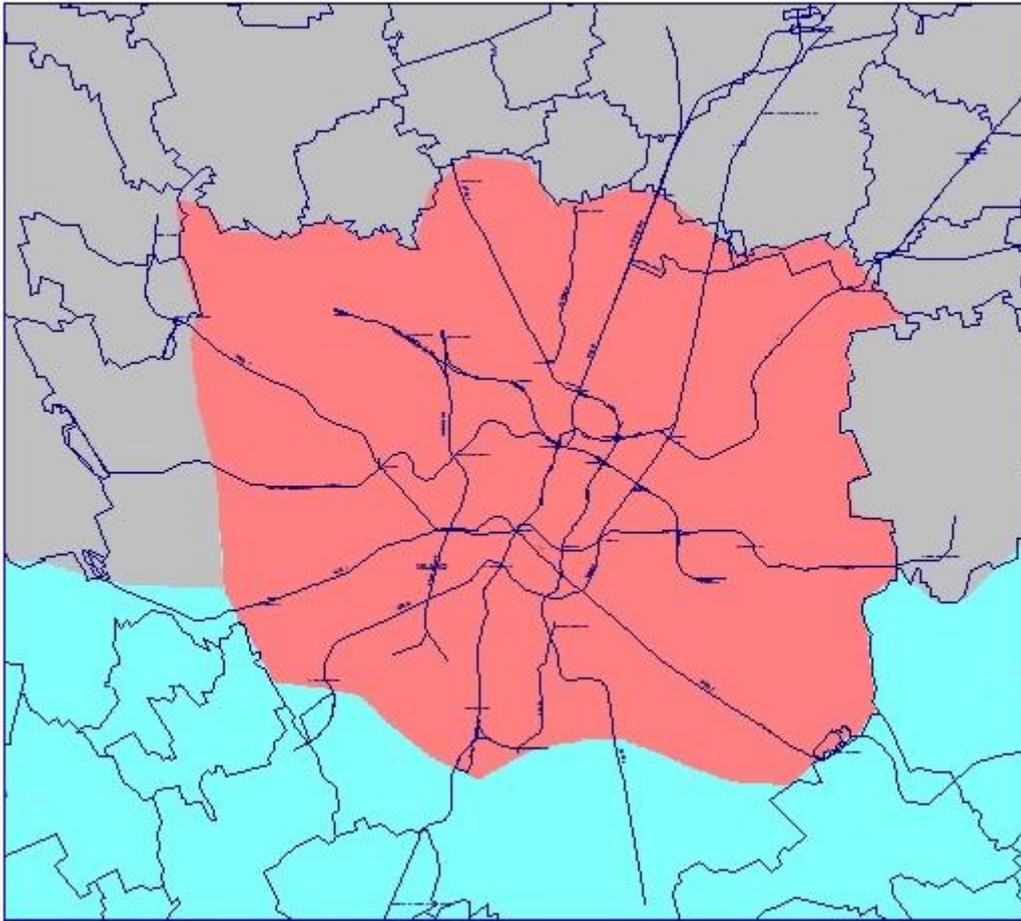


Figura 40 - Distribuzione spaziale della ricarica

Nella zona meridionale la ricarica è lievemente superiore per il leggero cambiamento di uso del suolo andando verso S, dove si ritrovano più aree forestali o adibite all'agricoltura rispetto alla zona settentrionale, in cui la presenza urbanistica e le attività industriali sono più presenti.

Infine si inseriscono proprietà costanti su tutto il dominio come il coefficiente di immagazzinamento specifico del materiale poroso (*specific storage*), ossia il volume d'acqua che può essere trattenuto per unità di volume del materiale per unità di variazione del livello piezometrico, $S_s=0.01 \text{ m}^{-1}$; lo *specific yield*, il volume d'acqua che l'acquifero rilascia per unità d'area per unità di variazione della piezometria, $S_y=0.01$; la porosità, definita come rapporto tra volume dei vuoti e volume totale del mezzo, $\Phi=0.25$. Non si considera invece l'evapotraspirazione, per motivi legati ancora una volta alla forte urbanizzazione dell'area di studio.

Nell'area di studio sono presenti numerosi pozzi in attività: sempre le indagini in ottica progetto CARG danno informazioni su ubicazione e utilizzo (schede tecniche e stratigrafie per ogni singolo pozzo sono inoltre disponibili grazie all'archivio dati del SIA, Sistema Informativo Ambientale della provincia di Milano). Sia in caso di pompaggio che di immissione, l'acqua trattata da queste strutture va a modificare la presenza nell'acquifero, quindi i pozzi sono inseriti nel modello come elementi analitici e ad essi si associa un valore di portata emunta costante per tutto il periodo della simulazione (valore che per assunzione è indipendente dall'area della cella e dal livello piezometrico presente nella cella). Nel caso di studio i pozzi sono o di pompaggio, quindi con

valore di portata negativo per il codice di calcolo, o hanno portata nulla; in particolare la somma delle portate emunte dall'acquifero superficiale ammonta a $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$, ossia $77 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ annui, mentre l'acquifero B è più sfruttato con una portata emunta pari a $8.7 \text{ m}^3/\text{s}$, ossia $276 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ annui per un totale di circa $353 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$, volume che mostra la netta e costante diminuzione dei prelievi rispetto al passato recente, per il quale a inizio anni '90 il prelievo totale era di $800 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$ (Francani, 2005). Il singolo prelievo più ingente avviene dall'acquifero profondo con una portata pari a $0.26 \text{ m}^3/\text{s}$, ossia $8.2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ annui, mentre dal primo acquifero la massima portata estratta dal singolo pozzo è di $0,047 \text{ m}^3/\text{s}$, ossia $1.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ annui; il maggior numero di emungimenti si attesta però attorno al valore di $10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, ossia circa $3 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ annui.

A fini di calibrazione dei risultati, sono anche utili dei pozzi che non vengono sfruttati all'interno del modello dal punto di vista della portata ma come targets: in essi grazie ai monitoraggi a disposizione sono svolte delle misurazioni di altezza di falda e ci si propone di raggiungere tramite la simulazione del modello un valore di livello piezometrico in quel punto il più coincidente possibile a quello che si ha nella realtà.

Di seguito in figura 41 si distinguono pozzi (colore blu) e target (colore rosso) per profondità raggiunta, ossia per livello acquifero penetrato. Si nota come il terzo layer, ossia l'acquifero B, sia il più raggiunto dai pozzi.

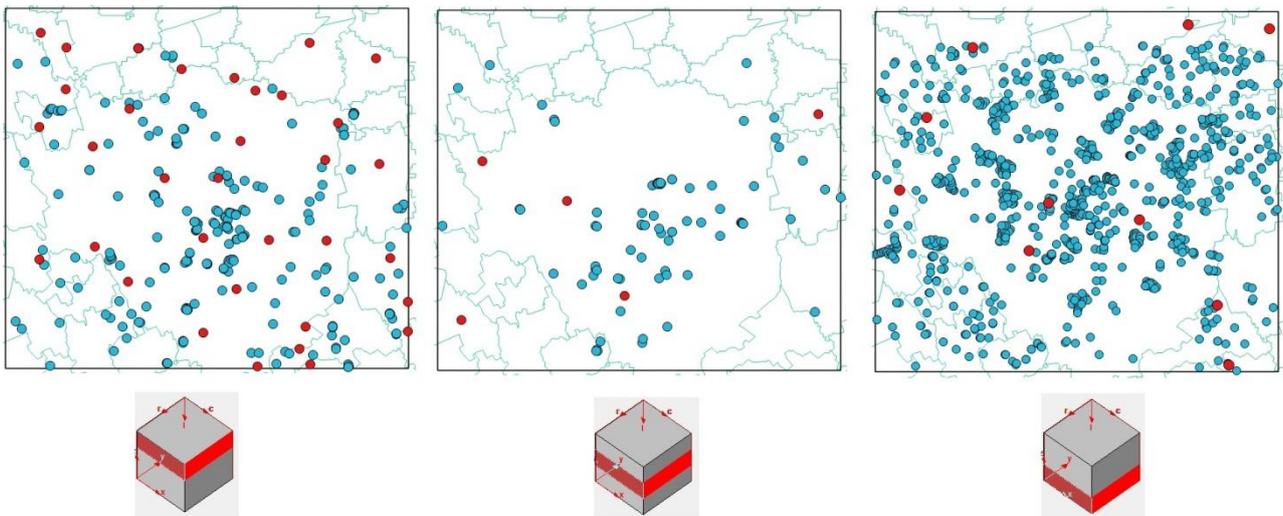


Figura 41 - Pozzi (in blu) e targets (in rosso) per ogni layer del modello

3.3 L'inserimento delle strutture metropolitane

Il modello sopra descritto viene utilizzato come punto di partenza per il modello comprendente le linee metropolitane (si considera anche il passante ferroviario Bovisa-Vittoria che viaggia nel sottosuolo tra le stazioni di Lancetti e Vittoria): il loro sviluppo planimetrico è disponibile in un file di CAD grazie al quale si ottiene una mappa generale della rete dei trasporti considerata. Il profilo sulla verticale è anch'esso noto grazie ancora a file di CAD: in essi si nota l'andamento fortemente irregolare della base delle gallerie. Si riporta in figura 42 una porzione del profilo schematico della metro 1, il tratto centrale da Porta Venezia alla stazione bivio di Pagano: essendo la prima linea

eseguita, è molto superficiale e risulta pressoché totalmente sopra il livello piezometrico di prima falda (indicato con la linea azzurra).

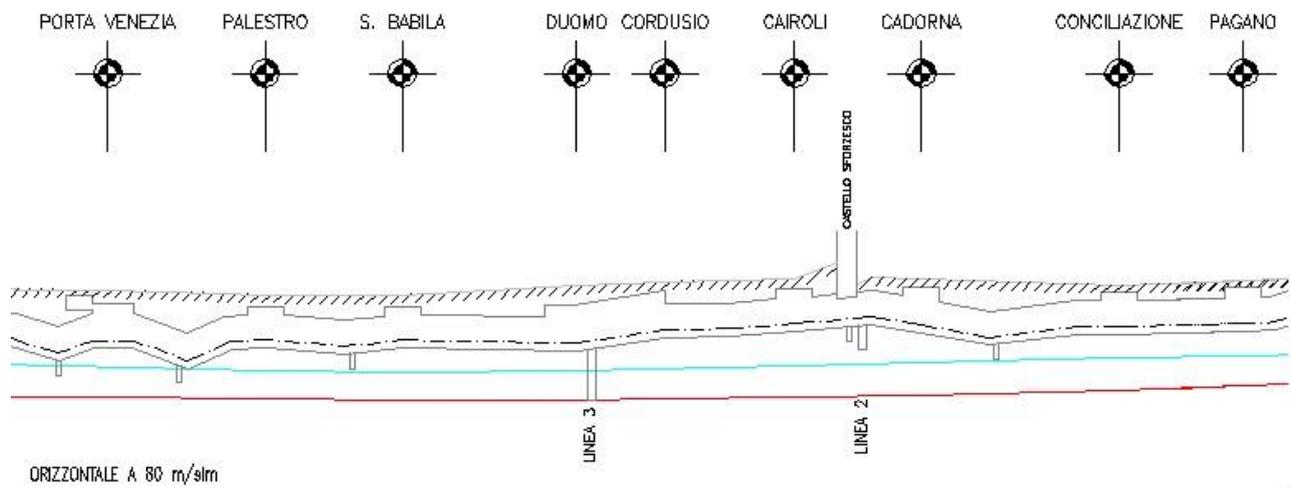


Figura 42 - Porzione centrale del profilo della linea rossa 1

Grazie a questi profili si trovano le profondità raggiunte dalle linee metropolitane e dato il notevole andamento irregolare, si decide di dividere il layer 1 del modello in 6 layers, con il vantaggio di affinare il posizionamento di ogni tratto di metro alla corretta profondità: ogni tratto viene inserito nel modello come una condizione di no-flow per la cella su cui insiste, cioè quella cella diventa inattiva in fase di simulazione del flusso e considerata dal codice di calcolo come un punto che modifica il flusso circostante, impedendo il fluire delle acque attraverso la cella stessa. Perciò se si mantenesse la suddivisione originale dei layers, si avrebbe una cella a flusso impedito estesa dal piano campagna fino al secondo layer (aquitard), accentuando in maniera irrealistica la presenza e le conseguenze della metropolitana sul flusso sotterraneo. Questa condizione di assenza di flusso è un caso speciale di cella a flusso definito, quindi è a tutti gli effetti una condizione di Neumann, ossia una condizione di flusso costante attraverso una determinata superficie.

La suddivisione avviene dividendo l'altezza Δz di ogni cella del layer 1 per 6: i centri di massa delle celle aventi medesime coordinate di sito (ma appartenenti a layers diversi) saranno distanti di un valore costante Δz_m e, sapendo che la distanza tra piano campagna e base del primo acquifero è variabile (si faccia riferimento alla sezione trasversale del modello base), celle dello stesso layer avranno ognuna un valore diverso di altezza in direzione z.

Si mostrano in tabella 13 le principali caratteristiche geometriche delle linee metropolitane:

Linea	Diametro medio [m]	Massima quota [m s.l.m.]	Minima quota [m s.l.m.]
Rossa	6.5	135	104
Verde	7	120	95
Gialla	8	118	92
Passante	8.5	108	96

Tabella 13 - Principali caratteristiche geometriche e altimetriche delle linee metropolitane implementate nel modello

Si evidenziano di seguito i tratti metropolitani inseriti in ciascun layer (tabella 14):

layer	tratti
1	tutta la linea 1 linea 2 Famagosta-Romolo linea 2 Cadorna-Lanza linea 2 Centrale-Caiazzo linea 2 Piola-Lambrate linea 3 Lodi Tibb-S. Donato linea 3 Repubblica-Sondrio
2	linea 2 Famagosta-Udine linea 3 Lodi Tibb-Repubblica linea 3 Sondrio-Maciachini passante Porta Venezia-Vittoria passante Lancetti
3	linea 2 Porta Genova-Cadorna linea 2 Caiazzo-Piola linea 2 Udine-Cimiano linea 3 Turati-Repubblica linea 3 Maciachini-Affori Centro passante Lancetti-Porta Venezia
4	linea 2 Porta Garibaldi-Gioia passante Lancetti-Porta Venezia
5	passante Porta Garibaldi

Tabella 14 - Suddivisione delle linee metropolitane nei layers del modello

Si vede come la linea 1 sia completamente compresa nel layer superficiale; alcune stazioni, dato il loro ampio sviluppo nel sottosuolo, insistono su più layers.

Implementato il dominio e definite le celle no-flow in dipendenza dal tracciato sotterraneo dei trasporti urbani, si specifica che le constant head applicate a questo modello sono le medesime del modello base, se non fosse che qui sono applicate al layer 4, essendo superfluo proseguire superiormente in quanto i valori piezometrici risultano essere più alti della quota sommitale delle celle del layer 4.

Per quanto riguarda le altre proprietà, la ricarica non viene alterata, porosità, *specific storage* e *specific yield* sono i medesimi e la distribuzione di permeabilità dell'originale layer 1 viene assegnata ai primi 6 del nuovo modello.

Pozzi e target hanno stesse ubicazioni, portate e caratteristiche del modello iniziale ma se insistono solo sul primo acquifero, hanno come layer base il numero 6, se si fermano all'aquitard, il 7 e se penetrano fino all'acquifero profondo, raggiungono il layer 8.

3.4 La calibrazione

Si procede alla calibrazione in condizioni stazionarie, basandosi sui dati di monitoraggio del Marzo 2014. Come già anticipato, i valori di permeabilità idraulica derivanti dai test condotti nell'area di studio e interpolati sul dominio sono variati considerando l'isotropia orizzontale e l'anisotropia verticale, tenendo presente che modificando la permeabilità del primo acquifero devono essere aggiornati tutti i valori dei primi sei layers. La calibrazione è svolta manualmente con la procedura *'trial and error'*, ossia si procede nell'ipotizzare nuovi valori di permeabilità fintanto che non si raggiungono ottimi valori residuali e statistici (le permeabilità finali sono già mostrate in tabella 11).

Sono presentati inizialmente i residui, ossia le differenze tra target, valore piezometrico riscontrato nelle misurazioni in situ, e valore d'altezza di falda risultante dalla modellazione: valori positivi (in nero) indicano che il modello sta sottostimando i carichi, ossia nella realtà sono più elevati di quelli simulati, mentre valori negativi dei residui (in rosso) portano ad una sovrastima dei carichi, ossia si raggiunge un valore di altezza piezometrica superiore al target (figura 43). Nel layer 6 vengono inseriti tutti i targets relativi al primo acquifero, nel 7 all'aquitard e nell'8 quelli del secondo acquifero.

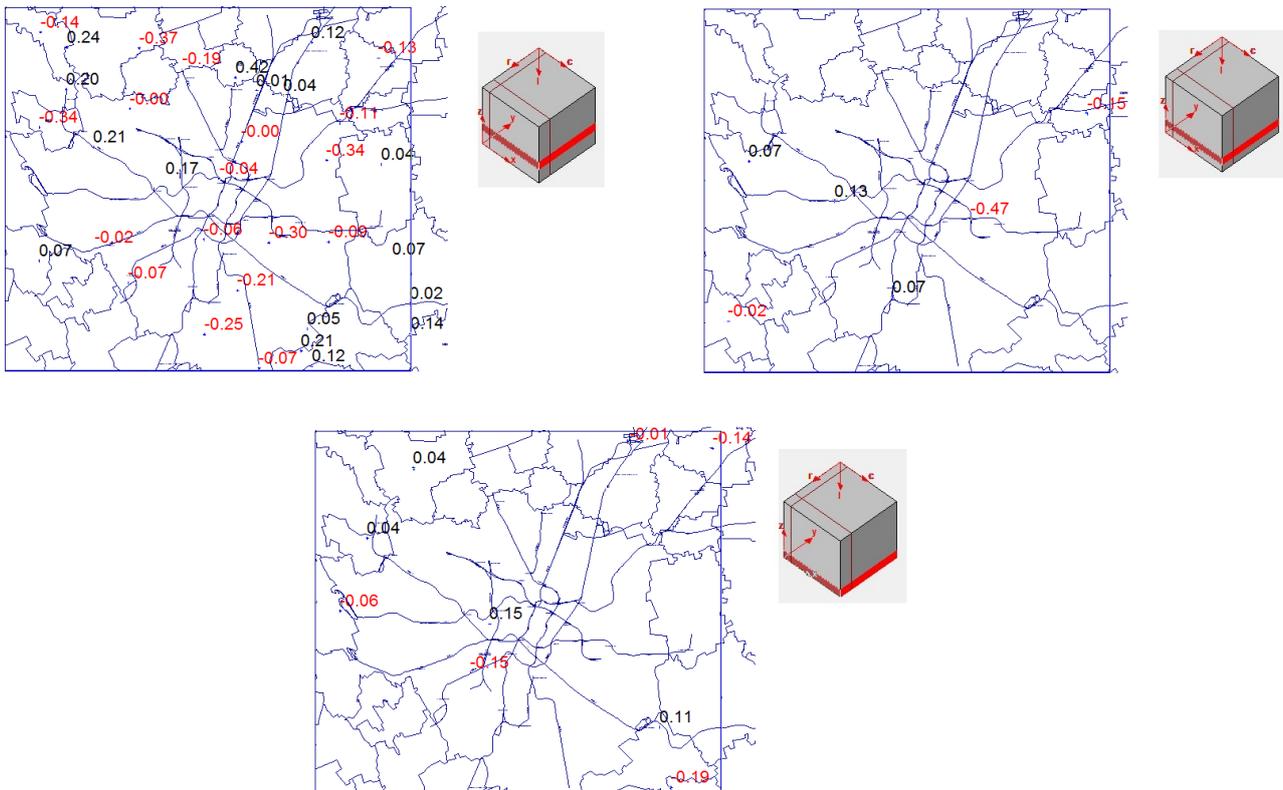


Figura 43 - Residui riscontrati rispetto ai targets del modello raffinato (in rosso residui negativi, in nero residui positivi)

I residui maggiori ottenuti rispetto ai targets sono elencati in tabella 15:

Target	Valore osservato [m s.l.m.]	Valore simulato [m s.l.m.]	Residuo [%]
Milano Dateo	104,39	104,86	-0,47
Bollate	137,6	137,97	-0,37
Pero	138,26	138,60	-0,34
Parco Lambro (Milano)	111,85	112,18	-0,34
Bresso	125,01	124,58	0,42

Tabella 15 - Targets con maggiori valori residui

Quattro targets su cinque sono i medesimi della calibrazione senza effetti della metro; il target di Milano Dateo, oltre ad essere l'unico tra questi a raggiungere la profondità fino al layer 7 è quello con il valore residuo maggiore, neanche mezzo punto percentuale, risultato estremamente positivo.

Si presenta ora il grafico descrivente la totalità dei valori dei residui rispetto alle osservazioni puntuali dei targets con relativa suddivisione per layer (figura 44).

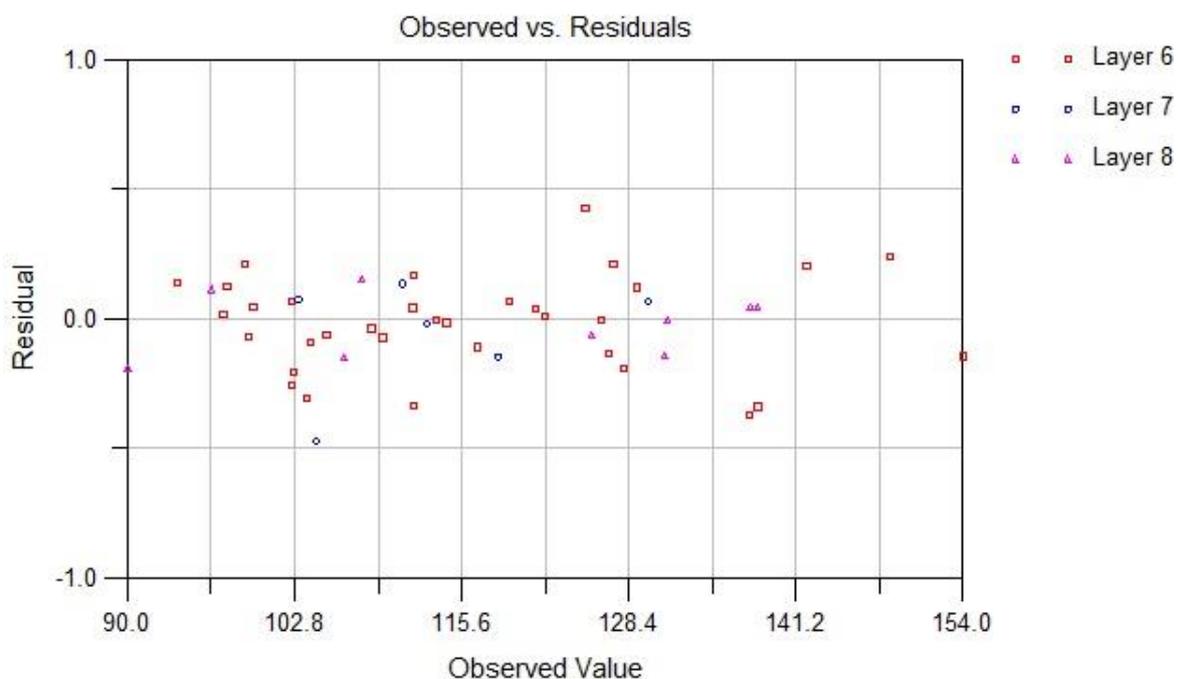


Figura 44 - Valori osservati vs residui per i tre layers più profondi

I targets del layer 8 presentano una dispersione minima attorno al valore nullo dei residui, con un residuo massimo dello 0.2%. In generale la nuvola di punti è distribuita in modo soddisfacente, con valori residui positivi veramente contenuti.

L'indicazione principale della bontà della calibrazione viene però data dal grafico di figura 45 che confronta direttamente i valori osservati con i valori simulati:

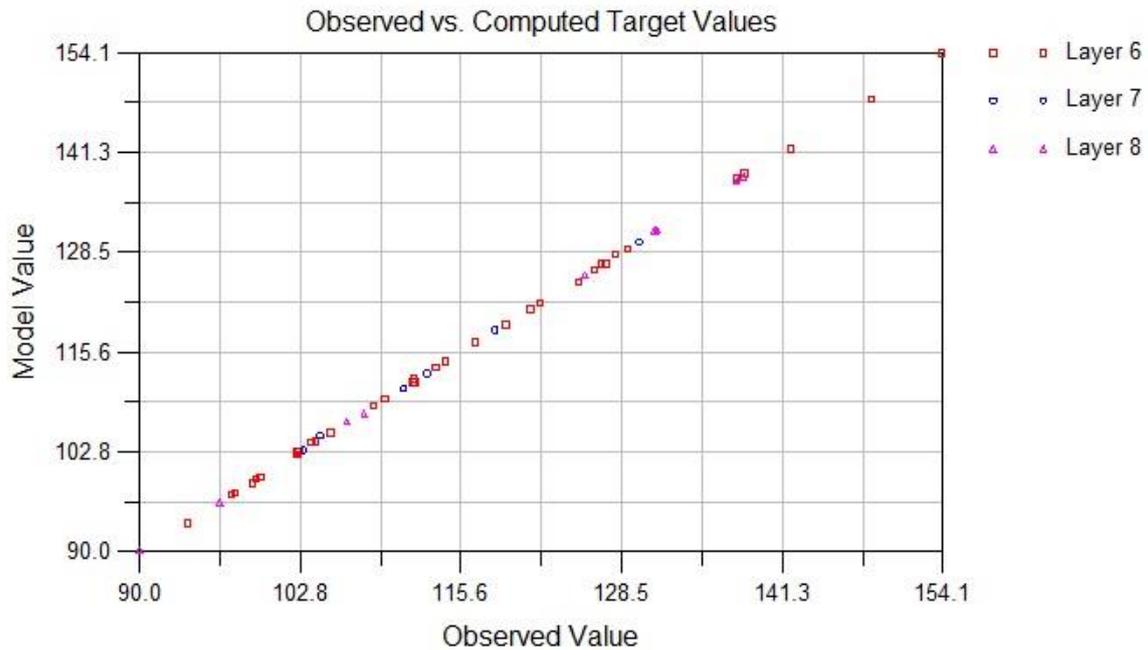


Figura 45 - Valori osservati vs valori simulati per i tre layers più profondi

Per ogni layer la corrispondenza lungo la diagonale rappresentante la perfetta coincidenza della simulazione con i valori reali è altamente soddisfacente: si evince che il modello descrive in modo adeguato quanto definito dai valori osservati, quindi riproduce in modo soddisfacente la realtà.

Si presentano infine valutazioni statistiche sui valori residui dei targets (numero di osservazioni totali N pari a 49):

- la semplice media aritmetica dei residui $E(res)$ risulta essere -0.02% , valore molto apprezzabile poiché tendente allo zero
- la media aritmetica dei residui in valore assoluto è pari a 0.14

- la deviazione standard, valutata come $\sigma_{res} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (res_i - E(res))^2}{N}}$, è 0.18, valore che risulta essere decisamente basso e che indica un contemporaneo non eccessivo scostamento dalla media E

- la somma dei quadrati, intesa come $SOS = \sum_{i=1}^N res_i^2$, restituisce un valore di 1.53

- la radice dell'errore quadratico medio RMSE, $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (res_i)^2}{N}}$, risulta 0.17 (essendo la media aritmetica vicina al valore nullo, RMSE è molto simile a σ_{res}).

3.5 La simulazione del flusso

Terminata l'implementazione e opportunamente calibrato il modello, si può procedere con la simulazione del flusso d'acqua sotterraneo nel dominio definito.

Si utilizza un valore di convergenza di vari ordini di grandezza inferiore rispetto al livello di accuratezza desiderato per le altezze idriche risultanti (nel caso di studio le iterazioni si fermano quando si arriva a 10^{-6}). Viene definito anche il massimo numero permesso di iterazioni all'interno dello stesso time step: se la convergenza non è raggiunta entro questo numero di iterazioni, il processo iterativo viene terminato forzatamente (si imposta questo valore a 100 iterazioni).

Per poter realizzare la simulazione ulteriori parametri e specifiche devono essere dati come input:

- si effettua la simulazione nel caso stazionario, i cui risultati saranno quindi esemplificativi delle condizioni all'equilibrio del sistema (a differenza del caso transitorio, dove si studia l'evoluzione del sistema verso il raggiungimento dell'equilibrio e la variabile temporale gioca un ruolo primario)
- si impone al codice di calcolare un coefficiente di perdita, *leakance*, attraverso l'uso dello spessore del layer e della conducibilità verticale
- si definiscono le tipologie degli acquiferi per ogni layer: si considera tutti i layer del modello base non confinati, in particolare il secondo e il terzo hanno trasmissività variabile
- la ricarica agisce sul layer attivo più superficiale
- le altezze piezometriche iniziali dal cui valore si fa partire la simulazione sono definite per ogni layer a 160 metri s.l.m. (più questo valore è vicino a quello reale, più velocemente avverrà la simulazione perché prima verrà raggiunta la convergenza); si sceglie questo valore facendo attenzione che sia superiore rispetto ad ogni elevazione di base di ogni cella del primo layer (valori massimi di *'bottom elevation'* pari a 140 metri, figura 38).

3.5.1 Analisi dei risultati della simulazione

Il primo risultato della simulazione del movimento idrico sotterraneo è la distribuzione spaziale delle altezze idriche all'interno del modello, con andamento della piezometria mostrato in figura 46.

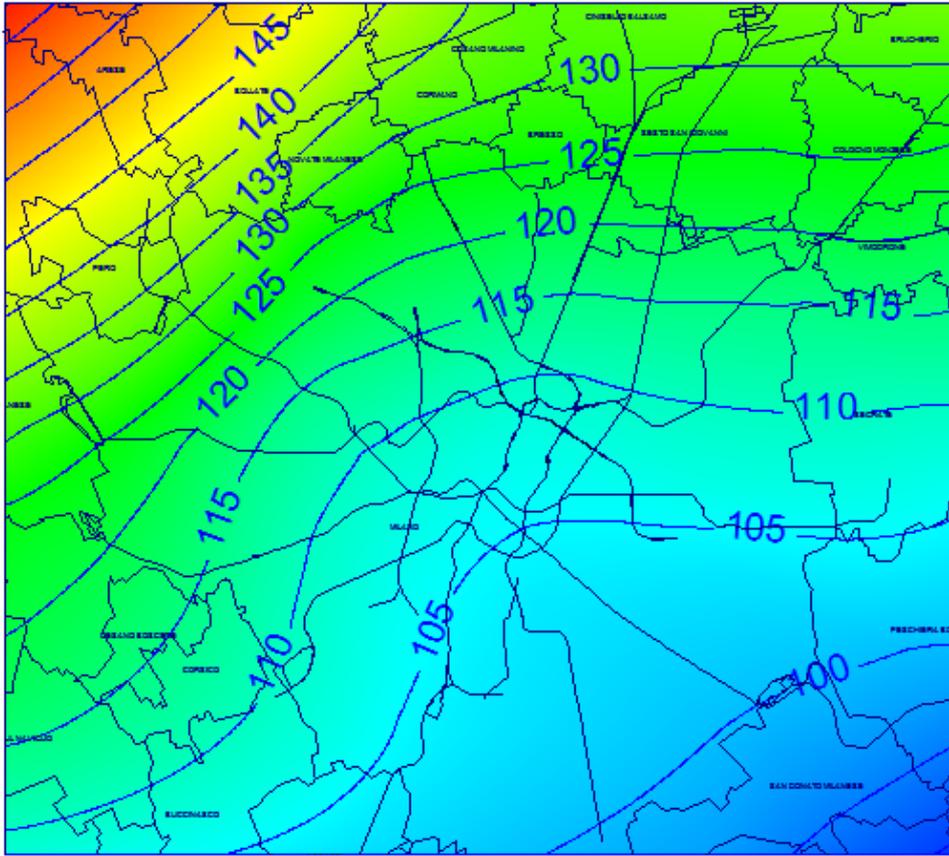


Figura 46 - Andamento della piezometria simulato con MODFLOW per il modello raffinato

Si nota come l'andamento sia conforme con quello di figura 23 relativo alla situazione nell'anno 2014. Le linee di livello isopiezometrico sono molto distanti nel centro della città di Milano, per la presenza di un elevato numero di pozzi di pompaggio (in figura 41 ben si nota la concentrazione di pozzi nella zona antica della città): il gradiente naturale dell'andamento piezometrico è fortemente distorto rispetto alle vicinanze e diventa molto basso, diminuendo di un ordine di grandezza; questa depressione piezometrica è così pronunciata che ha cambiato la velocità delle acque sotterranee, le quali, nonostante l'aumento di velocità al di fuori dei confini comunali, hanno visto una riduzione del modulo della velocità nell'interno della città.

Si mostrano anche le aree corrispondenti a celle con assenza di acqua di falda (*dry cells*, in colore arancio), presenti fino al layer 3: si nota come la linea 1 della metropolitana sia completamente sopra il livello della falda in tutto il suo tragitto (in rosso in figura 47); il tratto centrale della linea 2, dalla stazione di Cadorna a Loreto, avendo una forte estensione in profondità (dovendo sottostare alla linea 1 nell'intersezione a Cadorna e alla linea 3 a Centrale), risulta essere invece interessato dalla presenza dell'acquifero (l'influenza della struttura sul flusso idrico verrà studiata in seguito).

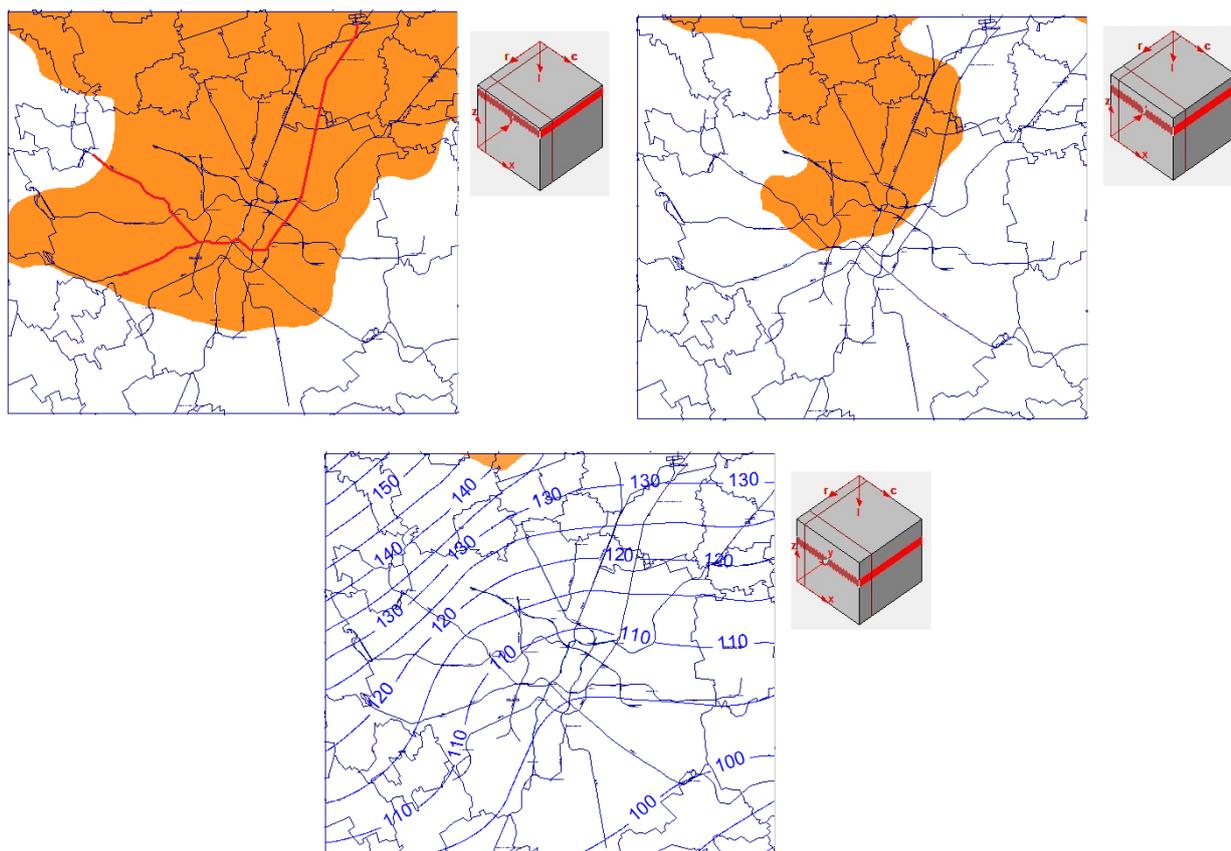


Figura 47 - Andamento della piezometria simulato con MODFLOW con *dry cells* in arancio per il modello raffinato

Una descrizione dettagliata delle stazioni con presenza di acqua è qui riportata in tabella 16:

Stazioni	Condizioni secche	Presenza d'acqua	Sommerse
linea 1 rossa	tutte le restanti	Rho Fiera; Pero; Molino Dorino; S. Leonardo	
linea 2 verde	Lanza	tutte le restanti	
linea 3 gialla	Zara; Sondrio; Centrale; Repubblica; Lodi Tibb; Brenta; Corvetto; Porto di Mare; Rogredo	Dergano; Maciachini; Turati; Montenapoleone; Duomo; Missori; Crocetta; Porta Romana	Comasina; Affori FS; Affori centro
passante	Porta Vittoria	Lancetti; Repubblica; Dateo	Porta Garibaldi; Porta Venezia

Tabella 16 - Condizioni attuali delle stazioni metropolitane in funzione del livello idrico

La linea 3 presenta già attualmente stazioni che vedono la propria quota massima al di sotto del livello idrico locale e sono quelle stazioni più settentrionali, dove l'altezza di falda non è certo vicina al piano campagna ma le strutture sono profonde, nonostante siano in zona periferica. Il passante ferroviario, nel suo tratto interrato, insiste a elevate profondità poiché attraversa una zona densamente sfruttata e ricca di altre linee già presenti durante la sua costruzione; quindi

presenta stazioni già sommerse e altre dove il livello piezometrico non solo ha raggiunto la quota delle gallerie ma è già quasi arrivato alla quota sommitale (Lancetti e Repubblica).

Confrontando questo modello raffinato con il modello iniziale, l'andamento del tetto di prima falda è pressoché identico; ma nonostante la rete di trasporti sotterranea, sebbene ben articolata, non riesca ad apportare una variazione sensibile all'andamento piezometrico, si nota come grazie ad un infittimento delle isopieze, soprattutto nell'interno della depressione piezometrica, si abbiano differenze tra i livelli idrici nei due modelli: come mostrato in figura 48, si assiste ad un costante spostamento delle isopieze verso il basso, ossia l'inserimento delle strutture dei trasporti ha procurato un innalzamento del tetto di falda per uno stesso punto del dominio. Queste differenze sono visibili non solo in prossimità degli elementi impermeabili, ma anche lontano da essi: in figura 48a ad esempio il carico varia per la isopieza 105 nonostante la vicina linea 4 non sia ancora implementata nel modello (verrà aggiunta solo per lo studio degli scenari futuri), così come per la figura 48b la linea piezometrica 106 subisce un forte spostamento in una zona lontana da strutture sotterranee, essendo il passante Due a livello del piano campagna.

In particolare in figura 48a è mostrata la zona dove il passante ferroviario interrato incontrerà la linea 4 della metropolitana presso Dateo e in figura 48b la zona a Sud della stazione di Sant'Ambrogio.

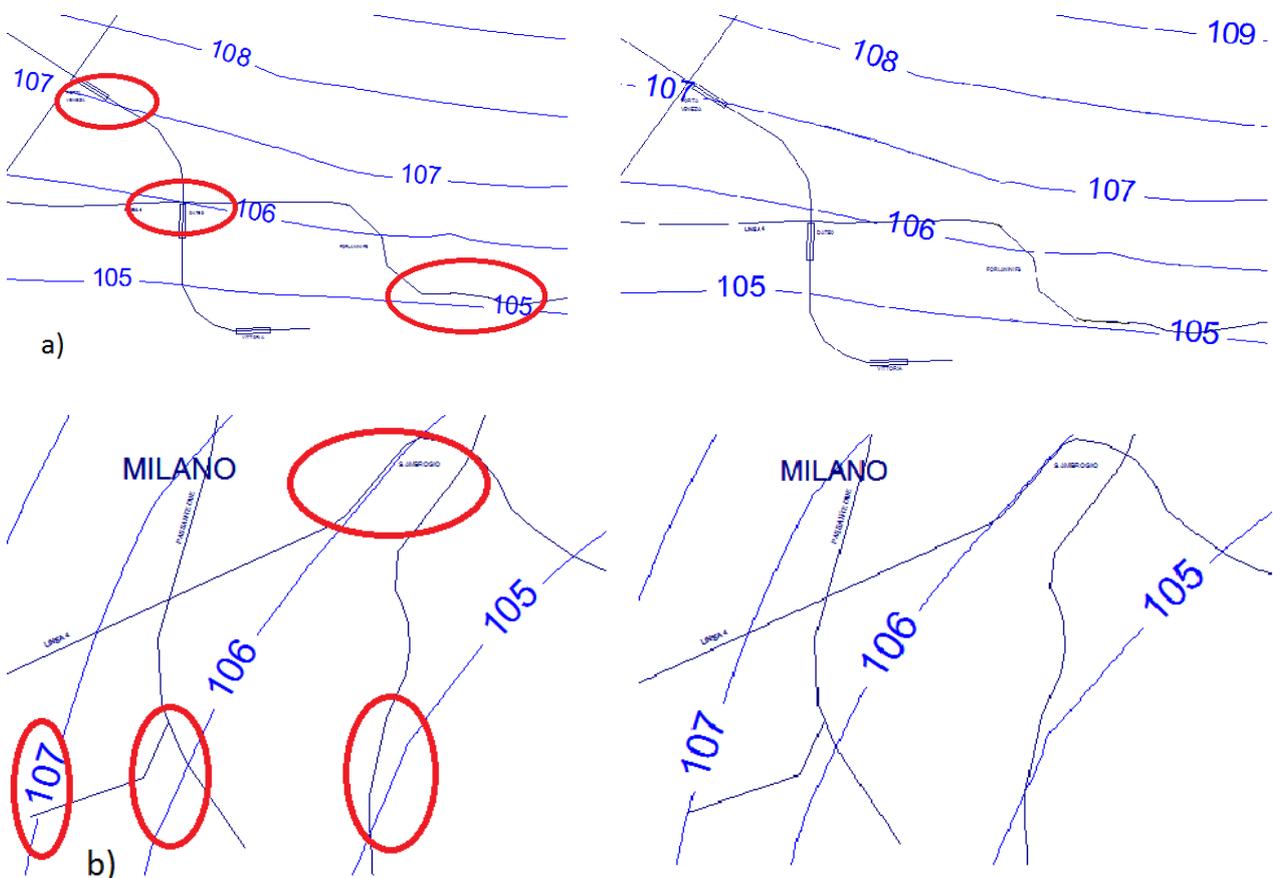


Figura 48 - Differenze di livello piezometrico tra il modello raffinato (a sx) e il modello iniziale (a dx): a) stazione Milano Dateo b) stazione Sant'Ambrogio

Si individuano inoltre deformazioni locali del livello idrico in concomitanza delle strutture metropolitane (figura 49): queste deformazioni consistono in un innalzamento del livello d'acqua a monte (rispetto alla direzione del flusso) degli elementi strutturali impedenti il flusso ordinario e in un abbassamento localizzato a valle degli elementi impermeabili.

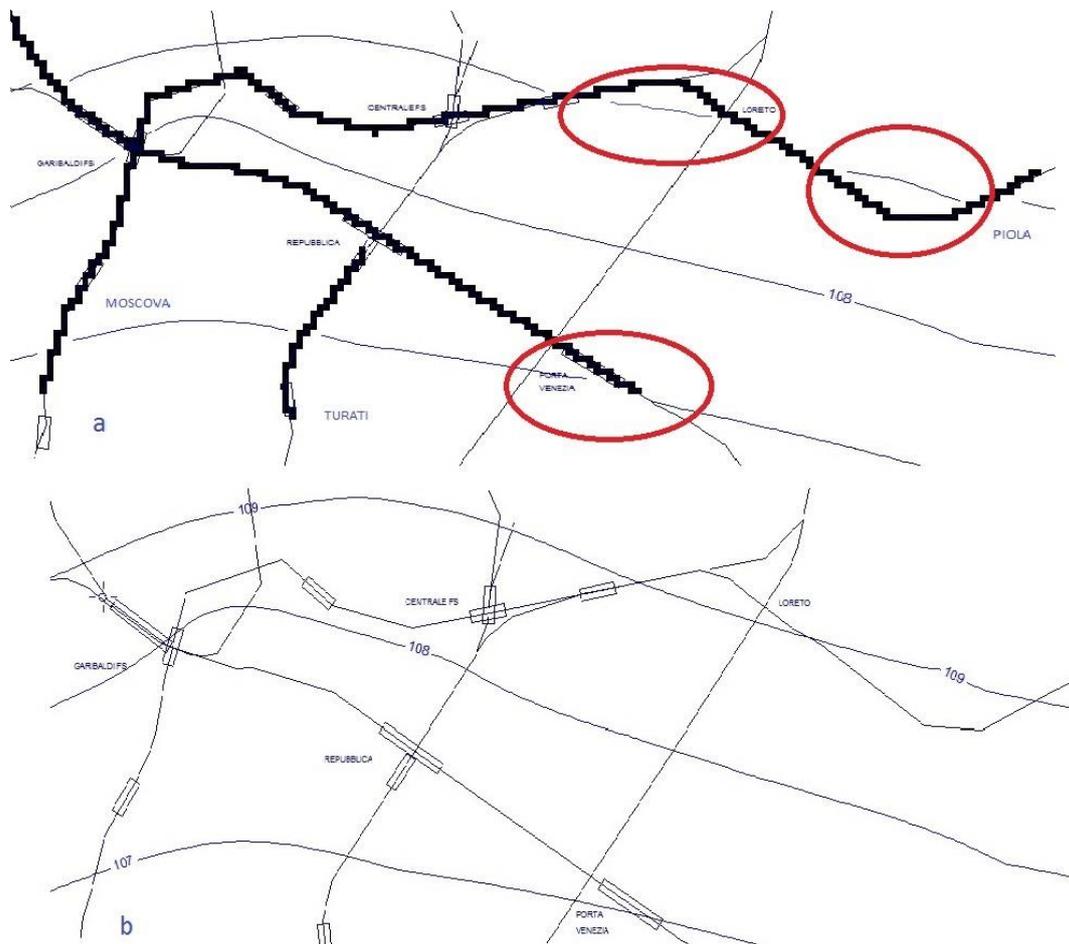


Figura 49 - a) Deformazioni locali del livello idraulico dovute alle strutture sotterranee in confronto con b) andamento naturale senza presenza di strutture

Si nota come le variazioni hanno maggior ampiezza quando le strutture si sviluppano in direzione ortogonale rispetto al flusso e quando sono più profonde: in questi casi si assiste anche ad aumento e diminuzione locale di ± 15 cm del livello. Considerando il tratto della linea 2 tra Centrale e Piola, questo fenomeno è ben visibile: la linea isopiezometrica 109, quando è a Nord del tracciato, è più spostata verso Sud rispetto alla situazione con assenza di barriere e, essendo il flusso in direzione Sud, questo cambiamento indica maggiori livelli idrici a monte della struttura; viceversa la stessa linea, a Sud della struttura, cade più a Nord rispetto al suo andamento naturale, quindi sono presenti minori carichi idraulici a valle della struttura. Stesso andamento sfalsato lo si nota per la linea isopiezometrica 107 alla stazione di Porta Venezia, mentre, essendo i tratti verso Moscovia e Turati paralleli alla direzione del flusso, la variazione piezometrica non è visibile.

Identico fenomeno di deformazione locale è presente in Cadorna con un netto cambiamento di livello tra monte e valle, anche qui con estensione strutturale quasi ortogonale al flusso locale (figura 50).

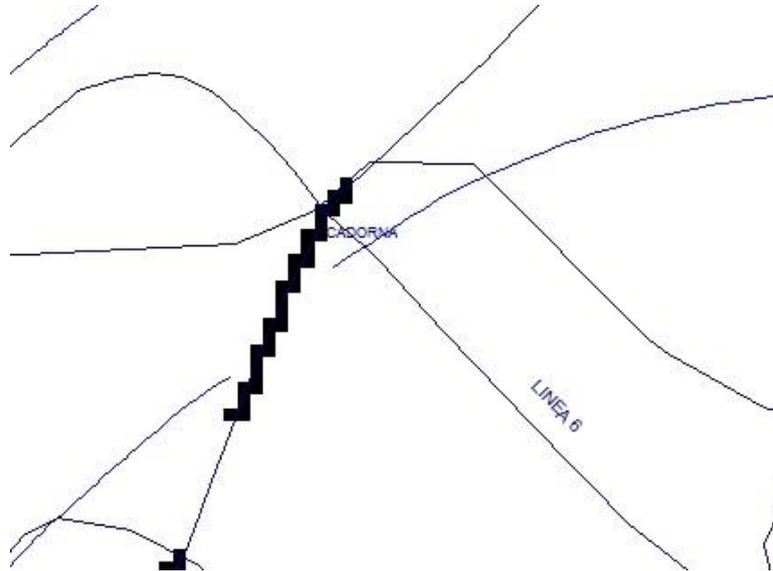


Figura 50 - Deformazione locale del livello idraulico dovute alle strutture sotterranee presso la stazione di Cadorna

Oltre a effetti locali sull'altezza idrica in vicinanza delle strutture, si originano anche variazioni locali del percorso di flusso, impedito nel suo procedere naturale dalle barriere impermeabili costituite dalle strutture sotterranee: la direzione del flusso assume infatti un'ingente componente verticale, che è diretta verso il basso nella zona a monte delle strutture (sempre rispetto alla direzione del flusso) e verso l'alto nella zona di allontanamento del flusso dall'elemento. Conseguenze negative dal punto di vista strutturale possono derivare da questo fenomeno, come una spinta di sollevamento verso l'alto. Si presentano situazioni in alcuni snodi fondamentali della viabilità sotterranea e casi particolari al variare dell'estensione planimetrica e dello sviluppo in profondità delle strutture.

Il flusso viene identificato grazie ai vettori velocità del flusso e alla loro direzione: frecce vettoriali blu indicano una velocità di flusso verso l'alto, frecce vettoriali rosse verso il basso. Per chiarezza di visualizzazione si mostrano i vettori velocità ogni due celle sia per le righe che per le colonne senza perdita di informazioni importanti.

3.5.1.1 Sezioni trasversali Nord-Sud

Si studiano i comportamenti del flusso idrico sotterraneo in corrispondenza delle principali stazioni metropolitane-ferroviarie: Cadorna, Porta Garibaldi e Centrale (figura 51).

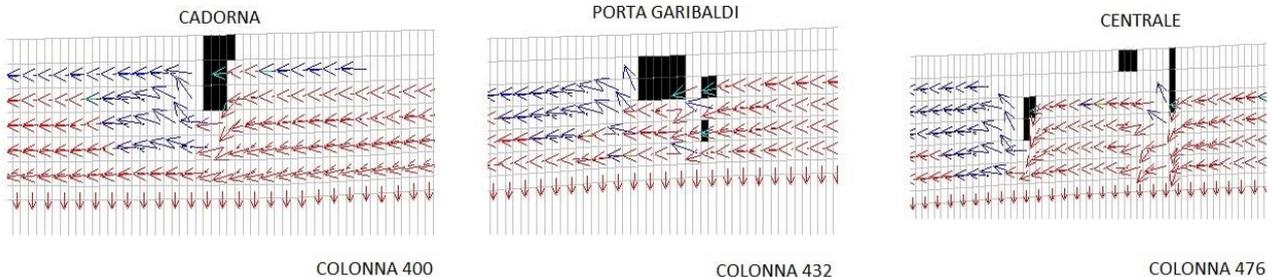


Figura 51 - Variazione del flusso idrico in prossimità delle stazioni metropolitane principali

Si nota la costante creazione della componente verticale delle velocità: in particolare, sempre pronunciate sono le velocità verso l'alto subito dopo il termine del manufatto (celle nere indicanti condizione di no-flow). Inoltre si specifica come per il layer 7, ossia l'aquitard, il flusso, passante in uno strato molto meno permeabile, ha sempre una componente pressoché solamente verticale, poiché favorisce il passaggio d'acqua tra i due sistemi acquiferi.

Studiando invece l'influenza dell'estensione strutturale e della profondità raggiunta dall'elemento sul movimento delle acque, si nota come una barriera trasversalmente sottile ma sviluppata in profondità costituisca un ostacolo più gravoso per il flusso idrico con conseguente maggiore sviluppo di velocità verticale in uscita, rispetto ad un elemento impermeabile molto sviluppato nella direzione del flusso ma non in altezza. Questa differenza è ben visibile per due situazioni molto simili tra loro, tra Caiazzo e il passante ferroviario e tra Dateo e Loreto (figura 52).

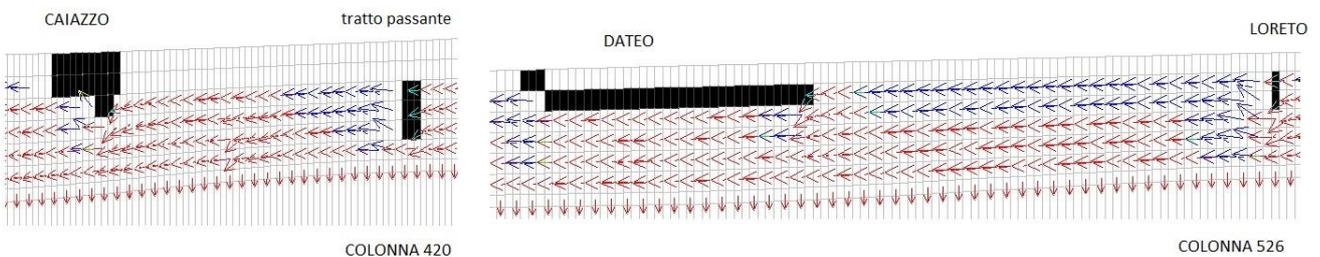


Figura 52 - Differenza dell'influenza della struttura in funzione dell'estensione longitudinale e della profondità

Gli elementi sviluppati in altezza provocano una componente verso l'alto del vettore velocità (come già visto per le stazioni principali), mentre corpi impermeabili sviluppati longitudinalmente o semplicemente più tozzi con altezza e lunghezza di ordini di grandezza paragonabili (vedesi Caiazzo) generano a fatica un flusso in direzione verticale in uscita, assente per il caso della tratta lungo la stazione del passante ferroviario di Dateo.

3.5.1.2 Sezioni trasversali Est-Ovest

La tavola delle altezze piezometriche è chiaramente discendente verso Sud, perciò nelle sezioni N-S si ha sempre individuato un vettore velocità libero da influenze esterne diretto verso Sud (verso sinistra nelle figure 51 e 52); procedendo da Ovest a Est, soprattutto nella zona antica della città coincidente con la depressione piezometrica, la variazione dell'altezza di falda è molto meno marcata e si viaggia per vari chilometri lungo la medesima linea isopiezometrica: ne consegue che i vettori velocità in questa direzione non hanno sempre il verso diretto a Est, ma anche in condizioni libere possono essere rivolti a Ovest, non andando in contraddizione con la tavola piezometrica poiché risulta praticamente piatta per diversi tratti.

In particolare si caratterizzano due sezioni ricche di elementi strutturali, una passante per Cadorna in figura 53 e una per Centrale in figura 55.

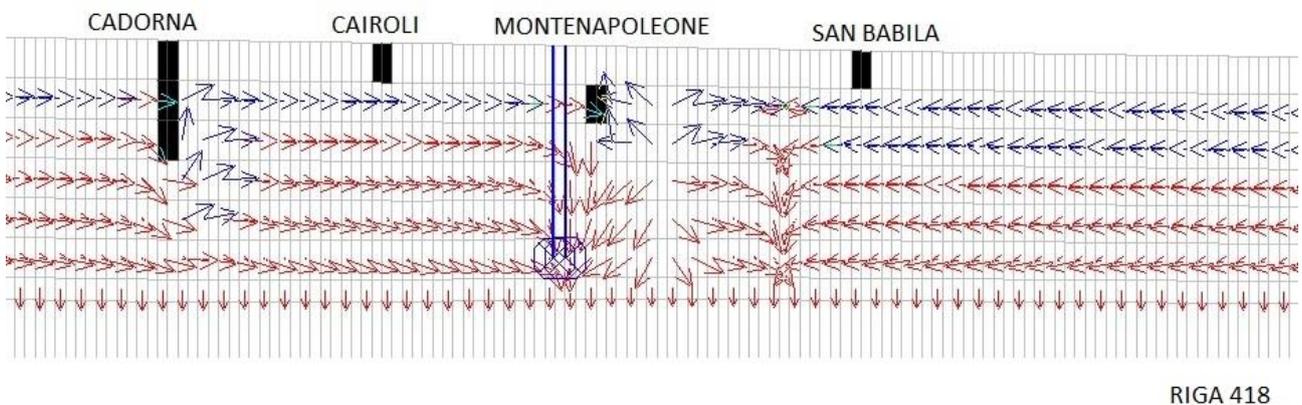


Figura 53 - Sezione trasversale E-O passante per Cadorna

Il flusso proveniente da Ovest arriva a Cadorna, subisce il tipico effetto della struttura sviluppata in profondità con componente verticale delle velocità molto pronunciata, ma continua per tutto il layer 2 con componente verso l'alto. Presso Montenapoleone si assiste ad una doppia influenza: non solo la struttura impermeabile, ma anche il richiamo di due pozzi di pompaggio prossimi alla stazione; il flusso idrico a Ovest della stazione si divide e più che della barriera risente del richiamo dovuto ai pozzi, sviluppando una componente verticale indipendente dalle strutture sotterranee. Ulteriore conferma dell'influenza forte da parte dei pozzi è lo sviluppo di un'altra ingente velocità verticale del flusso a Ovest di San Babila: nella sezione considerata non sono presenti pozzi vicino alla suddetta stazione, ma basta spostarsi a Sud di 50 metri circa (riga 420 a distanza di due celle dalla riga 418, mostrata in figura 54) per trovare la fonte di quest'influenza, ossia un altro pozzo con doppio emungimento da ognuno degli acquiferi. Infine si nota come la velocità a Est di San Babila risulta essere per natura verso Ovest, data la sostanziale non mobilità della tavola piezometrica, che smette di discendere lentamente proprio a Est di Cadorna.

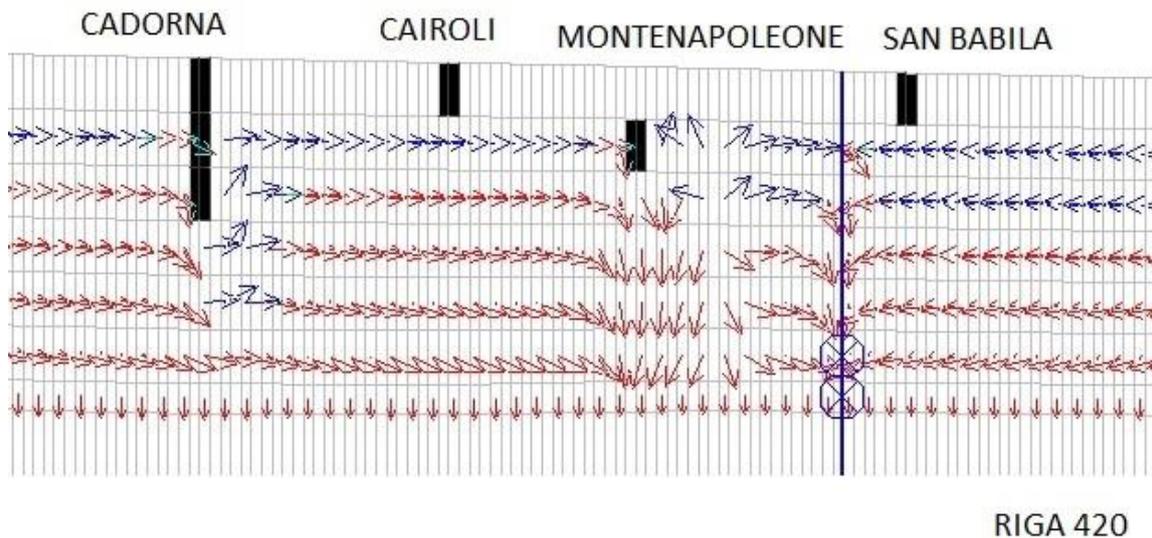


Figura 54 - Sezione trasversale E-O passante per Cadorna (riga 420)

Parallelo discorso può essere fatto per la sezione E-O passante per Centrale:

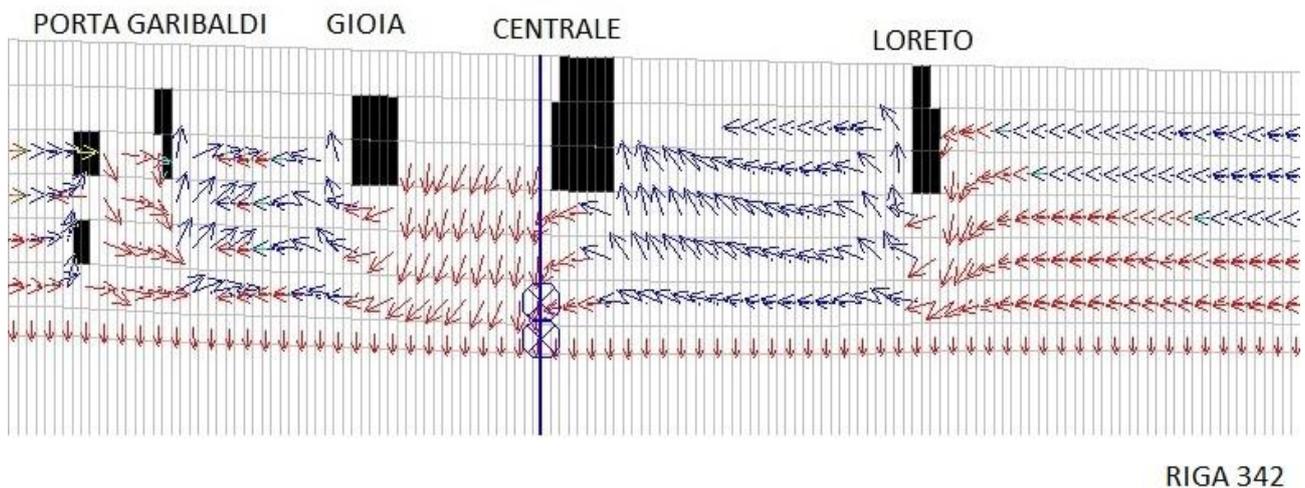


Figura 55 - Sezione trasversale E-O passante per Centrale

Presso Porta Garibaldi si ha una sovrapposizione di effetti dovuta alla contemporanea presenza di molti elementi impermeabili a diverse profondità (non solo due linee metro, ma anche il passante ferroviario sotterraneo), con uplift a valle della stazione principale; a Loreto identica situazione ma con verso delle velocità opposto, quindi flusso che spinge la struttura nella parte a Ovest (di valle rispetto al flusso). L'unicità del flusso è data però dal comportamento tra Gioia e Centrale, con solo componenti verticali del flusso dovute alla presenza di pozzi a doppio emungimento, anche nell'area immediatamente a Nord, e tra Loreto e Centrale, dove il già descritto uplift iniziato a Loreto continua fino alla stazione Centrale, con notevoli componenti verticali sviluppate.

Si studia inoltre il modulo del vettore velocità, la cui grandezza dipende anch'essa dalla presenza di strutture sotterranee impermeabili (figura 56): alla stessa altezza degli elementi strutturali il flusso diminuisce la propria velocità, sia a valle che a monte del manufatto, mentre in profondità, al di sotto della struttura, si ha un incremento della velocità che arriva ad essere di un ordine di

grandezza superiore, aumento che può portare l'instaurarsi di fenomeni erosivi, fino al verificarsi di instabilità per la struttura, in particolare per terreni ad alto contenuto di materiali fini.

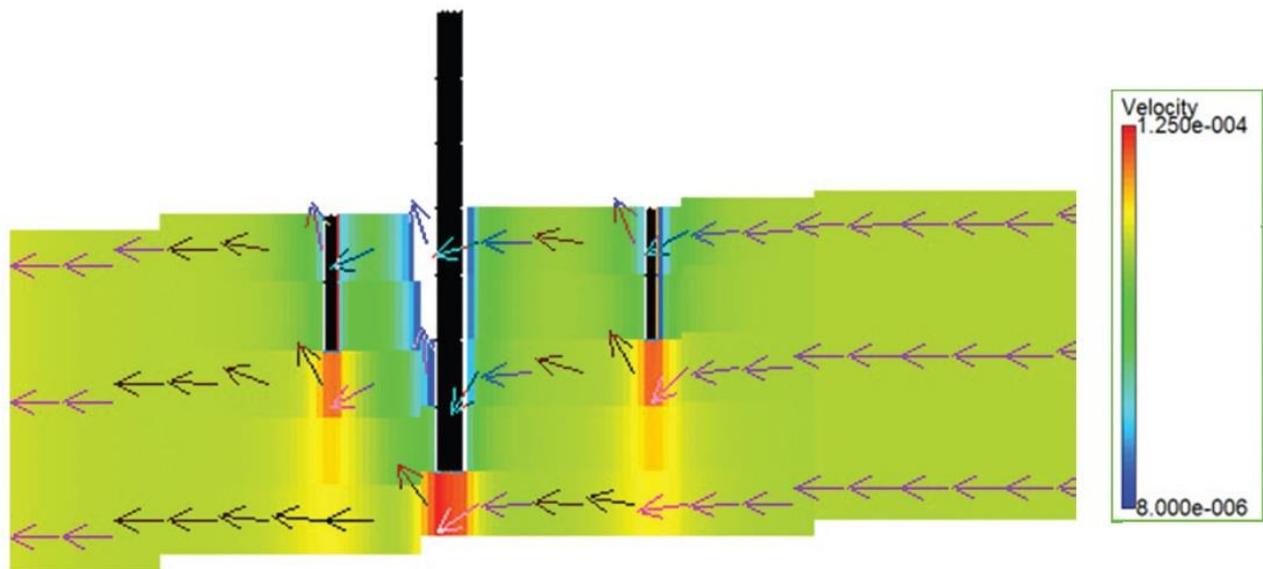


Figura 56 - Velocità in una sezione trasversale N-S della stazione di Garibaldi

3.6 Il particle-tracking

Conoscere il movimento sotterraneo delle acque e il conseguente andamento del livello piezometrico significa sapere come le acque sotterranee si comportano in dipendenza dalle proprietà del terreno e degli acquiferi e dalle condizioni iniziali e al contorno note che insistono sul sistema studiato. Il movimento di una singola particella, d'acqua o di un eventuale contaminante trasportato dalle acque sotterranee, può essere individuato come diretta conseguenza del movimento idrico totale, attraverso un ulteriore codice di calcolo presente in Groundwater Vistas, MODPATH, atto all'individuazione delle traiettorie delle singole particelle; utilizzando come punto di partenza necessario i risultati del processo iterativo di MODFLOW, si possono ora trovare gli andamenti di una particella secondo simulazione del punto finale di arrivo della traiettoria sia seguendo il trascorrere del tempo con procedura 'in avanti' (*forward simulation*) sia all'indietro nel tempo (*backward simulation*), così come individuare le traiettorie totali di un determinato set di particelle con posizioni intermedie delle particelle note. Il passo in più che viene realizzato in MODPATH è la presa in considerazione diretta della velocità delle particelle d'acqua, mentre in MODFLOW ci si era limitati a studiare l'andamento del carico piezometrico nel tempo (eq. 6 dell'Appendice A).

La procedura del particle tracking simula soltanto il moto advettivo delle particelle trascurando dispersione, diffusione e reazioni chimiche. Le assunzioni di base, le equazioni governanti delle traiettorie delle particelle e la loro implementazione nel codice di calcolo sono mostrati in Appendice B.

Noti i concetti alla base del particle tracking, si analizzano ora diverse situazioni riguardanti due specifiche casistiche: si tracciano i percorsi delle particelle d'acqua col metodo del *forward tracking*, definendo due punti di partenza particolarmente vicini a snodi importanti del sistema di trasporti sotterraneo.

3.6.1 Forward tracking

Con questa procedura si vuole studiare la traiettoria di alcune particelle d'acqua a partire da posizioni di partenza dalle quali verificare se e come la presenza delle strutture metropolitane possa influenzare il loro sviluppo all'interno del flusso idrico sotterraneo. Il punto iniziale della traiettoria è scelto arbitrariamente, ma sempre in posizione prossima a stazioni metropolitane principali; il punto finale è invece dipendente dal tempo con cui si esegue la simulazione: non essendo interessati a conoscere la fine della traiettoria in un determinato istante temporale, piuttosto al percorso generale della traiettoria stessa, si imposta il tempo totale a un tipico valore di 10^7 secondi sufficiente per ottenere una traiettoria apprezzabile; si studia una batteria di 10 particelle equidistanti tra loro e insistenti sulla medesima linea direzionale.

Per individuare le linee di flusso di una porzione del primo acquifero in relazione all'influenza delle strutture sotterranee, si inserisce un primo set di particelle a Nord del tratto della linea 2 tra Centrale e Loreto, ipotizzando che data la piezometria della zona le particelle arriveranno agli elementi impermeabili in un tempo inferiore a quello di simulazione (se ciò non dovesse accadere, sarà sufficiente aumentare il valore del parametro *maximum travel time*). Essendo suddetta tratta una condizione di no-flow sia sul layer 2 che sul layer 3, le particelle vengono inserite al top del layer 3, per avere un'indicazione più esaustiva del loro movimento di fronte all'ostacolo (a priori la particella potrebbe passare sotto ma anche al di sopra dell'elemento). Si ottengono le seguenti traiettorie (figura 57).

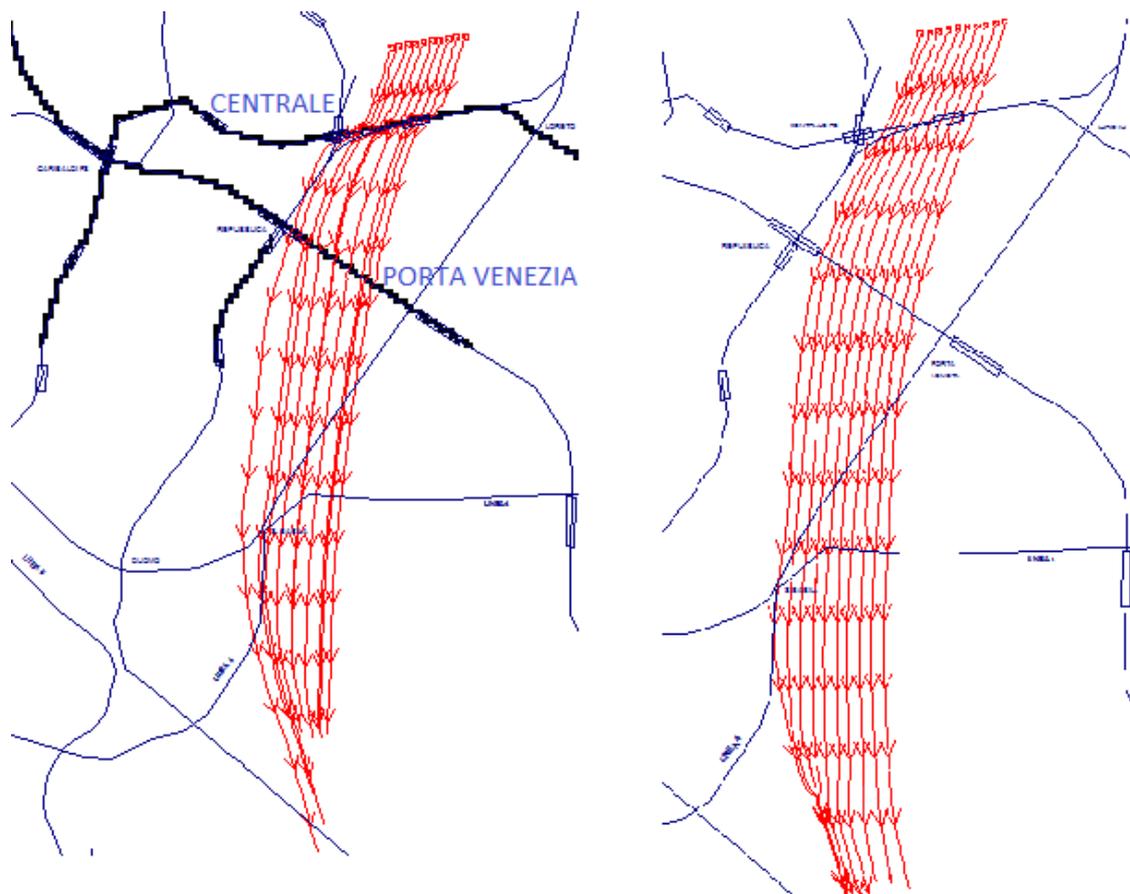


Figura 57 - Traiettorie di particelle con punto di partenza in zona Centrale in modello raffinato (a sx) e in modello iniziale (a dx)

Si nota come le particelle subiscano un notevole schiacciamento in concomitanza dell'intersezione delle traiettorie con la prima linea metropolitana, deviazioni assenti nel caso indisturbato; anche nell'incrocio della seconda tratta, il passante ferroviario interrato, si assiste, sebbene in misura inferiore, ad un diverso comportamento delle traiettorie; per studiare approfonditamente l'effetto delle strutture si mostrano i singoli tratti di traiettorie per ogni layer attraversato, così da capire come avviene il superamento della barriera impermeabile da parte delle particelle: grazie alle figure seguenti 58 e 59, si capisce come tutte le particelle quando raggiungono il primo ostacolo lo superano passando al di sotto e transitando per il layer sottostante, il numero 4 (tratti in verde di figura 59) per poi risalire nel layer di partenza; alcune particelle continuano la loro traiettoria risalendo fino al layer 2, mentre le restanti, raggiunto l'imponente elemento impermeabile del passante ferroviario, sono costrette a modificare la traiettoria fino al layer 5 per poi risalire immediatamente fino al layer 3 (i trattini verdi di figura 59 lungo la condizione di no-flow non indicano un passaggio attraverso la barriera, bensì il transito repentino delle particelle dal layer 5 verso il 3). Grazie a questi risultati, si può fare una correlazione tra flusso idrico simulato con MODFLOW e linee di flusso delle singole particelle di MODPATH: se si considera la figura 51 per la sezione trasversale lungo Centrale, si nota infatti che le traiettorie trovate con MODPATH rispecchiano esattamente ciò che si poteva attendere dall'andamento generale del flusso, confermando la correttezza della simulazione: il passaggio sotto la linea 2 di Centrale e la

successiva risalita di particelle (anche fino al layer 2) è una conferma dell'uplift descritto precedentemente, risalita ancora più evidente al di là dell'incrocio con il passante, dove in figura 51 le componenti verticali del flusso sono assai sviluppate.

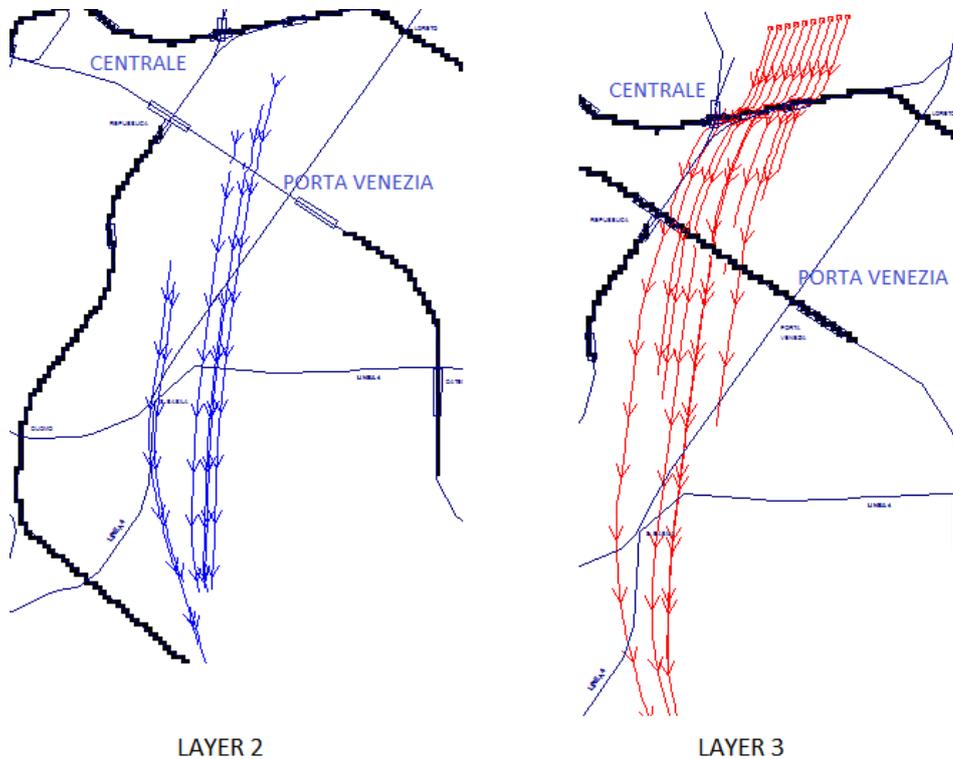


Figura 58 - Passaggio delle traiettorie attraverso il layer 2 e il layer 3

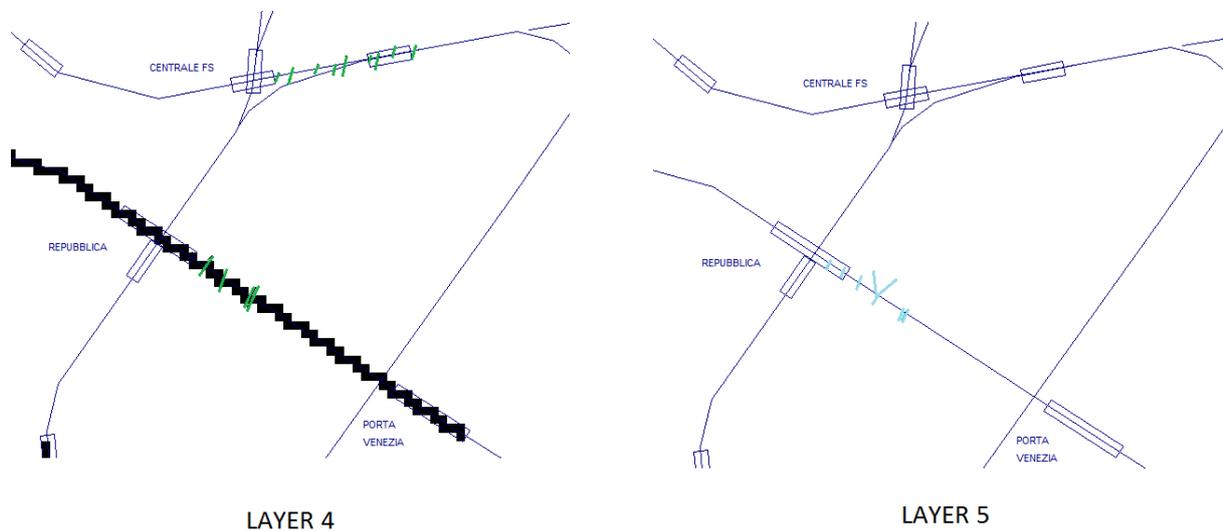


Figura 59 - Particolare del passaggio delle traiettorie attraverso il layer 4 e il layer 5

Una correlazione più immediata è riscontrabile anche con l'andamento della piezometria di figura 46: le traiettorie si sviluppano in quell'area dove si assiste ad una netta diminuzione del gradiente piezometrico e la direzione generale del flusso non è più verso SE, ma semplicemente verso S; come conseguenza era lecito aspettarsi un andamento verticale delle particelle in MODPATH, ossia con direzione pressoché unica verso Sud.

Si effettua un'altra simulazione in forward tracking in prossimità della stazione di Porta Garibaldi, sempre attraverso un set di 10 particelle con tempo di simulazione pari a 10^7 secondi, poste al top del layer 3 poiché anche in questo caso gli elementi impermeabili si sviluppano su più layer, dal 2 passando al 3 fino al quarto layer nella tratta tra Porta Garibaldi e Gioia (figura 60).

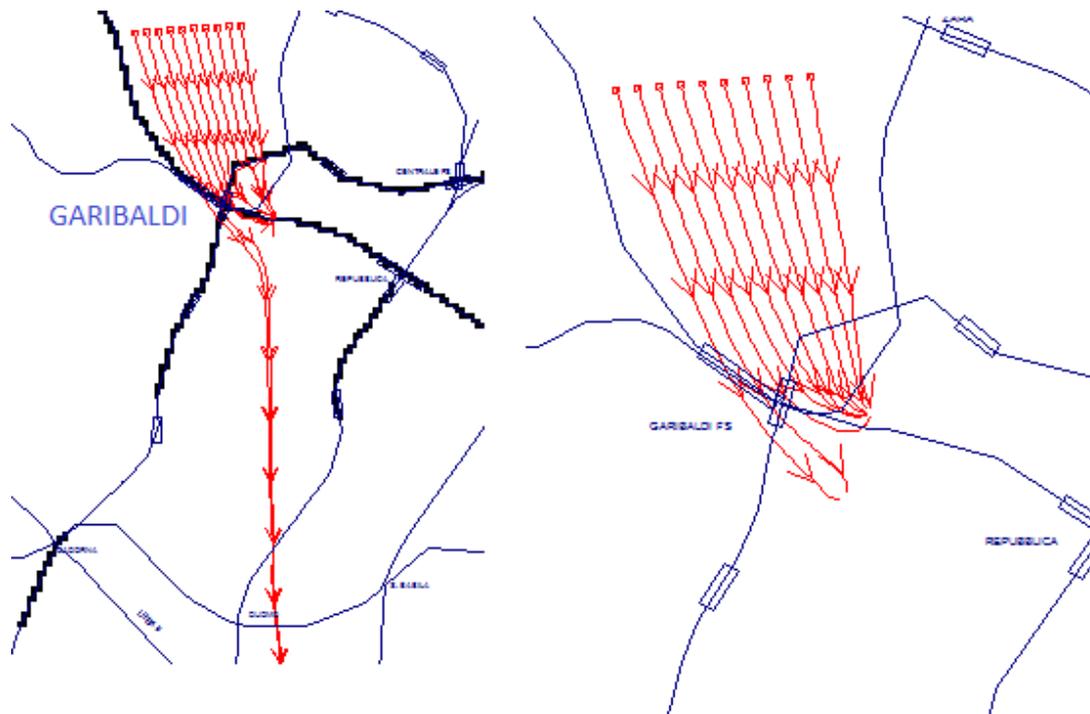


Figura 60 - Traiettorie di particelle con punto di partenza in zona Porta Garibaldi in modello raffinato (a sx) e in modello iniziale (a dx)

Si assiste ad una sensibile variazione delle traiettorie di flusso in relazione all'ingente snodo di trasporti, non riscontrabile nel modello base; ma si crea una situazione particolare: anche per tempi di simulazione più elevati le traiettorie terminano a breve distanza dal punto di partenza: questo fenomeno è dovuto alla presenza in zona di una notevole quantità di pozzi di pompaggio che richiamano a sé le particelle, escludendole dal sistema acquifero. Si ottiene una nuova correlazione con quanto capito da MODFLOW: come visto in alcune sezioni trasversali (ad esempio fig. 53 e 54), i pozzi costituiscono una variabile importante nella definizione del flusso idrico sotterraneo.

Si studiano comunque i passaggi delle particelle attraverso i vari layers in figura 61.

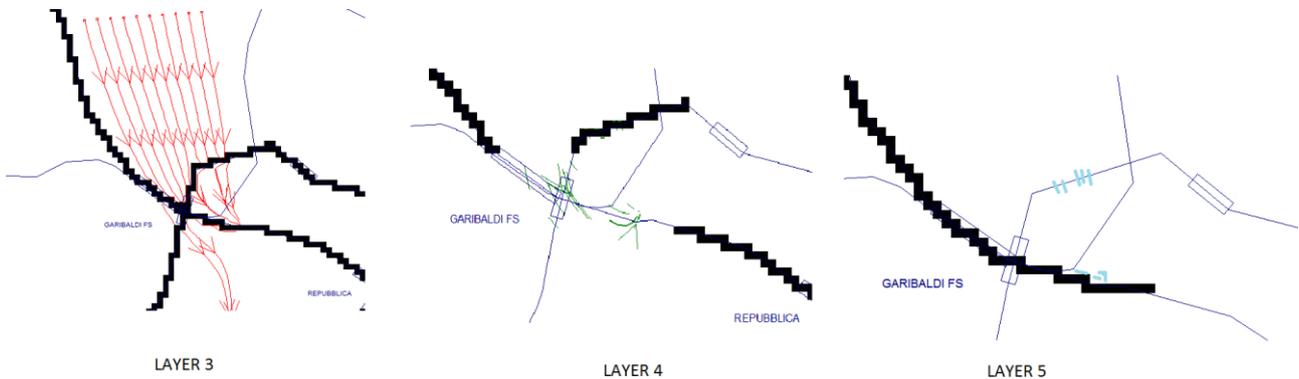


Figura 61 - Particolare del passaggio delle traiettorie attraverso il layer 3, il layer 4 e il layer 5

In prossimità degli elementi impermeabili le particelle che giungono esattamente verso il corpo della stazione di Garibaldi non trovano più ostacolo nel layer 4: oltrepassano il manufatto scendendo per poi risalire se continuano il loro percorso (le due particelle più a sinistra), oppure scendendo per poi raggiungere i pozzi insistenti nella zona. Le particelle che invece trovano davanti a sé il tratto verso la stazione Gioia sviluppano una forte componente verticale verso il basso, superano l'ostacolo nel layer 5, risalgono grazie al solito meccanismo di uplift con componente verticale verso l'alto e escono dal sistema acquifero essendo richiamate dai prelievi.

Ritornando all'andamento generale piezometrico di figura 46, in questo caso si ha inizialmente una traiettoria verso SE poiché non si è ancora entrati appieno nella zona di depressione piezometrica e il flusso idrico sviluppa ancora il suo andamento tradizionale e naturale; le particelle non prelevate dai pozzi invece, come giusto che sia, procedono verso S, dato l'arrivo nella vera e propria depressione nel centro città che porta ad avere linee piezometriche quasi orizzontali (cioè in direzione O-E).

Si specifica che in figura 60 la presenza nel modello avanzato delle particelle che proseguono il loro percorso nonostante l'azione dei pozzi è un'implicazione dell'inserimento delle strutture sotterranee: la loro presenza porta una variazione della profondità di scorrimento delle particelle d'acqua che non vengono più emunte dai pozzi, come invece avveniva nel caso indisturbato.

3.7 Conclusioni per lo scenario attuale

L'andamento del livello di falda e il flusso idrico sotterraneo sono stati studiati considerando lo sviluppo attuale del sistema di trasporti sotterraneo dell'area di Milano, i noti prelievi idrici dai numerosi pozzi di pompaggio insistenti nel territorio e le odierne condizioni naturali e climatiche. Le analisi effettuate hanno portato a determinare come sistema acquifero superficiale e rete dei trasporti sotterranea siano fortemente interferenti l'uno con l'altra: la presenza delle strutture

metropolitane modifica localmente il livello della falda, provoca variazioni di direzione e modulo della velocità del flusso e interferisce con il trasporto dei contaminanti, così come lo stesso movimento idrico sotterraneo, oltre a semplici infiltrazioni in gallerie non impermeabilizzate, può provocare fenomeni pericolosi quali erosione o spinte di sollevamento non considerate in fase progettuale.

In particolare si può riassumere quanto segue:

- la presenza di strutture sotterranee non influenza a carattere generale l'andamento dell'altezza di falda, ma genera variazioni diffuse del livello piezometrico, in particolare all'interno della depressione creatasi nel centro della città
- a livello locale la presenza di elementi strutturali impermeabili influenza il livello piezometrico, generando deformazioni delle linee isopiezometriche in prossimità del manufatto, in particolare se esso è ortogonale alla direzione del flusso
- sempre a livello locale la direzione del flusso definita dal vettore velocità varia per la presenza delle strutture, sviluppando ingenti componenti verticali sia verso il basso che verso l'alto, più pericolose per la loro azione di spinta di sollevamento
- il flusso idrico subisce una doppia influenza dipendente sì dalle strutture impermeabili nel sottosuolo, ma anche dalla presenza di pozzi di pompaggio, i quali a loro volta modificano la direzione del flusso e i corrispondenti vettori velocità, mostrando l'azione di richiamo fino a centinaia di metri dalla propria ubicazione; ne deriva una conferma di come la conoscenza dei prelievi idrici da queste fonti è fondamentale per descrivere l'andamento della falda, così come la previsione di scenari futuri per l'andamento dei prelievi possa aiutare a prevedere futuri innalzamenti del livello idrico
- i maggiori valori del modulo della velocità al di sotto delle strutture possono provocare pericolosi fenomeni di erosione per la stabilità della struttura.

Capitolo 4: Gli scenari futuri

Si è caratterizzato il flusso sotterraneo alle odierne condizioni di sviluppo cittadino e climatiche, con gli attuali emungimenti da pozzi; da quanto definito nel capitolo 2, risulta però evidente come i principali fattori influenzanti il sistema idrico sotterraneo siano in continua evoluzione: così come in passato si è assistito a grandi cambiamenti socioeconomici che hanno portato a sensibili variazioni delle caratteristiche della falda superficiale, anche in futuro si prospettano ulteriori modifiche delle condizioni sociali, economiche, ma anche climatiche (tutte già in atto oggi). È chiaro quindi che grazie alla conoscenza dei progetti in fase di sviluppo riguardanti il tessuto dei trasporti e alle previsioni sui fattori determinanti sia possibile prevedere l'evoluzione dell'andamento dei livelli acquiferi futuri: si mostrerà ora come questi ultimi sono attesi variare in funzione della costruzione della linea 4 della metropolitana, della variazione della quantità dei prelievi idrici dai pozzi di pompaggio e dei cambiamenti climatici dal breve al lungo termine.

4.1 La nuova linea metropolitana 4

Il sistema delle infrastrutture sotterranee metropolitane è in continua crescita; nonostante il numero della popolazione milanese sia in trend negativo ormai da svariati anni e non sembri destinato a invertirsi, numerosi sono i progetti per l'ampliamento dei trasporti sotterranei in fase di ultimazione, se non in fase di costruzione: infatti, come segnalato al capitolo 2, la nuova linea metropolitana 4 completamente interrata è destinata ad allargare ulteriormente il sistema su rotaia sotterraneo, con entrata in funzione dal 2022, portando Milano ad avere la sesta rete metropolitana più grande d'Europa. Si vuole perciò verificare inizialmente se questa nuova opera possa influenzare il movimento idrico nel sottosuolo e se possa procurare nuove problematiche nelle intersezioni con le altre linee del sistema di trasporto.

Dal punto di vista piezometrico, la linea 4 non modifica l'andamento del tetto di prima falda risultante dal modello raffinato. Si sceglie di presentare l'andamento piezometrico ristretto all'area percorsa dal tracciato della nuova linea (figura 62).

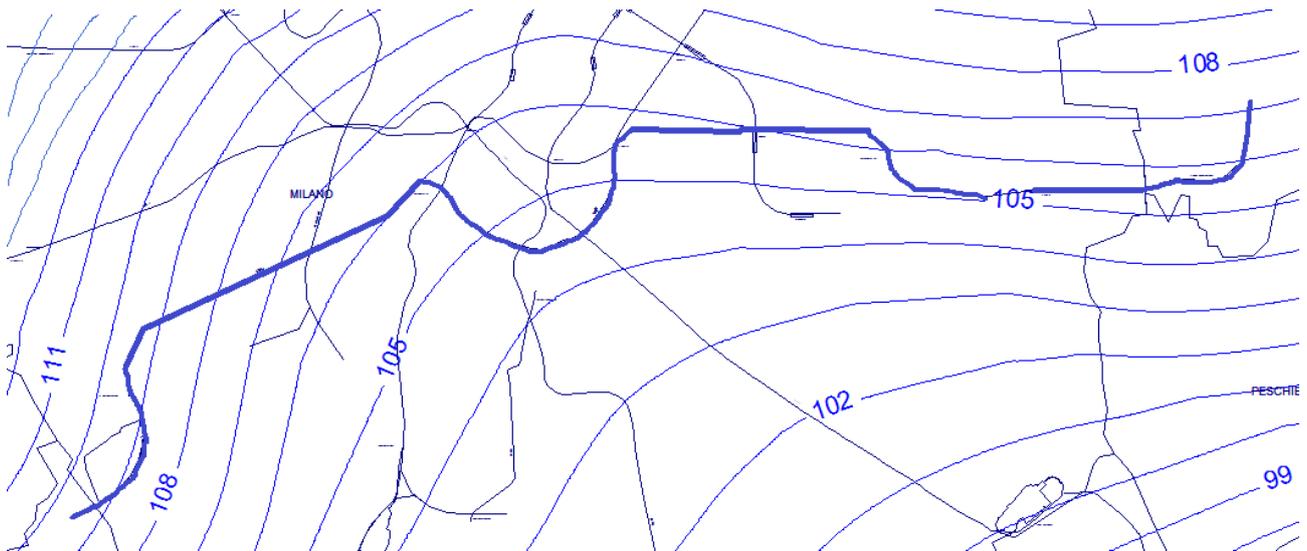


Figura 62 - Andamento della piezometria lungo il percorso della linea 4

L'infittimento delle linee isopiezometriche mostra come il loro andamento rispecchi quello della figura 46; nella parte orientale della linea 4 questa assenza di cambiamenti significativi è da ricercarsi nella superficialità della tratta, dove l'interazione con la falda è minima se non assente (come nel tratto da San Babila a Forlanini Q.re). Si può dedurre che quegli spostamenti localizzati delle linee piezometriche riscontrati nel modello raffinato rispetto al caso indisturbato siano dovuti all'inserimento contemporaneo nel modello di più strutture sotterranee diversificate (i cui singoli effetti vanno a sommarsi), mentre una singola tratta non riesce a generare un apprezzabile cambiamento. A conferma di quanto detto, si riporta in figura 63 i valori della variazione piezometrica del livello acquifero rispetto al modello raffinato rappresentante la situazione attuale: si nota come gli abbassamenti piezometrici (*drawdown*) a monte della struttura metropolitana (colore rosso) e gli innalzamenti a valle dell'elemento impermeabile (colore azzurro) sono assai piccoli, nell'ordine dei pochi centimetri, mentre l'intera area non interessata dal passaggio della tratta in questione non subisce cambiamenti. È ben visibile inoltre la differenza tra zona Est della tratta che non presenta variazioni significative e la zona Ovest che raccoglie i massimi drawdown piezometrici causa maggior interazione con la falda.

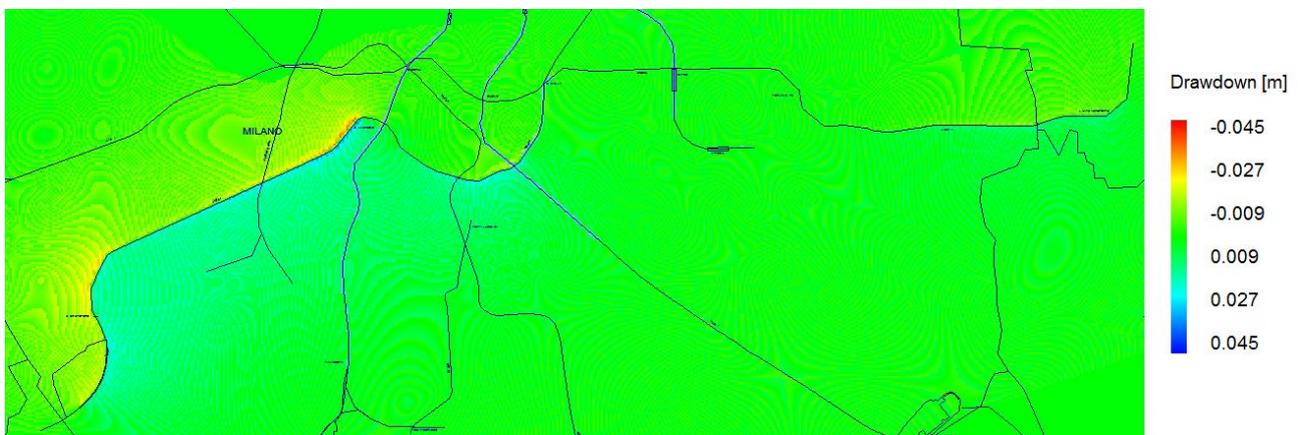


Figura 63 - Variazione piezometrica indotta dall'inserimento della linea 4

Nonostante la mancanza di effetti sensibili sull'andamento piezometrico, la presenza di una nuova struttura sotterranea porta a interferire coi preesistenti elementi strutturali: in particolare si monitorano le intersezioni con le linee esistenti e si trovano le seguenti situazioni d'interferenza, nell'incrocio con la linea 3 nei pressi di Crocetta e nella stazione di San Babila (figura 64).

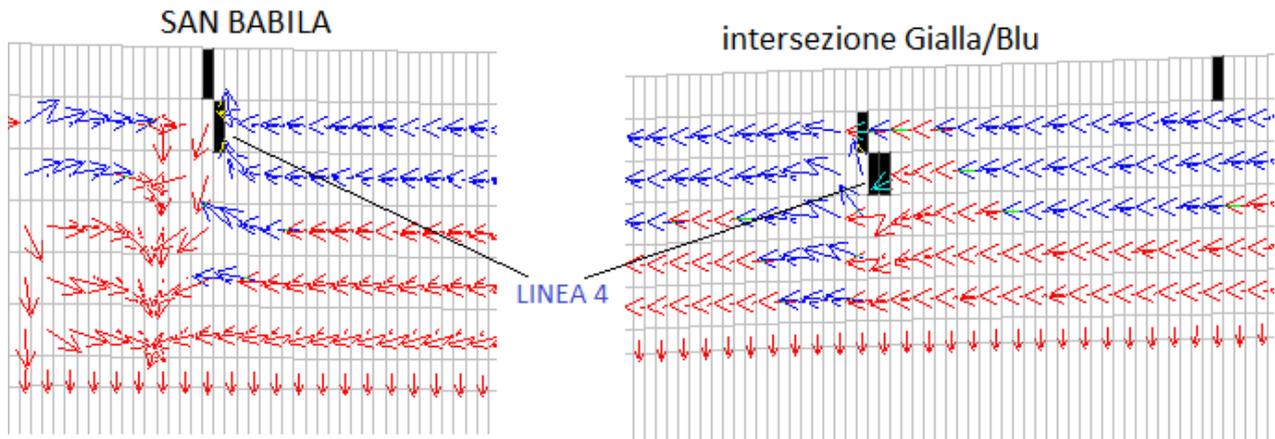


Figura 64 - Interferenza della linea 4 su preesistenti strutture metropolitane

Si nota il tipico sviluppo di componenti verticali del vettore velocità in prossimità degli elementi strutturali della linea 4, che portano il flusso idrico a muoversi verso l'alto, andando a provocare una spinta di sollevamento sulla struttura sovrastante che in entrambi i casi non è presente con l'odierna configurazione dei trasporti. Nel caso della stazione di San Babila, la risalita delle acque sotterranee avrebbe un doppio effetto: la linea 1 (insistente nel layer più superficiale) potrebbe vedersi interessata da un fenomeno di infiltrazione, totalmente non considerato in fase di progettazione (per la linea 1, prima ad essere costruita, non si era previsto l'influenza della falda tantomeno un possibile innalzamento piezometrico futuro, quindi è assente l'opera di impermeabilizzazione), oltre che dalla sopracitata spinta idrica sulla struttura.

4.2 La variazione delle precipitazioni

Il cambiamento climatico in atto a scala globale porta a modificare fattori ambientali che influenzano la disponibilità d'acqua nel suolo: l'atteso aumento delle temperature, lieve ma costante (previsto dalla totalità degli studi mostrati al paragrafo 2.3.1) può in generale influire sull'umidità relativa, sull'umidità del suolo e sull'evapotraspirazione (fattore importante che però non è stato considerato nei modelli sviluppati causa uso del suolo e urbanizzazione dell'area milanese); il previsto calo delle precipitazioni (anch'esso con previsioni praticamente univoche se non per lievi discordanze nell'ammontare effettivo della percentuale di decrescita) provoca invece direttamente una diminuzione della ricarica atmosferica al terreno con conseguente minore infiltrazione d'acqua nel sottosuolo. Si stima ora l'eventuale effetto della diminuzione delle precipitazioni sulla falda milanese; si è visto dalla tabella 7 come a breve termine non si assiste ad un trend univoco per tutte le stagioni (in inverno la pioggia è stimata crescere), si sceglie quindi di

mediare i valori percentuali pesando maggiormente quello autunnale, periodo in cui le precipitazioni sono più copiose nel territorio milanese, definendo un calo del 5% delle precipitazioni nel breve-medio termine. In Groundwater Vistas l'effetto delle piogge è valutabile tramite il concetto del recharge, quindi in modo del tutto proporzionale si diminuiscono del 5% i valori inizialmente inseriti nella parte settentrionale del dominio, mentre per la zona meridionale dove circa metà dei contributi al recharge è dato dall'irrigazione li si diminuiscono solo del 2.5% (senza variazione nella parte centrale dove solo le perdite idriche danno un contributo) e si valutano gli effetti sulla piezometria.

Si riportano in tabella 17 i tre nuovi valori di recharge assegnati alle aree (come in figura 31) sia per una diminuzione di precipitazioni pari al 5% che per una decrescita del 20%:

	Recharge -5% [m/s]	Recharge -20% [m/s]
zona Sud	$6.14 \cdot 10^{-8}$	$5.67 \cdot 10^{-8}$
zona centrale	$2.5 \cdot 10^{-10}$	$2.5 \cdot 10^{-10}$
zona Nord	$3.325 \cdot 10^{-8}$	$2.8 \cdot 10^{-8}$

Tabella 17 - Valori di recharge per gli scenari futuri a precipitazioni in diminuzione

Si studia inizialmente la variazione piezometrica rispetto alla situazione odierna per i due casi trattati: si arriva per lo scenario con maggiore riduzione di precipitazioni ad un drawdown fino a 1 metro (colore blu in figura 65) nella parte nord-occidentale del dominio, dove però si ha poca presenza di strutture sotterranee che ne potrebbero giovare; una così netta differenziazione rispetto alla parte orientale è da ricercarsi nella distribuzione del campo di permeabilità: a Ovest non si raggiungono mai i più alti valori del parametro, quindi con una netta diminuzione della ricarica dall'alto, il terreno è meno propenso a veicolare acque nel sottosuolo rispetto a quelle zone con uguale ricarica ma permeabilità maggiore; come conseguenza della minore presenza d'acqua, il livello piezometrico sarà più basso.

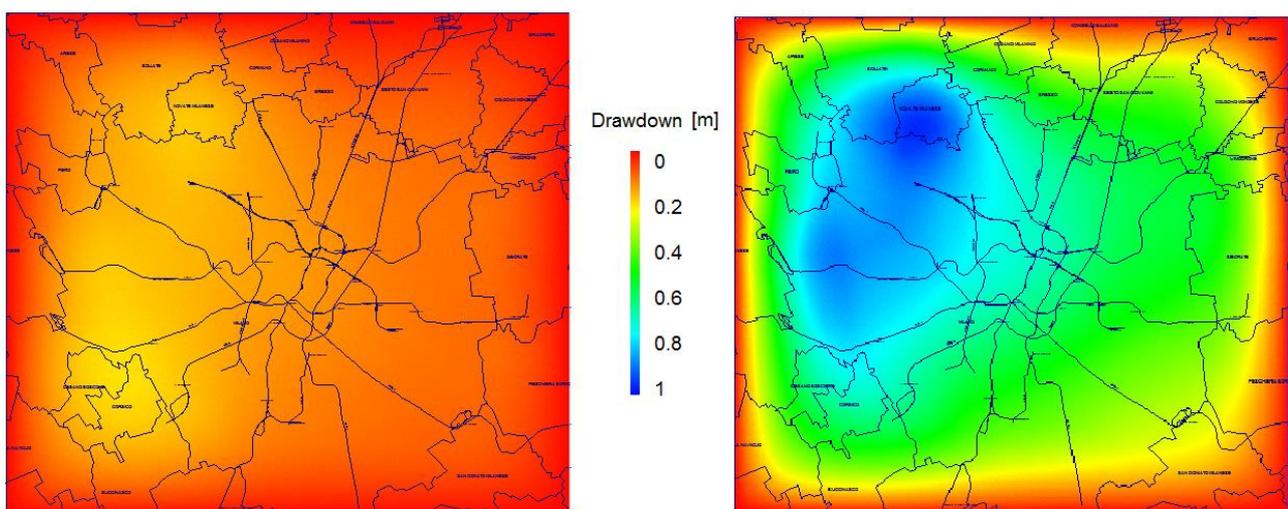


Figura 65 - Variazioni piezometriche indotte dalla diminuzione delle precipitazioni: riduzione del 5% (sx) e riduzione del 20% (dx)

Per il primo scenario di variazione meteorica gli effetti sono decisamente inferiori con valori massimi di abbassamento pari a 20 centimetri; si mostra comunque in figura 66 la piezometria ristretta alla zona centrale del dominio, dove, per la presenza della depressione piezometrica e di un inferiore gradiente di variazione del livello idrico, sono più apprezzabili i comportamenti delle isopieze.

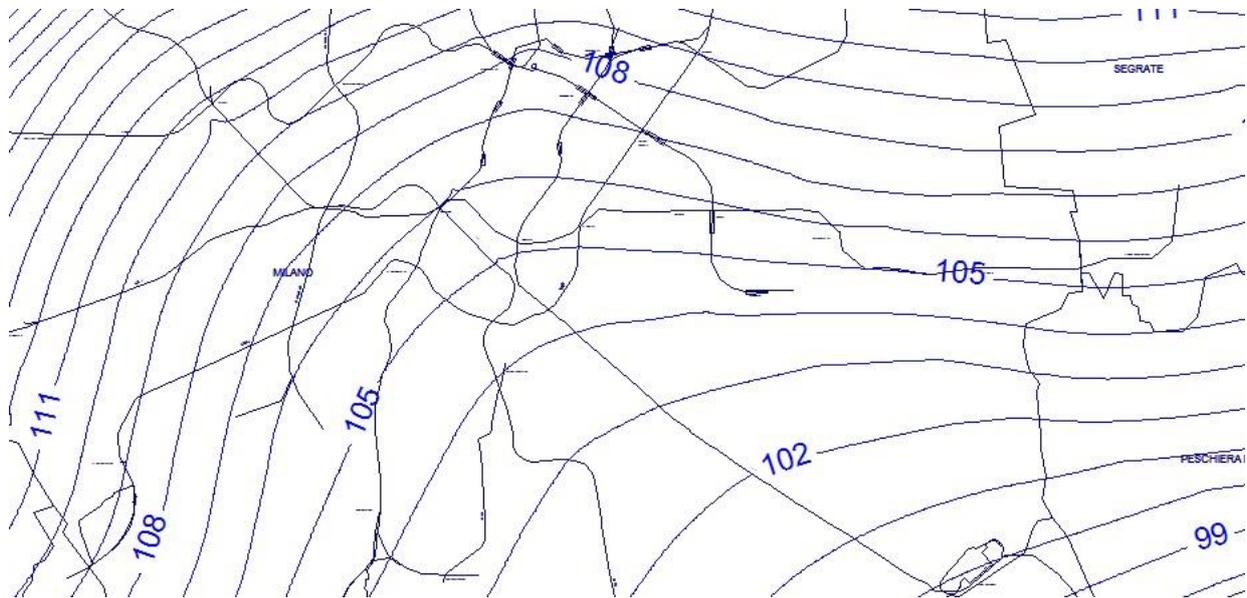


Figura 66 - Particolare dell'andamento della piezometria per lo scenario futuro recharge al -5%

Si nota come la decrescita della ricarica non apporti sostanziali modifiche all'andamento piezometrico: infatti la ricarica da piogge nell'area milanese risente fortemente delle già citate condizioni di ampia urbanizzazione del suolo, che portano ad avere valori di partenza del recharge decisamente bassi, e una loro minima variazione non può generare forti cambiamenti. Tuttavia sono visibili in confronto con la figura 62 chiari spostamenti verso l'alto di tutte le linee piezometriche, in particolare all'interno della depressione che contraddistingue il centro cittadino: tra le isopieze pari ad un livello di 103 fino a 108 si nota una differenza che localmente raggiunge anche la decina di centimetri. Naturalmente diminuendo la ricarica, diminuisce l'acqua disponibile nel sottosuolo, quindi per uno stesso punto del dominio il livello piezometrico varia abbassandosi. Sebbene l'andamento generale non subisca variazioni e questa sola diminuzione di ricarica sia soltanto uno dei numerosi fenomeni variabili, si conclude quindi che un seppur minimo cambiamento di un fattore influenzante apporti modifiche al sistema, il quale subirà in realtà la sovrapposizione degli effetti di più fenomeni diversificati.

A lungo termine si stimano delle variazioni maggiori in termini di precipitazione: secondo gli stessi principi descritti per il breve periodo, si mostrano gli effetti di un calo di precipitazione pari al 20% (situazione prevista per fine secolo), corrispondente ad una decrescita del recharge nel modello del 20% nella zona settentrionale e del 10% in quella meridionale.

In questo caso aumentano ancora gli abbassamenti piezometrici, i quali superano il mezzo metro per le aree più interne alla depressione piezometrica, come mostrato in figura 67.

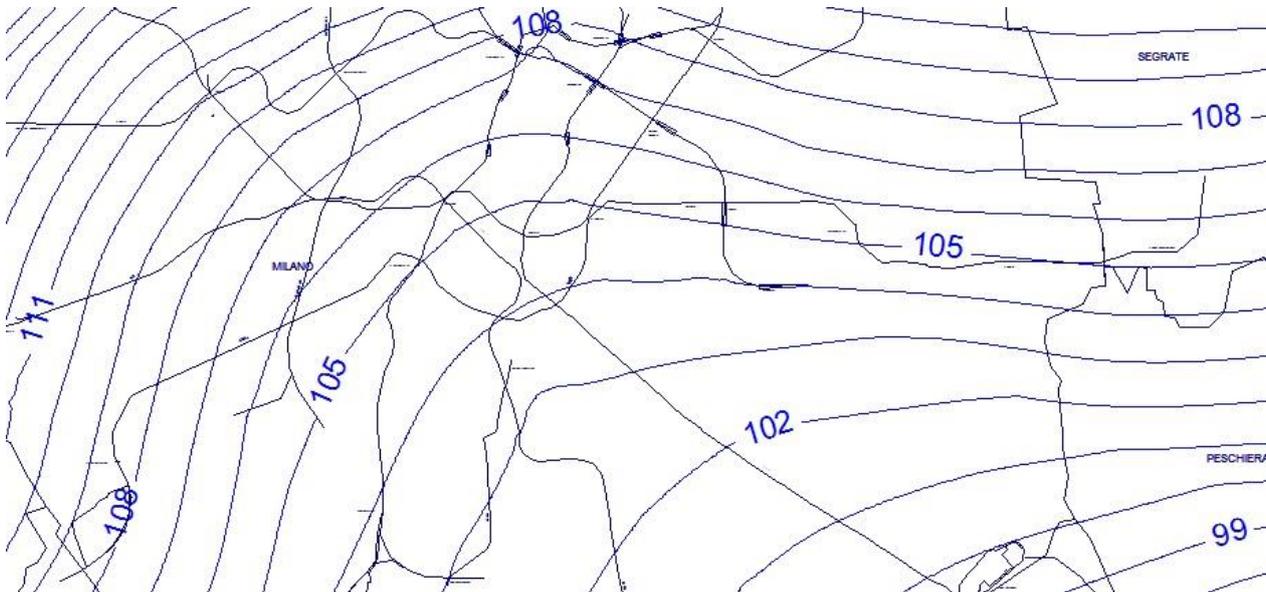


Figura 67 - Particolare dell'andamento della piezometria per lo scenario futuro recharge al -20%

Il maggiore abbassamento del tetto di falda trova conferma nella valutazione delle celle che si troverebbero in condizioni secche: il loro numero aumenta circa del 10% rispetto al caso con diminuzione di recharge pari al 5%: nella figura 68 si nota che stazioni come quelle di Cadorna e Loreto vedrebbero pressoché annullata la presenza d'acqua per la parte di struttura insistente nel layer 2 (presenza visibile per la stazione di Cadorna alle condizioni attuali in figura 47).

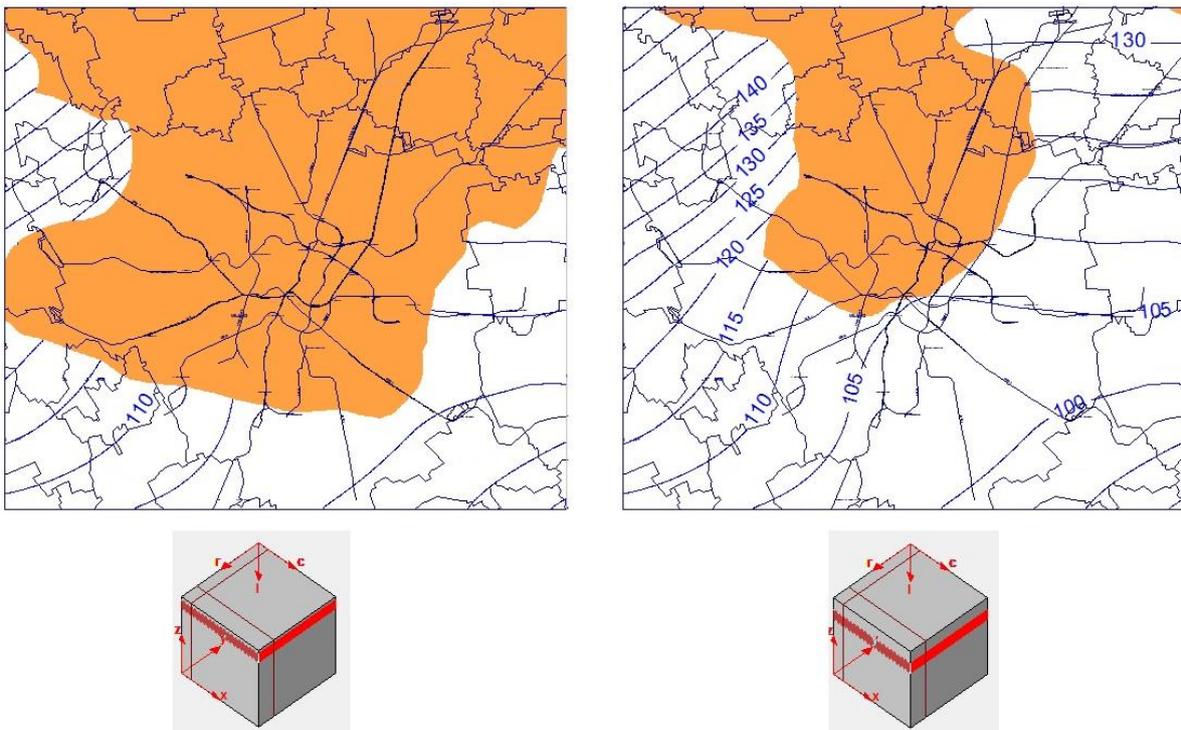


Figura 68 - Dry cells previste con un calo di precipitazione a lungo termine pari al 20%

4.3 La variazione dei prelievi idrici

Al capitolo 2 si è anche discusso del futuro andamento dei prelievi idrici che in dipendenza della diminuzione costante di popolazione residente e del cambiamento dell'uso del suolo della periferia milanese (con meno aree destinate all'irrigazione) dovrebbe subire un drastico calo. È opportuno perciò studiare con attenzione anche questo fattore, considerato quanto l'azione dei pozzi di pompaggio influisca sui flussi idrici sotterranei e sulla permanenza nel sistema acquifero delle acque. Sulla previsione della loro decrescita non si assiste però alla stessa univocità di risultati che si è riscontrato per le precipitazioni: si decide di analizzare innanzitutto un caso di diminuzione dei prelievi pari al 20% (seguendo le analisi di Milano *et alii*, 2012) per poi verificare gli effetti di uno scenario futuro dimezzando gli attuali valori di emungimento da pozzi (secondo quanto definito da Francani, 2012).

Per simulare la condizione con prelievi inferiori si pongono le portate di emungimento dei pozzi del modello a dei valori pari al 20% in meno delle attuali.

Si ottiene una sensibile crescita del livello piezometrico che è mostrata in figura 69.

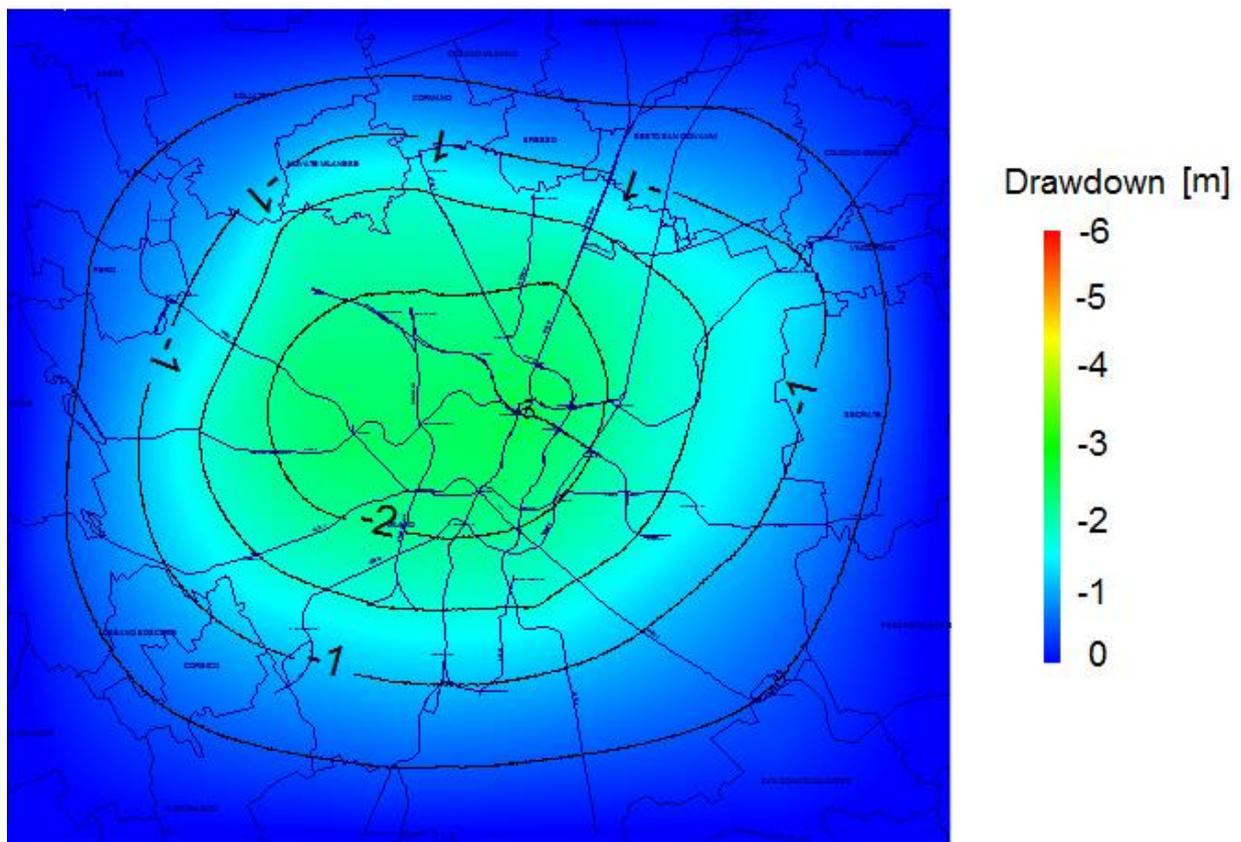


Figura 69 - Variazioni piezometriche rispetto alla situazione attuale indotte dalla diminuzione dei prelievi idrici pari al 20%

In confronto alla situazione odierna di carico idrico, si ha un costante aumento dei valori piezometrici procedendo verso il centro del dominio, poiché la quantità dei pozzi, e di conseguenza dei prelievi, nel centro città fa sì che si risenta maggiormente della diminuzione degli

emungimenti. Essendo i punti di prelievo meno numerosi in qualsiasi direzione mano a mano che si procede verso le periferie, non si assiste qui a variazioni locali del livello piezometrico (come invece si avrebbe per le variazioni di precipitazioni, dipendenti in primis dalla permeabilità), ma si ottiene la variazione concentrica di figura 69 fino ad un massimo innalzamento di 2.5 metri in zona Porta Garibaldi (si ricorda qui la grande presenza di pozzi di prelievi nella suddetta area).

Si ottiene inoltre il seguente andamento piezometrico di figura 70.

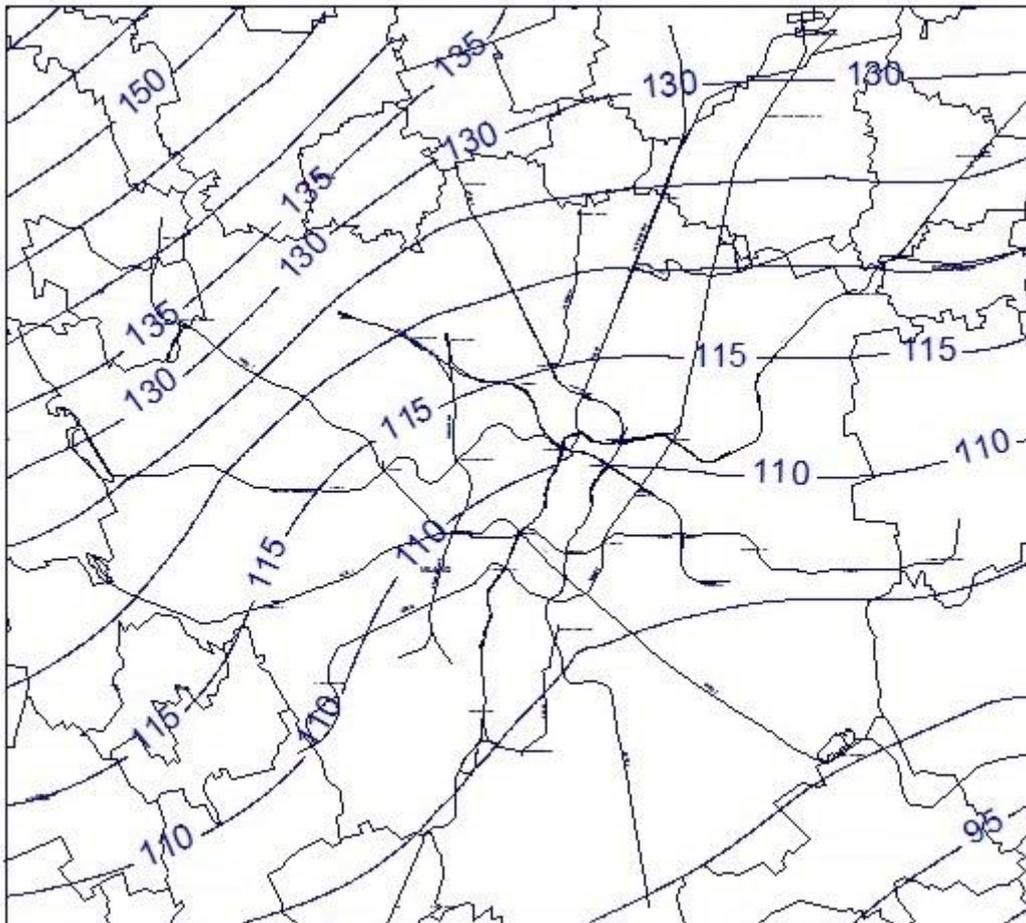


Figura 70 - Andamento della piezometria per scenario futuro con decrescita dei prelievi pari al 20%

Si nota un forte cambiamento del profilo generale della piezometria: se al confine Sud del comune di Milano e al confine Nord si hanno rispettivamente le isopieze di 100 metri e 130 metri circa, ossia quei valori piezometrici riscontrabili per la situazione attuale o per gli scenari futuri sopra descritti, nel centro città la situazione è ben diversa: i livelli della falda sono decisamente più alti, in particolare lo spostamento verso Sud delle linee piezometriche 105-110 determina un ritorno ad un andamento più naturale, con scomparsa parziale della depressione piezometrica caratterizzante il centro città dagli anni '70; si tornerebbe infatti a trovare un andamento del tetto di falda più simile a quello pre boom economico (vedesi figura 19), quando gli ingenti prelievi dovuti alle attività industriali non erano ancora sfruttati.

Come conseguenza dei livelli acquiferi tornati ad altezze importanti, si presentano le celle del dominio in condizioni secche in figura 71: soprattutto per il layer 2, la drastica diminuzione del loro numero indica la forte risalita delle acque sotterranee.

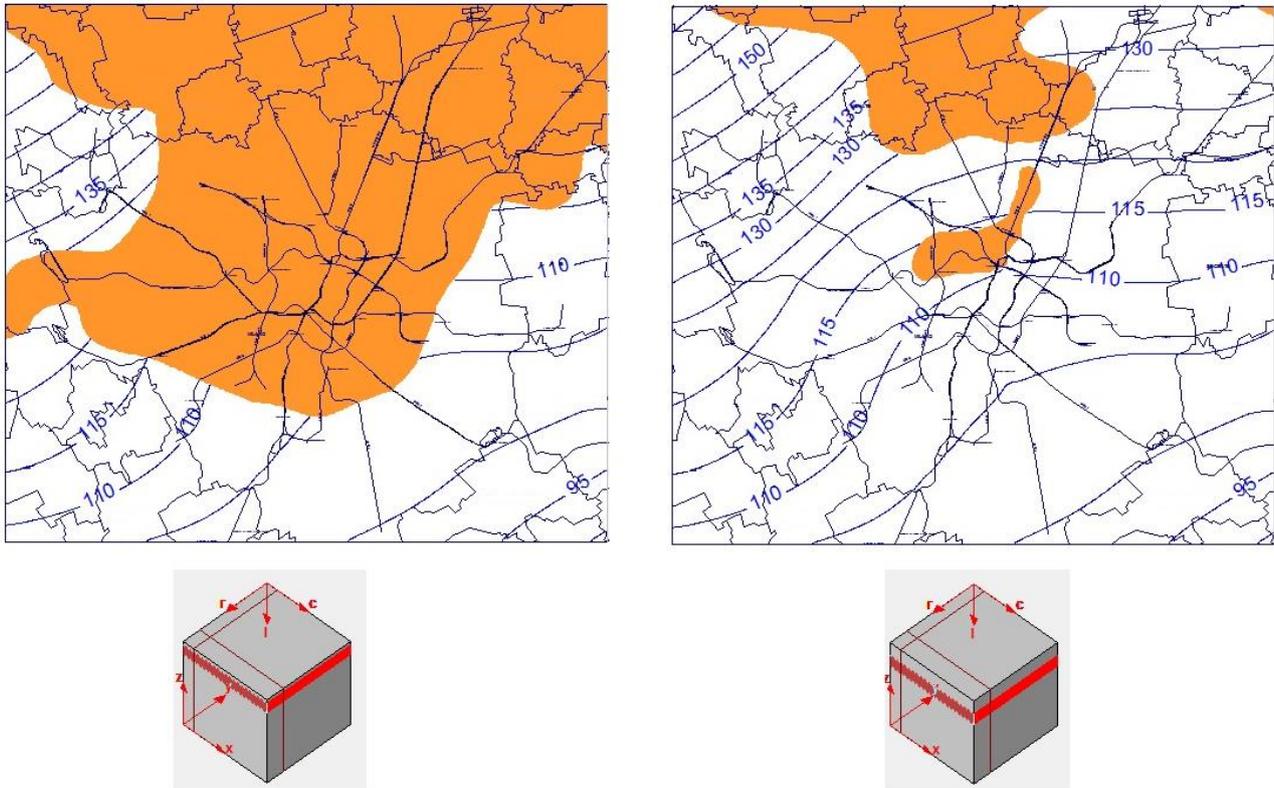


Figura 71 - Dry cells previste con una diminuzione dei prelievi a medio termine pari al 20%

L'effetto della diminuzione dei prelievi non può che essere opposto a quello della decrescita delle precipitazioni: se nel caso già descritto si avrebbe minor quantità d'acqua in entrata nell'acquifero, nel caso in questione si ha un minore quantitativo in uscita dal sistema attraverso i pozzi, perciò più acqua che si accumula nel sottosuolo e che si spinge verso la superficie; questa risalita ha effetti negativi per le strutture sotterranee: in figura 71 si vede come varie tratte metropolitane inserite nel layer 2 risentano ora della presenza della falda, come la stazione di Lanza e di Centrale.

Si spiega bene questa situazione studiando il comportamento del flusso idrico per le stesse sezioni trasversali nelle stazioni del paragrafo 3.5.1: si nota come per la stazione di Cadorna il movimento idrico che scorre nel layer 2 a monte del manufatto inizi ben più a Nord, dove prima non erano presenti vettori velocità; il flusso crea così una maggiore spinta sul lato a valle della struttura, identificabile grazie alle ingenti componenti verticali verso l'alto. In Porta Garibaldi il livello piezometrico più elevato porta ora ad avere presenza acquifera a valle della struttura nel layer 2, creando un sistema di forze spingenti non considerato in fase di progettazione. Infine anche in Centrale si caratterizza un flusso d'acqua che risale a valle dell'elemento impermeabile fino al layer 2, portando ad avere un livello di falda che sommerge completamente più a valle il tunnel del passante ferroviario appena a Sud della stazione di Repubblica (figura 72).

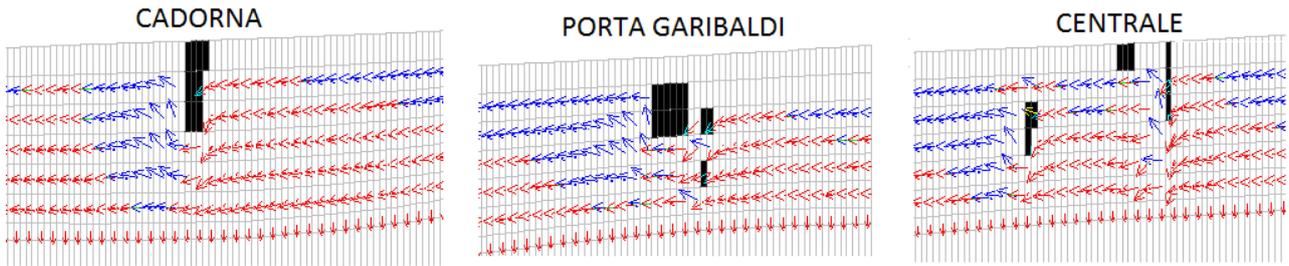


Figura 72 - Variazione del flusso idrico in prossimità delle stazioni metropolitane principali per uno scenario futuro con decrescita dei prelievi pari al 20%

Nel caso di drastica diminuzione dei prelievi fino al dimezzamento delle attuali portate di emungimento si assisterebbe ad un ulteriore innalzamento del livello piezometrico, come da figura 73.

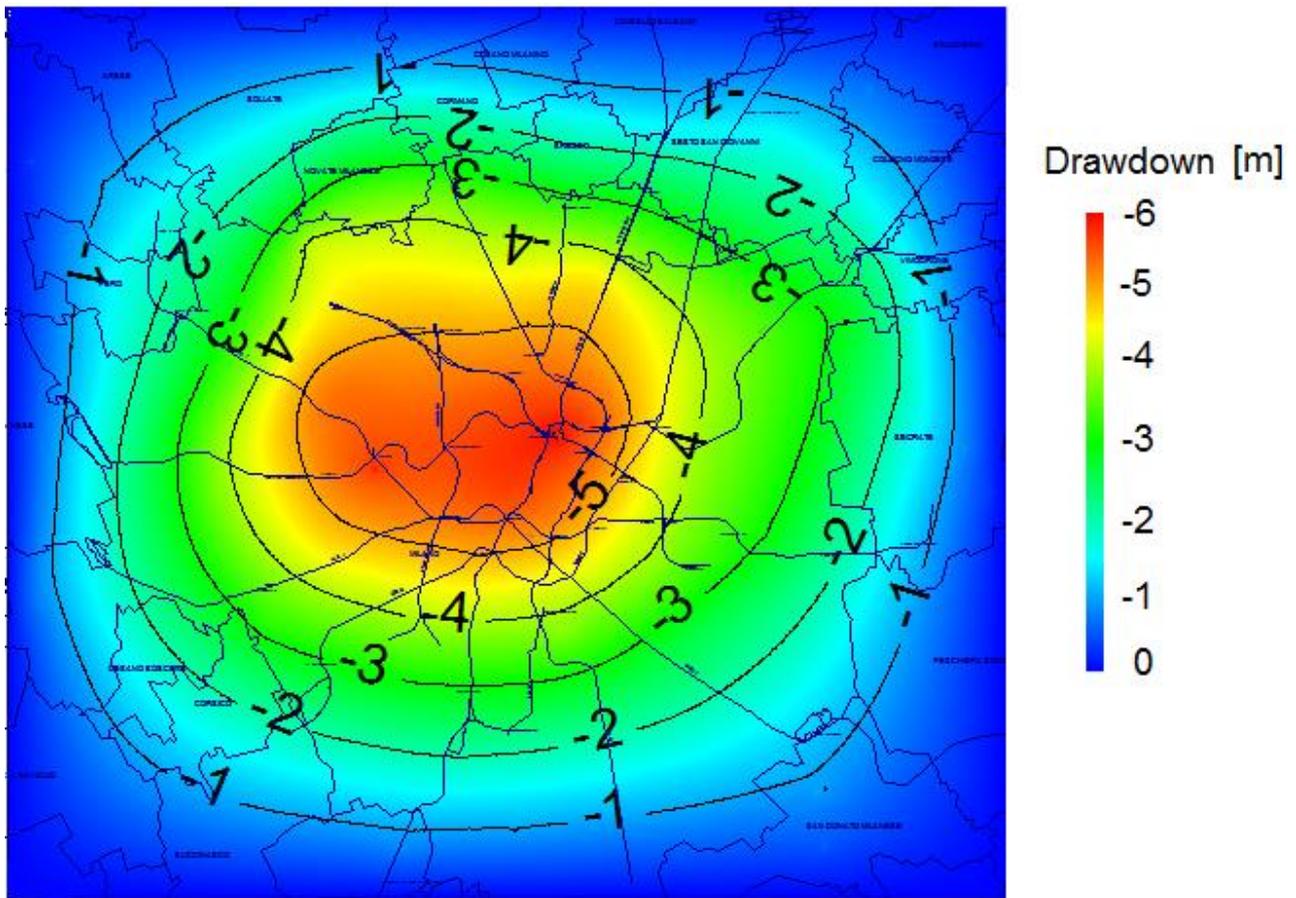


Figura 73 - Variazioni piezometriche rispetto alla situazione attuale indotte dalla diminuzione dei prelievi idrici pari al 50%

L'andamento concentrico uniforme riscontrato precedentemente è mantenuto, ma gli innalzamenti piezometrici sono ben più marcati, con valori che raggiungono i 6 metri sempre nella zona di Porta Garibaldi. Ingenti sarebbero le conseguenze sulle strutture metropolitane, soprattutto in termini di forze idrauliche da contrastare.

Dalla piezometria di figura 74 si nota un maggiore appiattimento delle linee piezometriche nel centro città con il livello pari a 115 metri ormai in prossimità del tratto di linea 2 tra Garibaldi e Centrale (attualmente caratterizzato da un'altezza di falda di 109 metri), l'isopiezia di 110 metri passante per la zona del Duomo (oggi con un livello piezometrico di 5 metri inferiore) e l'altezza di falda dei 105 metri completamente fuori dal centro storico.

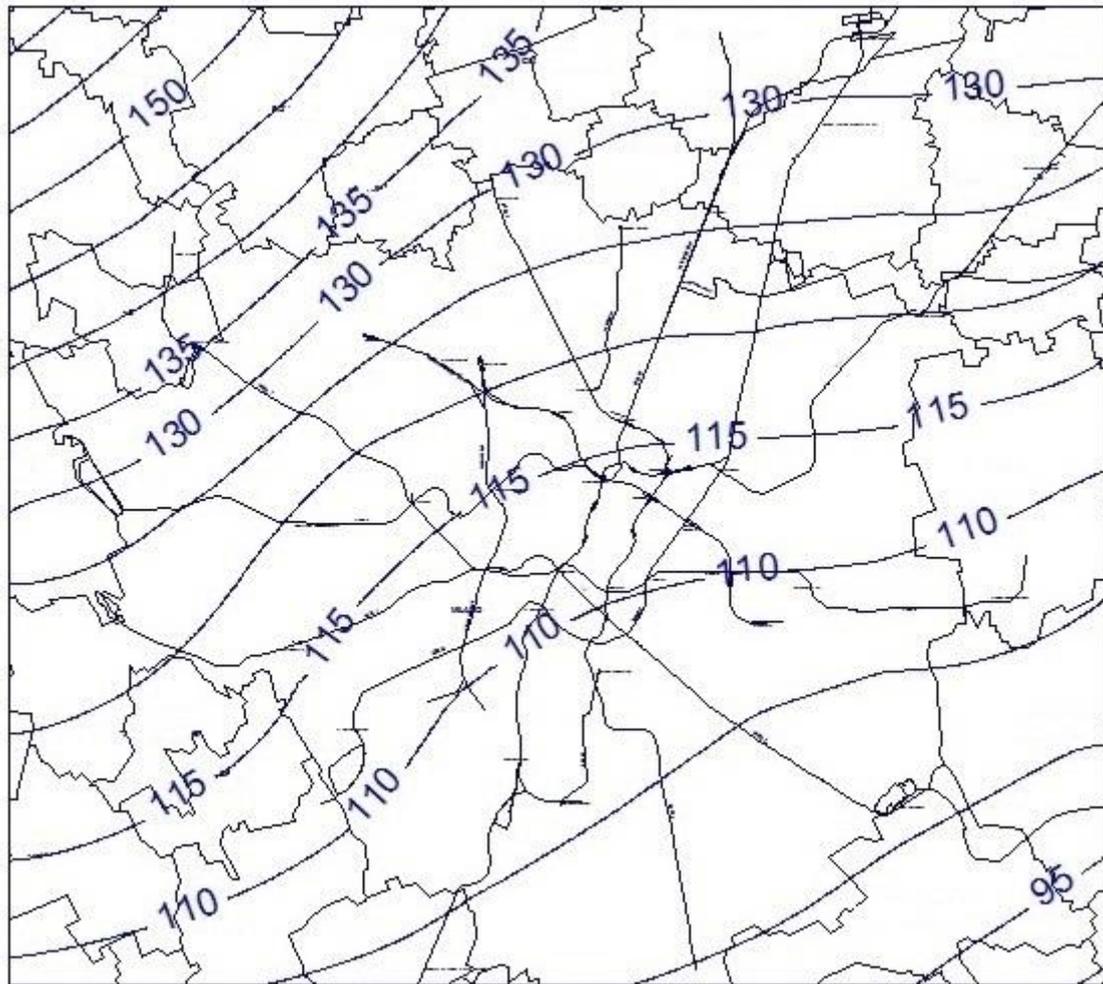


Figura 74 - Andamento della piezometria per scenario futuro con decrescita dei prelievi pari al 50%

Prima conseguenza sarebbe la scomparsa definitiva della depressione piezometrica tipica della zona centrale del territorio milanese, che l'elevato sfruttamento delle acque in epoca di sviluppo economico aveva creato, definendo un gradiente costante tra le varie linee piezometriche e una direzione di flusso più assimilabile a quella dell'intera zona padana, verso Sud-Est.

Questo ritorno al comportamento pre boom economico porterebbe inoltre a non avere più lungo sezioni Ovest-Est della zona centrale del dominio quel particolare fenomeno della non univocità delle direzioni dei vettori velocità di flusso, che si ha attualmente (come da figura 53).

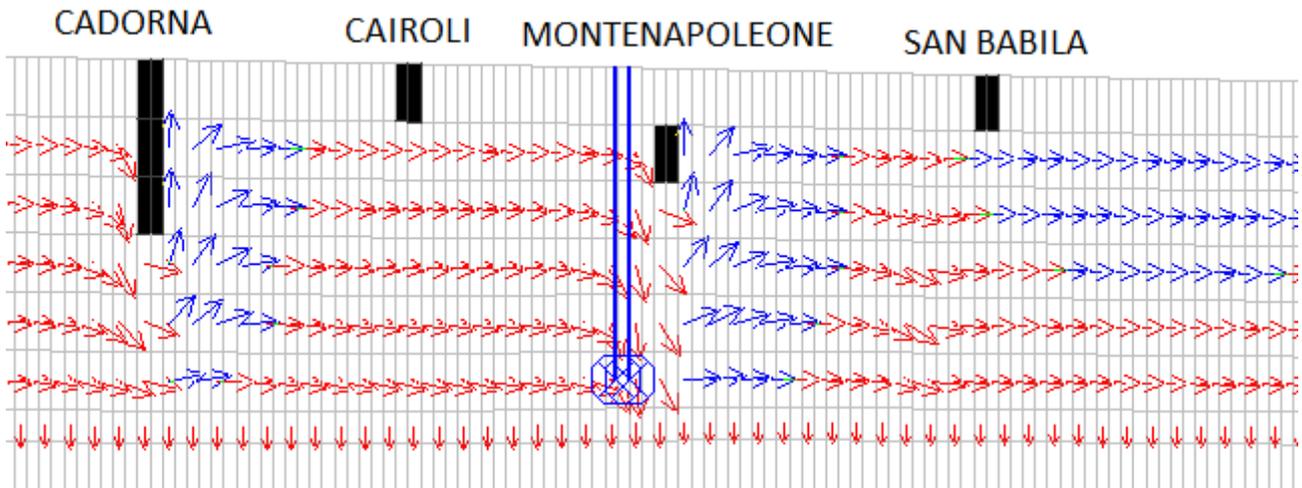


Figura 75 - Sezione trasversale E-O passante per Cadorna per scenario futuro con decrescita dei prelievi pari al 50%

Si nota in figura 74 che da Cadorna a San Babila non si viaggia più lungo la medesima linea piezometrica, bensì si passa da un carico idraulico pari a 111.8 metri a uno di 110 metri. Questo nuovo gradiente spinge il vettore velocità ad assumere componenti solo verso Est in figura 75, mentre nella corrispondente situazione attuale di figura 53 presso San Babila il flusso ha verso opposto. Grazie a questa sezione è visibile anche l'influenza nettamente inferiore dei pozzi, ora che la loro portata è inferiore, quindi il loro richiamo ha forza più bassa: presso Montenapoleone non si assiste a quella divisione netta del flusso riscontrabile in figura 53 (si risente comunque dei due pozzi segnalati con componenti verso il basso delle velocità che portano acqua al punto di emungimento, ma a valle della struttura si nota il tipico fenomeno della risalita verso l'alto del flusso) e a monte di San Babila l'influenza dei pozzi posti qualche decina di metri più a Sud è scomparsa.

L'innalzamento del livello di falda acquifera è testimoniato dall'ulteriore diminuzione di *dry cells* che per quanto riguarda il layer 2 non interessano più nessun tratto della linea metropolitana, se non l'estremo settentrionale della linea 5 (figura 76).

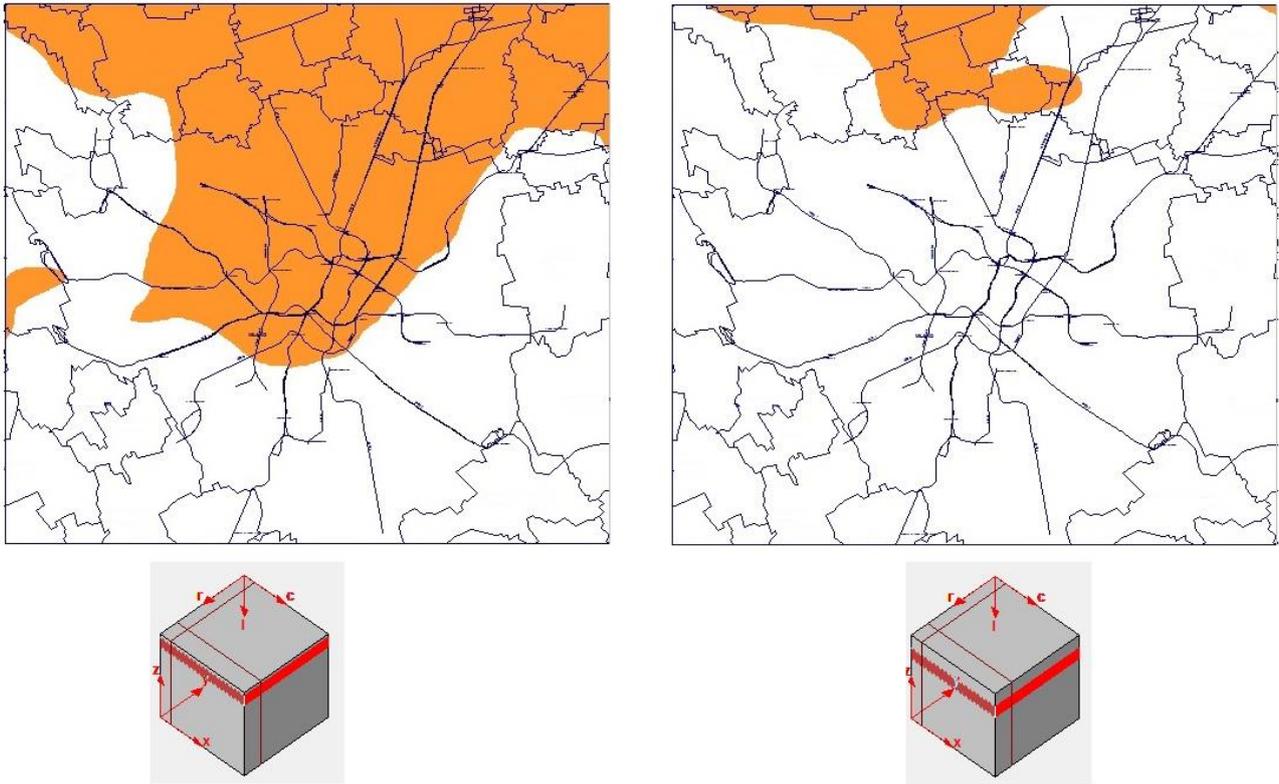


Figura 76 - Dry cells previste con una diminuzione dei prelievi a medio termine pari al 50%

L'effetto della variazione dell'altezza di falda in funzione dei prelievi idrici è apprezzabile a livello locale dal confronto del livello piezometrico raggiunto nella stazione di Garibaldi tra la situazione attuale, lo scenario futuro con prelievi diminuiti del 20% e del 50% (figura 77): qui si ha attualmente uno strato di terreno corrispondente a due layer completamente senza presenza d'acqua, mentre con gli scenari futuri la parte superiore della struttura implementata nel layer 2 andrebbe progressivamente a essere intercettata dal livello di falda prima a valle poi anche a monte. Nella figura seguente è presentato l'evolversi della situazione dalle condizioni attuali allo scenario peggiore con i prelievi dimezzati: alle condizioni odierne l'altezza piezometrica è pari a 108 metri, salirebbe a 110 metri in caso di riduzione dei prelievi del 20% e fino a 114 metri per emungimenti dimezzati, interessando completamente una struttura non progettata per operare con carichi idraulici così alti.



Figura 77 - Variazione del livello piezometrico e delle dry cells (in arancio) presso Porta Garibaldi: situazione attuale (sx) e al variare degli scenari di prelievi idrici diminuiti del 20% (centro) e del 50% (dx)

4.4 Lo scenario completo a medio termine

Si è studiato singolarmente ogni fattore più importante per la definizione di un probabile futuro andamento piezometrico per il dominio scelto e si è indagato quali effetti possano derivare da una loro variazione; quantitativamente sono le modifiche ai prelievi idrici da pozzi di pompaggio ad apportare le variazioni piezometriche più significative. Ora si vuole studiare il più probabile scenario futuro per l'orizzonte temporale di metà secolo, considerando la variazione combinata dei fattori: si considerano quindi la linea metropolitana 4 attiva, precipitazioni scese del 5% rispetto alle condizioni attuali e prelievi da pozzi dimezzati in modo da verificare l'effetto contemporaneo dei principali fattori.

La variazione del carico piezometrico è presentata in figura 78.

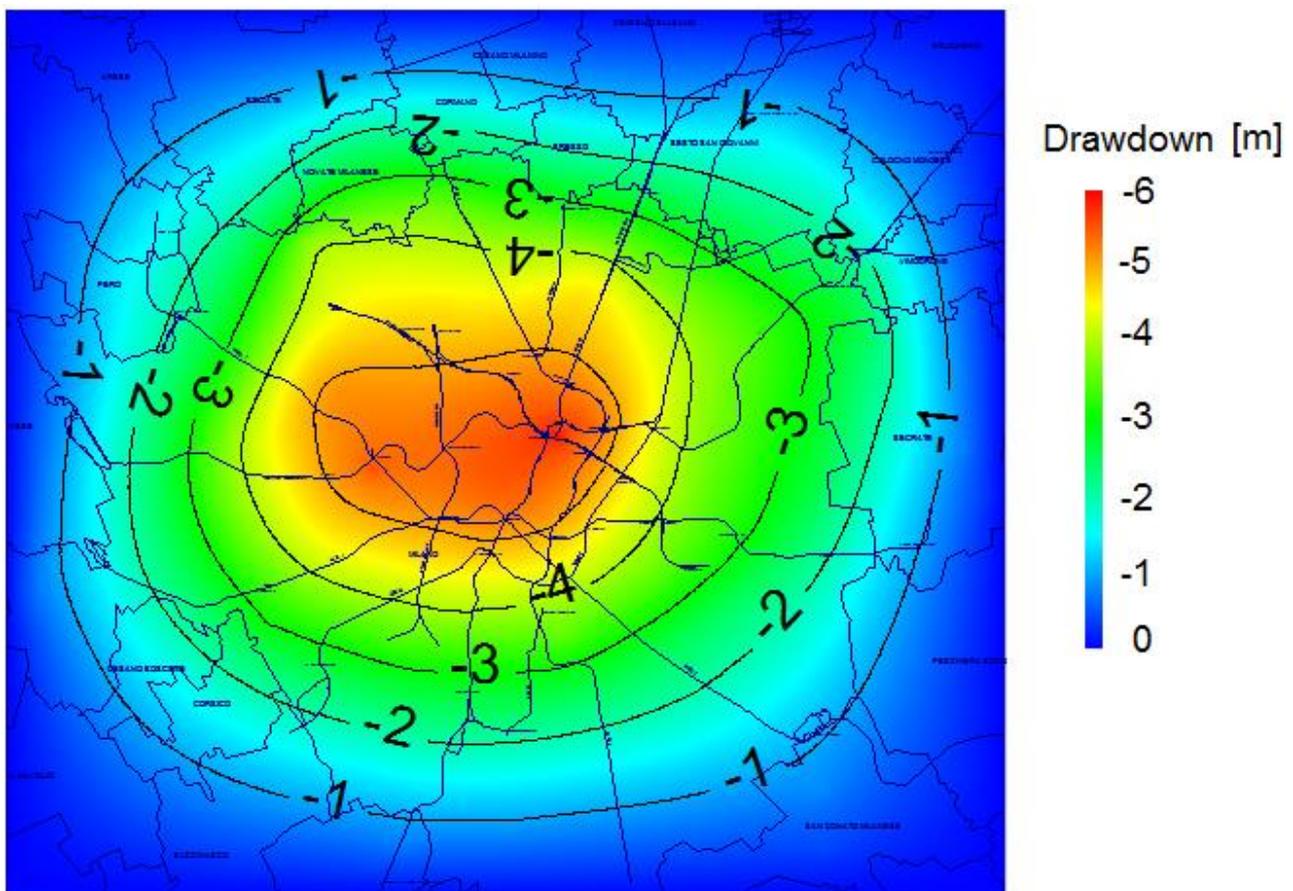


Figura 78 - Variazioni piezometriche rispetto alla situazione attuale per uno scenario futuro comprendente la costruzione della linea metro 4, una riduzione del 5% delle precipitazioni e del 50% dei prelievi idrici

La sovrapposizione degli effetti derivante dalle tre variazioni previste a breve-medio termine è dominata dall'innalzamento piezometrico dovuto ai prelievi destinati a diminuire ulteriormente nei prossimi anni: nel centro della città di Milano si dovrà affrontare secondo il modello implementato una forte risalita del tetto di falda, quasi fino a 6 metri.

La piezometria risultante in figura 79 è praticamente coincidente a livello generale con quella dello scenario a prelievi dimezzati con un aumento medio dei livelli idrici rispetto alla situazione attuale

pari al 5% circa per le stazioni più centrali delle linee metropolitane (ossia più interne all'odierna depressione piezometrica del centro città).

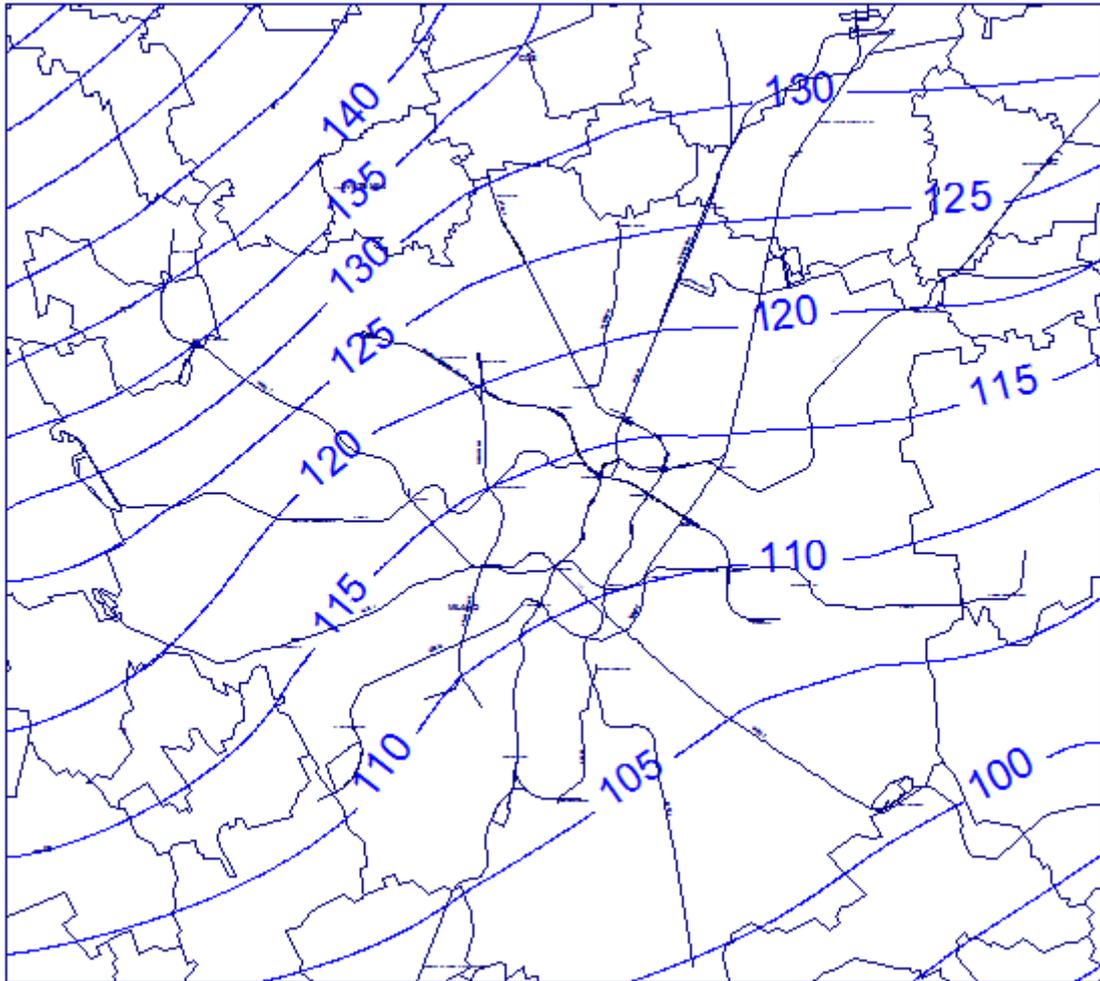


Figura 79 - Andamento della piezometria per lo scenario futuro completo di metà secolo

Si nota solo un leggero spostamento verso l'alto delle linee piezometriche dovuto alla diminuzione di ricarica da piogge, ossia un generico punto rispetto al caso di massima diminuzione dei prelievi presenta un valore d'altezza di falda leggermente inferiore. Ad ogni modo si può definire i prelievi idrici come parametro più influente sul sistema acquifero: in ottica di contenimento dell'innalzamento odierno e, come qui sopra definito, anche futuro, risulta positivo che l'elemento discriminante sia controllabile dal punto di vista artificiale: è già stata segnalata infatti l'efficacia di interventi mirati, atti all'estrazione controllata di acque sotterranee per ovviare a problematiche locali di eccessiva risalita della falda (nuove soluzioni inerenti ai prelievi idrici più sostenibili saranno indicate al capitolo 5).

4.5 L'influenza delle variazioni future sulle strutture metropolitane

Analizzate in generale le variazioni piezometriche nel dominio e confrontati alcuni sviluppi particolari con l'attuale situazione, si vuole ora mettere in luce quali variazioni possano apportare i cambiamenti previsti a livello locale. Si studiano gli effetti di variazione del livello sulle singole stazioni delle tratte sotterranee, per individuare differenze di relazione con la presenza idrica, rilevando in particolare quali stazioni al variare degli scenari futuri subiscano un arrivo alla loro minima quota del carico d'acqua, con possibili fenomeni di infiltrazione ed allagamenti, oppure un innalzamento del tetto di falda tale da raggiungere la quota sommitale delle gallerie, con totale sommersione dell'elemento anche superiormente.

Si presentano inizialmente le stazioni delle linee metropolitane (passante ferroviario compreso) che subiscono una variazione della loro condizioni a seconda dei due scenari di andamento futuro dei prelievi idrici (tabella 18):

Stazioni	Presenza d'acqua prelievi -20%	Sommersione prelievi -20%	Presenza d'acqua prelievi -50%	Sommersione prelievi -50%
linea 1 rossa	Bisceglie		Bonola; Inganni; Primaticcio; Bande Nere; Gambara	
linea 2 verde	Lanza; Moscovia; Gioia; Centrale;		Famagosta; Romolo; Porta Garibaldi; Piola; Lambrate; Udine	
linea 3 gialla	Zara; Centrale; Turati; Lodi Tibb; Brenta; Corvetto; Porto di Mare	Dergano; Maciachini		Crocetta; Porta Romana
passante		Lancetti; Repubblica	Porta Vittoria	Dateo

Tabella 18 - Stazioni metropolitane che subiscono una variazione di condizione rispetto alle condizioni attuali (tabella 16) in funzione degli scenari futuri di aumento dei prelievi idrici

La linea 1 è la tratta più superficiale: tutta la porzione centrale non è interessata dall'innalzamento del livello piezometrico, anche per le condizioni future; tuttavia procedendo verso la periferia Ovest della città, dopo la biforcazione della tratta presso Pagano, si assiste ad una risalita del livello fino alla base di tutte le stazioni del tratto Bisceglie-Gambara e nella stazione di Bonola (tratto Rho Fiera-Pagano) (causa principale è la progressiva scomparsa della depressione piezometrica del centro città con gli scenari futuri); si sottolinea come le stazioni di Molino Dorino e S. Leonardo siano le uniche di questa linea ad essere già attualmente interessate dalla presenza d'acqua (causa alti valori piezometrici nella zona a NO).

La linea 2, più profonda rispetto alla precedente, come dimostrano le intersezioni di Cadorna e Loreto, è attualmente interessata quasi completamente da presenza acquifera, la quale però oggi raggiunge quote minimamente superiori rispetto alla base delle gallerie della tratta; in

tabella 18 si è riportato, oltre a Lanza (praticamente unica attualmente in condizioni completamente secche), anche quelle stazioni che vedranno un notevole aumento del livello idrico con conseguente ingente aumento di carichi per la struttura.

La linea 3 mostra un andamento assai irregolare e le sue relazioni con la piezometria sono chiare funzioni dello svilupparsi della tratta a diversi gradi di profondità: procedendo da Nord a Repubblica si assiste ad un progressivo avvicinarsi della quota base delle gallerie al piano campagna, coincidente per la situazione odierna ad una progressiva scomparsa di interazione con la falda; tra Repubblica e Turati un notevole abbassamento riporta la linea a buone profondità per poi avere da Turati al tratto finale a Sud il medesimo fenomeno di avvicinamento al piano campagna e scomparsa di presenza d'acqua. Quindi la parte settentrionale della tratta è già sommersa attualmente o lo sarà già con lo scenario dei prelievi diminuiti del 20%, Zara e Centrale inizieranno a risentire della presenza acquifera con lo stesso scenario, Crocetta e Porta Romana saranno sommerse in caso di dimezzamento dei prelievi, mentre il tratto conclusivo oggi in condizioni secche vedrà la prima interazione con il tetto di falda dallo scenario con prelievi diminuiti del 20%.

Il passante ferroviario, dato il suo sviluppo in profondità e il passaggio in snodi fondamentali del trasporto sotterraneo al di sotto delle linee metro, è costantemente interessato da forti carichi già oggi, tranne l'ultimo tratto che porta al capolinea di Porta Vittoria. Porta Garibaldi e Porta Venezia sono infatti già in condizioni sommerse, Lancetti e Repubblica saranno sommersi completamente con il primo scenario futuro, Dateo con il secondo (a conferma del fatto che alle condizioni attuali il livello idrico che lo interessa non è così elevato come invece nelle due stazioni precedenti); la sola Porta Vittoria, in posizione più isolata e non interferente con altre strutture, vedrebbe la risalita piezometrica fino alla propria base con lo scenario più gravoso dei prelievi idrici dimezzati.

Considerando l'intero sviluppo planimetrico delle linee modellizzate, si crea una mappa che mostra dal punto di vista qualitativo il rapporto di ogni singola stazione con la presenza d'acqua di falda, per le condizioni odierne e per i due scenari futuri con diminuzione degli emungimenti da pozzi (figura 80): si può notare come stazioni in condizioni secche, presenti in tutte le linee alla situazione attuale, permangano solo nella più superficiale linea 1 con lo scenario futuro più severo, se non per le altrettanto superficiali stazioni di Centrale e Repubblica della linea 3. Inoltre, anche per quei rami che si estendono al di fuori dell'odierna depressione piezometrica del centro città per i quali si attendono variazioni minori del carico idraulico (le variazioni percentuali possono essere anche la metà rispetto a quelle attese nella zona centrale), come ad esempio i tratti a Ovest post-biforcazione della linea 1 o il tratto più settentrionale della linea 3, si assisterebbe ad un netto peggioramento della loro condizione.

Per quanto riguarda le stazioni più interne, nessuna di quelle appartenenti ad una linea metropolitana raggiungerebbe condizioni di totale sommersione (se non Crocetta e Porta Romana), ma si avrebbe una sommersione pari o superiore al 75% dell'altezza delle gallerie per il tratto esteso da Moscovia fino a Udine per la linea 2.

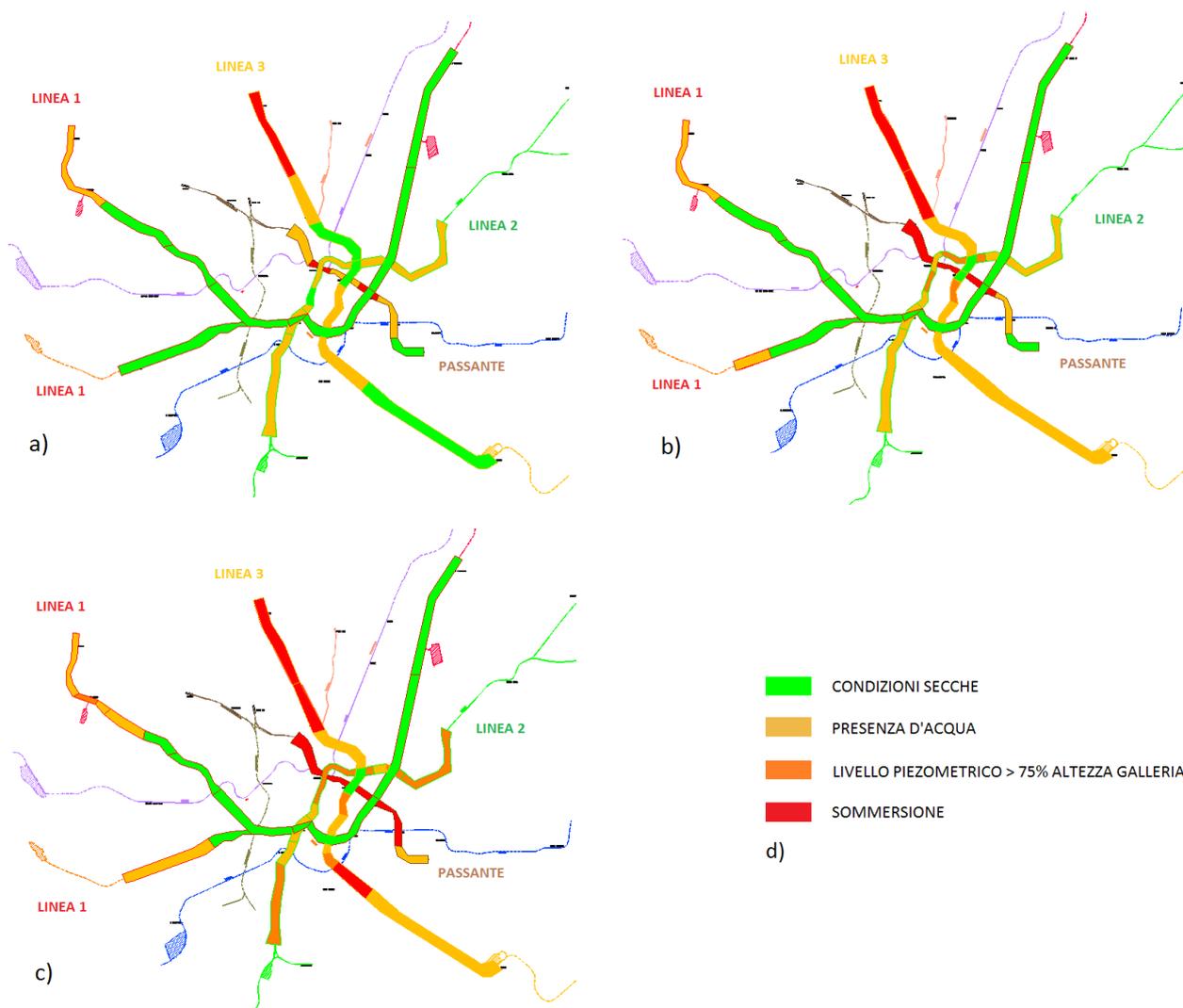


Figura 80 - Mappa dei trasporti sotterranei con indicazione delle relazioni tra stazioni e presenza idrica per a) la situazione attuale b) lo scenario con i prelievi diminuiti del 20% c) lo scenario con i prelievi dimezzati

Si studia con particolare attenzione la linea metropolitana dove si presentano le maggiori variazioni di condizione da parte delle stazioni, ossia la linea 3 gialla (figura 81), per la quale ben 12 stazioni su 21 vedono un peggioramento della loro situazione (risalita di acqua a livello delle gallerie o sommersione totale). Il tratto più interno alla città (composto da 16 stazioni) con relativi andamenti del tetto di falda e indicazione delle stazioni a rischio è mostrato per la situazione attuale e i due scenari a prelievi diminuiti in Appendice C. Si presentano di seguito due brevi tratte dalle caratteristiche interessanti: Porta Romana-Lodi Tibb e Sondrio-Centrale.

Nonostante Porta Romana e Lodi Tibb siano stazioni adiacenti, con profondità equiparabili rispetto al piano campagna e posizionate pienamente all'interno della depressione piezometrica cittadina, a Porta Romana si trova già attualmente presenza del livello acquifero, il quale arriverebbe a interessare anche Lodi Tibb solo nel primo scenario futuro: solo in questo sviluppo le due stazioni assumerebbero le stesse condizioni; infatti per lo scenario più critico si assisterebbe ad un ulteriore cambio di interazione con la falda per Porta Romana, che si vedrebbe completamente sommersa dal livello freatico. Per il secondo caso si mostra invece l'estrema superficialità della

stazione di Centrale della tratta gialla (non così la tratta verde che vede Centrale ampiamente sotto il livello acquifero), la quale non risente minimamente dell'innalzamento piezometrico ipotizzato e che bene influenza invece la vicinissima stazione di Sondrio, che sarebbe interessata da nuova presenza d'acqua già al primo scenario futuro.

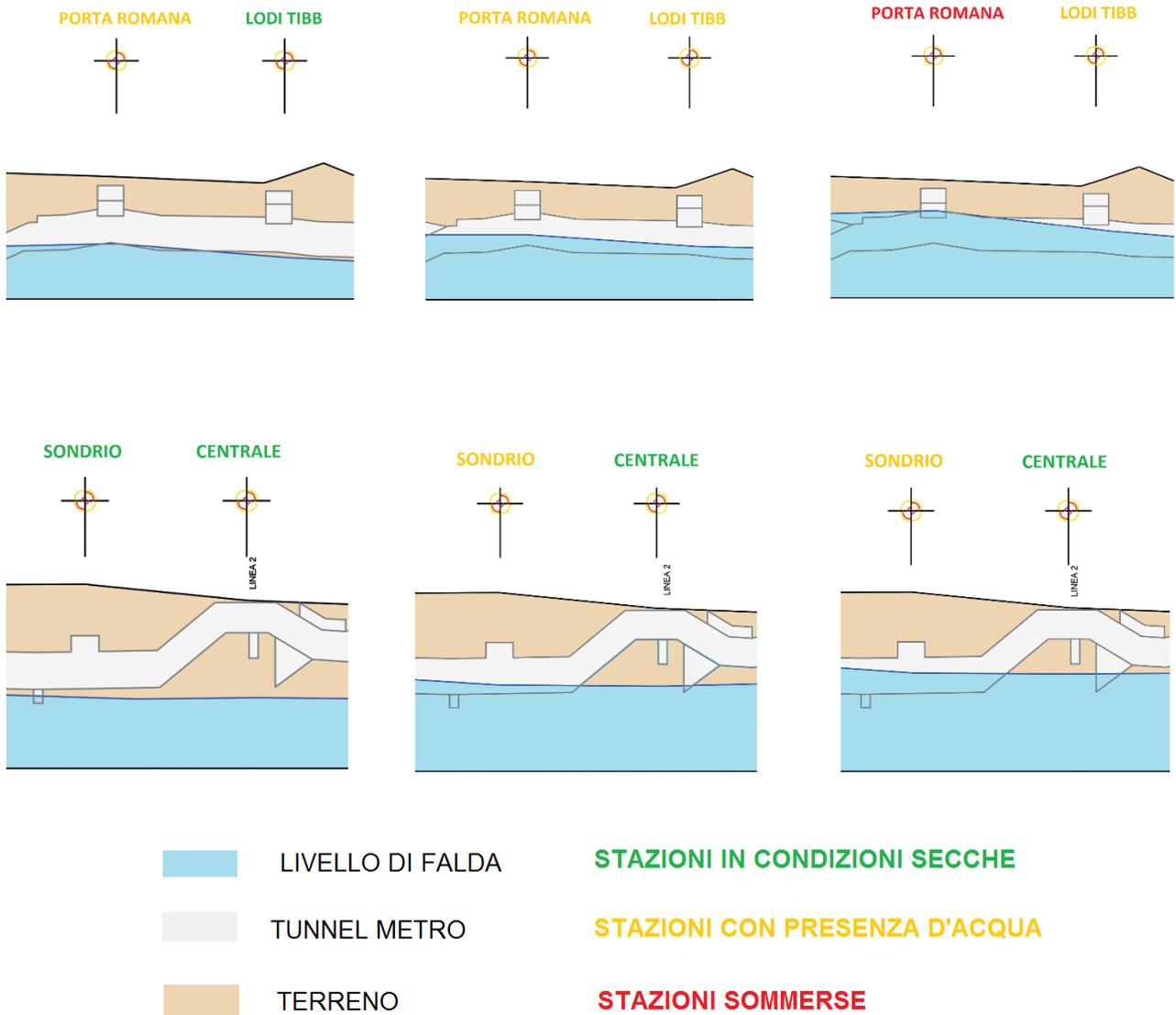


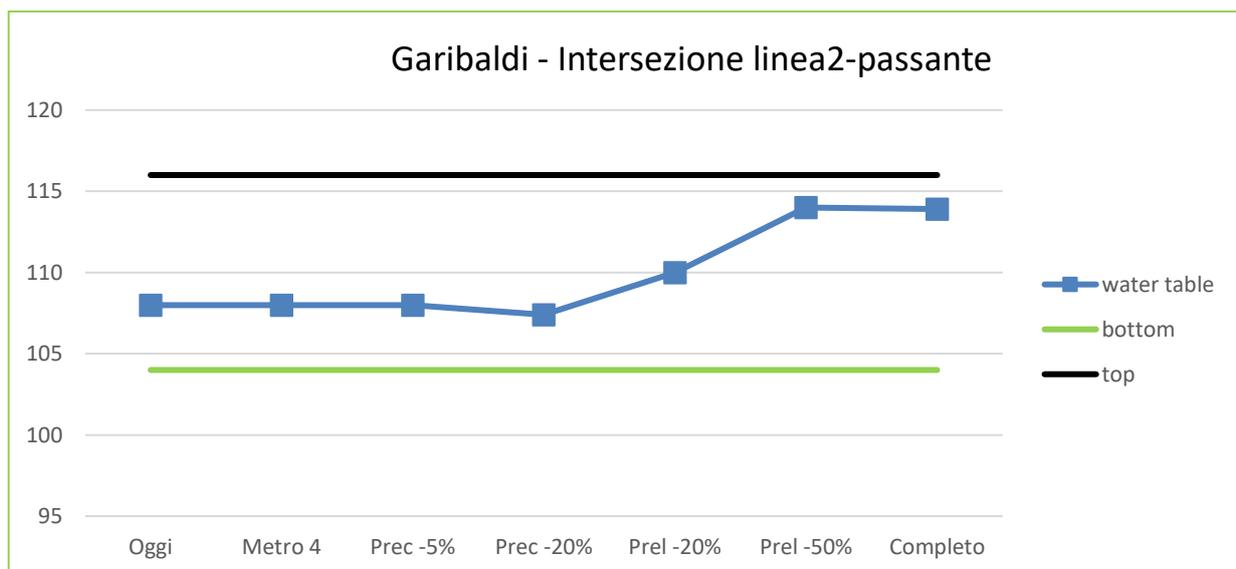
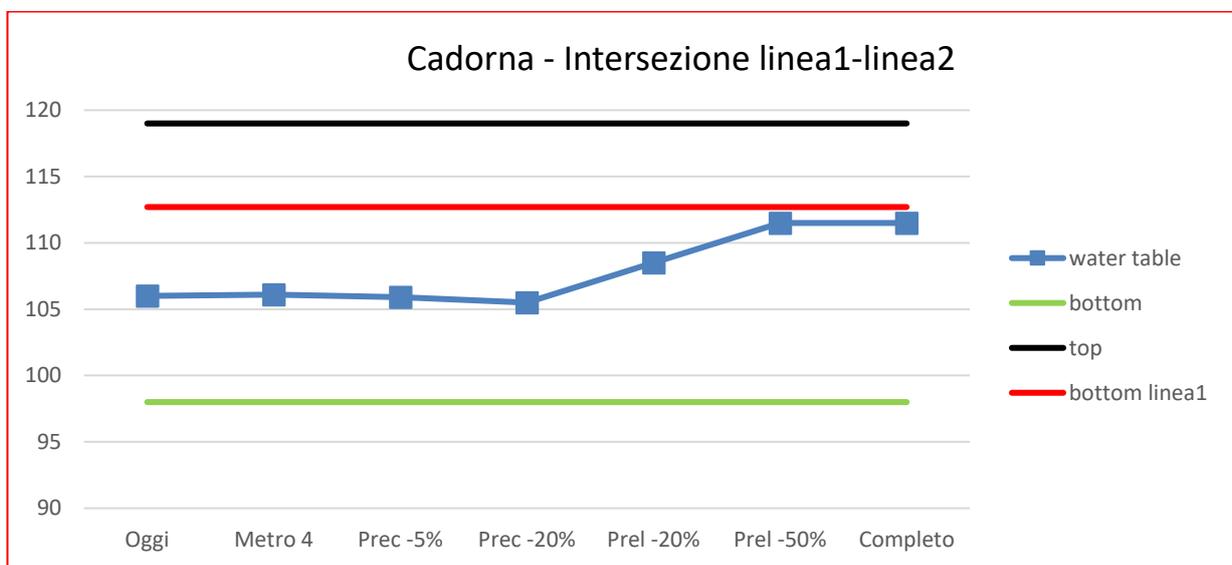
Figura 81 - Particolari tratti della linea 3 per la situazione attuale (sx), lo scenario futuro con prelievi diminuiti del 20% (centro) e lo scenario futuro con prelievi diminuiti del 50% (dx)

Si mostrano inoltre i livelli piezometrici per le principali stazioni metro-ferroviarie per ogni scenario futuro considerato (figura 82): la situazione di Cadorna mostra che la tratta della linea verde è già attualmente interessata da presenza idrica, ma anche per lo scenario futuro causante il maggiore innalzamento del livello di falda non si assiste ad una risalita acquifera fino alla linea rossa; si specifica che le due tratte nella stazione non sono su due livelli differenti, quindi in figura 82 il tetto della galleria della linea 2 prosegue ben oltre il livello minimo della linea 1 (poiché la

tratta della linea 2 incrocerà poche centinaia di metri più a NE la linea 1, il suo sviluppo altimetrico è già presso Cadorna più in profondità).

La stazione di Porta Garibaldi vede già oggi giorno presenza idrica ma non sarà interessata nelle condizioni future studiate da una completa sommersione.

Per la stazione di Centrale la situazione è differente: alle condizioni attuali la linea verde (totalmente sviluppata in loco al di sotto della linea 3-gialla) convive già con problemi di presenza idrica, ma considerando una diminuzione dei prelievi pari al 50% si assiste ad un avvicinamento alla linea 3 da parte della risalita acquifera. Si nota come per stazioni snodi fondamentali del sistema di trasporto sotterraneo come Centrale e Cadorna la previsione a lungo termine più pessimistica non andrebbe a influire sulle tratte più superficiali.



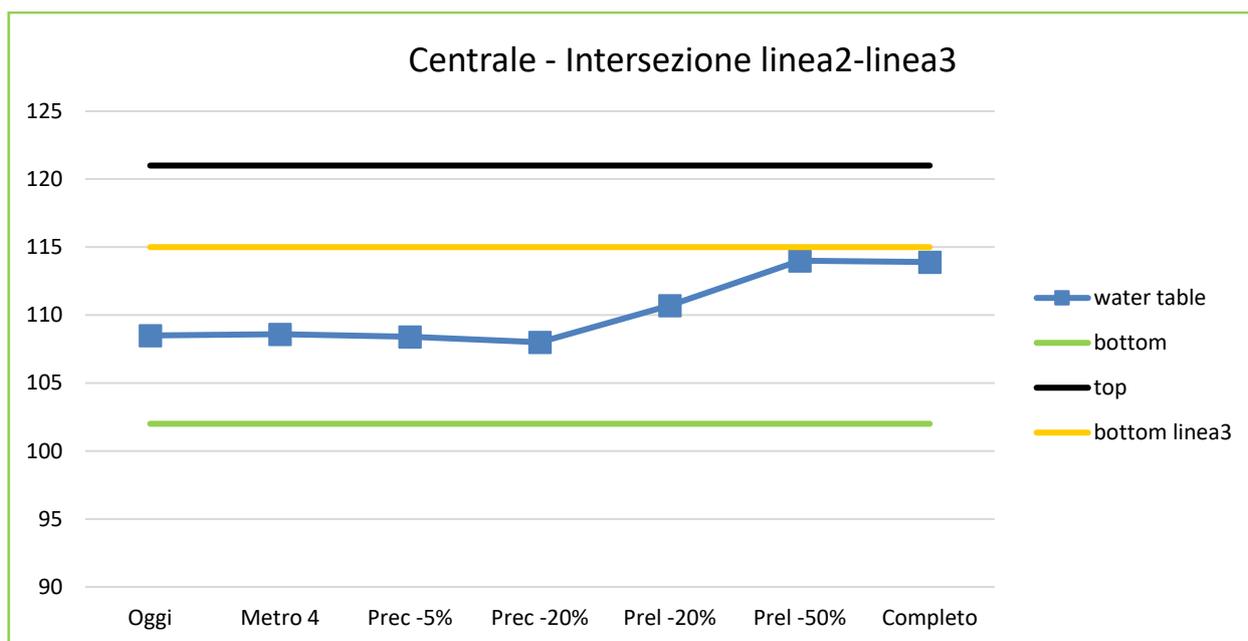


Figura 82 - Variazione dei livelli piezometrici per ogni scenario futuro per le stazioni principali

Si aggiunge la tabella 19 con i valori piezometrici attuali e nelle condizioni future più gravose dal punto di vista della presenza idrica, con relative variazioni percentuali rispetto al valore attuale del carico di falda.

Stazioni	Oggi [m]	Prelievi -20% [m]	Variazione [%]	Prelievi -50% [m]	Variazione [%]	Completo [m]	Variazione [%]
Cadorna	106	108,5	2,4	111,5	5,2	111,5	5,2
Porta Garibaldi	108	110	1,9	114	5,5	113,9	5,4
Centrale	108,5	110,7	2,0	114	5,1	113,9	5,0

Tabella 19 - Variazione del livello idrico e percentuale per gli scenari futuri più gravosi per le principali stazioni metro-ferroviarie

La variazione riscontrata in Cadorna causa prelievi diminuiti di un quinto è la maggiore rilevata per la linea verde, così come Garibaldi per lo scenario con prelievi dimezzati risulta essere la stazione con delta di valori maggiore.

In questo paragrafo si è considerato finora le linee di trasporto sotterraneo attualmente già in funzione, ma si sa, come definito al paragrafo 4.1, che a breve giungerà a compimento il progetto della linea 4; si esegue perciò una rapida valutazione puramente qualitativa per questa tratta, confrontando lo scenario del paragrafo 4.1 (con parametri climatici e di prelievo attuali) con lo scenario completo a medio termine, consapevoli che in questo caso l'incertezza della valutazione non dipende solo dall'incertezza insita nella previsione futura ma anche dai dati indicativi a disposizione riguardo le quote delle stazioni: nella zona Est si dovrebbero avere le maggiori variazioni riguardo la presenza d'acqua ad un livello superiore rispetto alla base delle stazioni, infatti, nonostante la superficialità dello sviluppo dell'infrastruttura, le stazioni Tricolore, Dateo, Susa, Argonne e Forlanini potrebbero diventare interessate da presenza acquifera per lo scenario completo in cui i prelievi dimezzati sono la principale causa dell'innalzamento piezometrico.

Capitolo 5: Misure di mitigazione

L'innalzamento piezometrico nel territorio milanese, ormai in atto costantemente da una trentina d'anni e molto probabilmente destinato a continuare in futuro, è legato principalmente ai tre fattori seguenti:

- i prelievi dai corpi acquiferi tramite pozzi di pompaggio ad opera dell'uomo
- le acque derivanti da attività d'irrigazione e relativi metodi di irrigazione utilizzati
- gli aspetti climatici delle precipitazioni e, in minor luogo, delle temperature.

La gestione della risorsa idrica sotterranea è oggetto di interesse di vari enti del territorio lombardo; in particolare, considerando la situazione di crescente criticità raggiunta nell'area metropolitana, è stato sottoscritto un "Accordo di programma per il controllo dell'innalzamento della falda nell'area milanese" da parte di Regione Lombardia, Comune di Milano, Autorità di bacino del fiume Po e Agenzia interregionale per il fiume Po: in questo ambito la società Metropolitana Milanese S.p.A., che gestisce non solo l'infrastruttura di trasporti sotterranei cittadini ma anche il servizio idrico integrato (dalla captazione delle acque fino alla loro depurazione e reimmissione nell'ambiente), sta realizzando uno studio per la gestione ottimale della falda acquifera tramite un modello di simulazione del flusso, con l'obiettivo di produrre uno strumento di supporto alle decisioni delle pubbliche amministrazioni per calcolare bilanci idrogeologici, stimare prelievi futuri e rilasciare concessioni riguardo l'uso delle acque sotterranee.

È quindi evidente che l'attenzione sul problema in questione è già alta; lo dimostra ulteriormente l'attività della stessa Metropolitana Milanese S.p.A., che, per il solo scopo di cercare di controllare il più possibile i livelli del tetto di falda, estrae all'anno 35 milioni di metri cubi d'acqua in più di quella necessaria, consapevoli che per tornare ad avere livelli piezometrici accettabili (come nell'anno 2007) bisognerebbe prelevare in più 110 milioni di metri cubi annui nel solo comune di Milano (Alberti, 2015). Si torna qui a ricordare la definizione del livello idrico sostenibile, ottenibile e gestibile tramite la regolamentazione dei prelievi da pozzi, già indicato al paragrafo 2.2 secondo Francani, 2005.

In un'ottica più generale di sostenibilità degli interventi, però, la mera estrazione di acqua sotterranea nei confini cittadini smaltita nel sistema superficiale senza ulteriore sfruttamento risulta essere poco sostenibile dal punto di vista ambientale, soprattutto note le necessità delle attività rurali in termini di irrigazione, non molto lontane dalla zona più urbanizzata. Si potrebbe sviluppare quindi una gestione più integrata delle risorse idriche, che tenga conto di più esigenze contemporanee e della possibilità di sfruttare in simbiosi le potenzialità del sistema superficiale e di quello sotterraneo.

L'estrazione di acque dal sistema acquifero per abbassare il livello piezometrico dovrebbe specificarsi per interventi a carattere locale o risoluzioni di problematiche urgenti, non come intervento ad ampio raggio e uniformemente distribuito nel territorio. In questo modo soluzioni pratiche come quella descritta da Beretta *et alii* (2004) (vedesi paragrafo 2.2) dovrebbero essere

attuabili (in quanto con effettivi risultati benefici), ma solo a livello locale: in questo intervento localizzato l'obiettivo infatti è proprio quello di salvaguardare uno specifico sito di rilevanza culturale particolarmente soggetto ad innalzamento acquifero (abbazia di Chiaravalle). L'efficacia dell'intervento nel breve periodo è dimostrata dai valori di drawdown ottenuti in seguito all'attività di pompaggio protrattasi per un anno intero all'interno di una cava, ma si sottolinea anche il recupero piezometrico post-pompaggio, che riporta il livello fino a 10 cm sotto a quello originario, e la non influenza dell'abbassamento piezometrico a grandi distanze dal sito, problematiche che mostrano chiaramente come queste soluzioni non possano essere risolutive a lungo termine. Inoltre l'auspicata soluzione dell'individuazione di numerose cave nell'hinterland milanese per ottenere una sovrapposizione di effetti sull'abbassamento piezometrico non può essere percorribile seguendo il nuovo approccio della sostenibilità ambientale, se non prevedendo il riutilizzo delle acque emunte a ulteriori scopi, come quello dell'irrigazione o per lo sfruttamento in pompe di calore.

Questa nuova prerogativa porta a considerare ora eventuali scenari futuri di sfruttamento diversificato della risorsa idrica proveniente dagli acquiferi, di cui si vogliono studiare gli eventuali effetti positivi sul controllo dell'altezza di falda; in particolare si considerano strategie di intervento come la suddetta gestione integrata delle risorse idriche, sia superficiali che sotterranee, e l'ottimizzazione dei pompaggi tramite la geotermia, per poi giungere alla verifica degli effetti della costruzione di un tunnel (la cui progettazione è ora oggetto di studio) che avrà la duplice funzione di scolmatore del fiume Seveso fino all'immissione nel Lambro e di canale drenante l'acqua sotterranea. Per ogni intervento verranno definite le assunzioni fatte, i fondamenti per l'implementazione nel modello di flusso già sviluppato e gli effetti benefici sull'andamento piezometrico e nelle relazioni con le infrastrutture sotterranee.

Infine si presenta uno scenario futuro completo di mitigazione, il quale definirebbe una situazione di gestione della risorsa idrica e di sostenibilità ambientale degli interventi auspicabile e ottimale per una realtà urbana fortemente interagente con le acque di falda, scenario per il quale le tre soluzioni presentate saranno implementate contemporaneamente.

5.1 La gestione integrata delle risorse idriche

Si considera innanzitutto uno scenario in cui si persegue l'obiettivo di una gestione integrata della risorsa idrica superficiale e sotterranea attraverso una migliore gestione del sistema dei canali d'irrigazione e l'utilizzo della rete idraulica minore, ampiamente diffusa nel territorio milanese per una lunghezza di circa 70 chilometri, come da figura 83 (in colore marrone), e sotto la cura del Servizio Informativo Bonifica Irrigazione e Territorio Rurale.

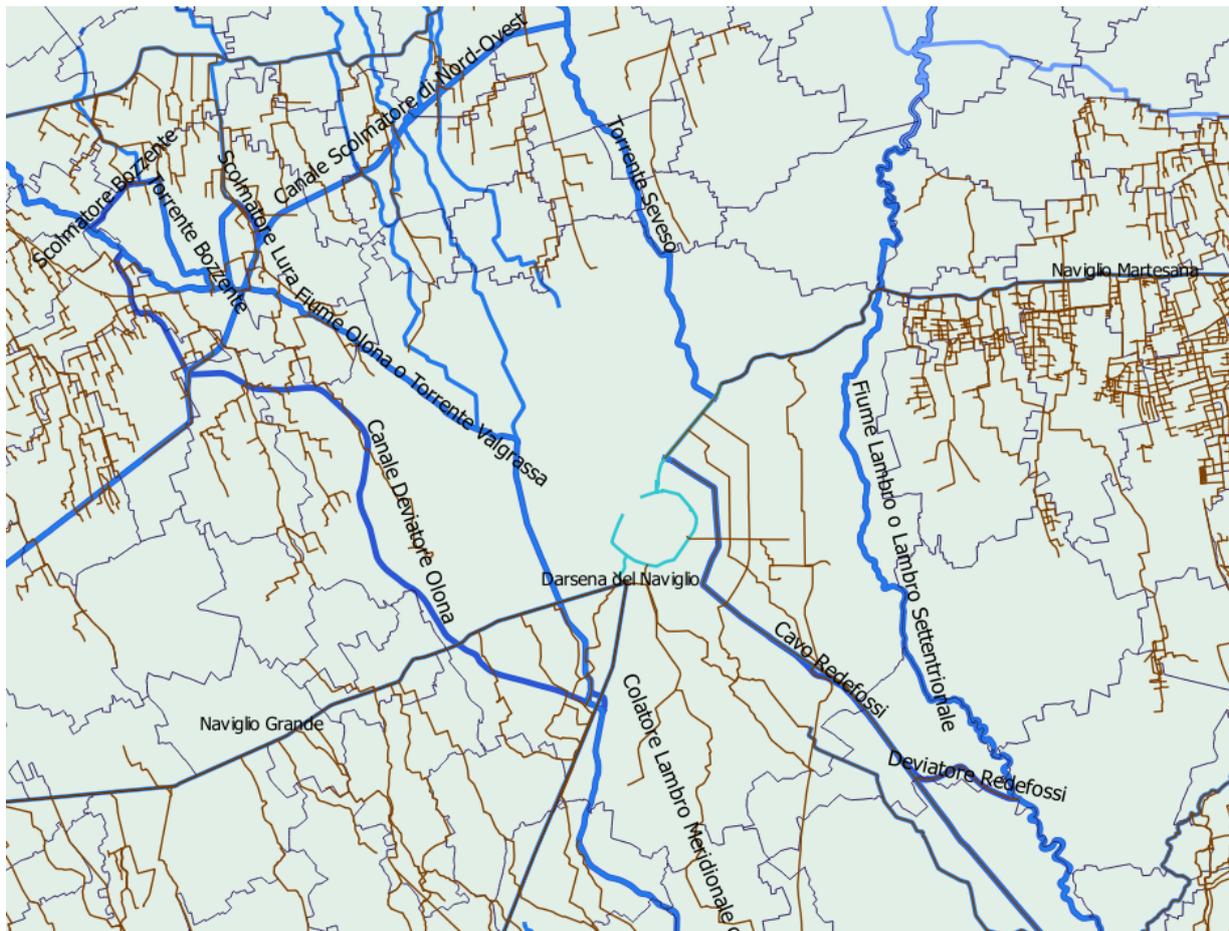


Figura 83 - Idrografia dell'area di studio con in marrone rete di competenza del Servizio Informativo Bonifica Irrigazione e Territorio Rurale

L'irrigazione influenza la presenza d'acqua nel sottosuolo poiché da essa dipende l'infiltrazione delle acque irrigue verso gli strati più profondi; nel territorio prossimo ai confini laterali della città il metodo d'irrigazione più sviluppato è il metodo a scorrimento, il quale ha una bassa efficienza irrigua con infiltrazione nel sottosuolo del 70% dell'acqua concessa agli enti irrigui, mentre nel territorio immediatamente a Sud prevale il metodo per sommersione, per il quale uno spessore maggiore d'acqua rimane permanentemente sul terreno, definendo un valore di infiltrazione non equiparabile al metodo a scorrimento ma comunque sensibile, trattandosi anch'esso di un metodo tradizionale gravitazionale. Inoltre si specifica come la fornitura idrica da parte dell'ente regolatore è ancora oggi basata su valori di concessione stabiliti a priori per ciascun distretto irriguo.

Una gestione più efficiente della risorsa idrica significherebbe regolamentare la fornitura idrica sulla base della reale domanda da parte degli utenti irrigui, non più su un valore a priori, e sfruttare adeguatamente la ben sviluppata rete irrigua come strumento di controllo delle oscillazioni piezometriche, considerando nel loro insieme la risorsa idrica sotterranea e quella superficiale. Inoltre grazie al riutilizzo della rete idraulica minore si riuscirebbe a recuperare parte delle acque parassite, che tuttora vengono disperse nel sottosuolo, andando ad aumentare ulteriormente la presenza idrica sotterranea.

Dal punto di vista computazionale, la gestione integrata ed efficace della risorsa idrica viene modellizzata attraverso una riduzione del recharge: si ipotizza che nella parte meridionale del dominio (dove le irrigazioni sono presenti) si abbia una riduzione pari al 25%, così come nella parte settentrionale (dove sono generalmente assenti le irrigazioni per via del maggiore sviluppo industriale dell'area) si ottenga comunque una riduzione del recharge del 25%, poiché la rete del SIBITER è ampiamente sviluppata, come visibile in figura 83.

Nelle tre zone di suddivisione del dominio per la proprietà del recharge, si impostano i seguenti nuovi valori di tabella 20:

	Recharge -25% [m/s]
zona Sud	$4.725 \cdot 10^{-8}$
zona centrale	$1.875 \cdot 10^{-10}$
zona Nord	$2.625 \cdot 10^{-8}$

Tabella 20 - Valori di recharge per lo scenario con la gestione integrata delle risorse idriche

Per le restanti caratteristiche del modello, si sfruttano le condizioni attuali già implementate nel modello raffinato e si ottiene l'abbassamento piezometrico descritto dalla figura 84.

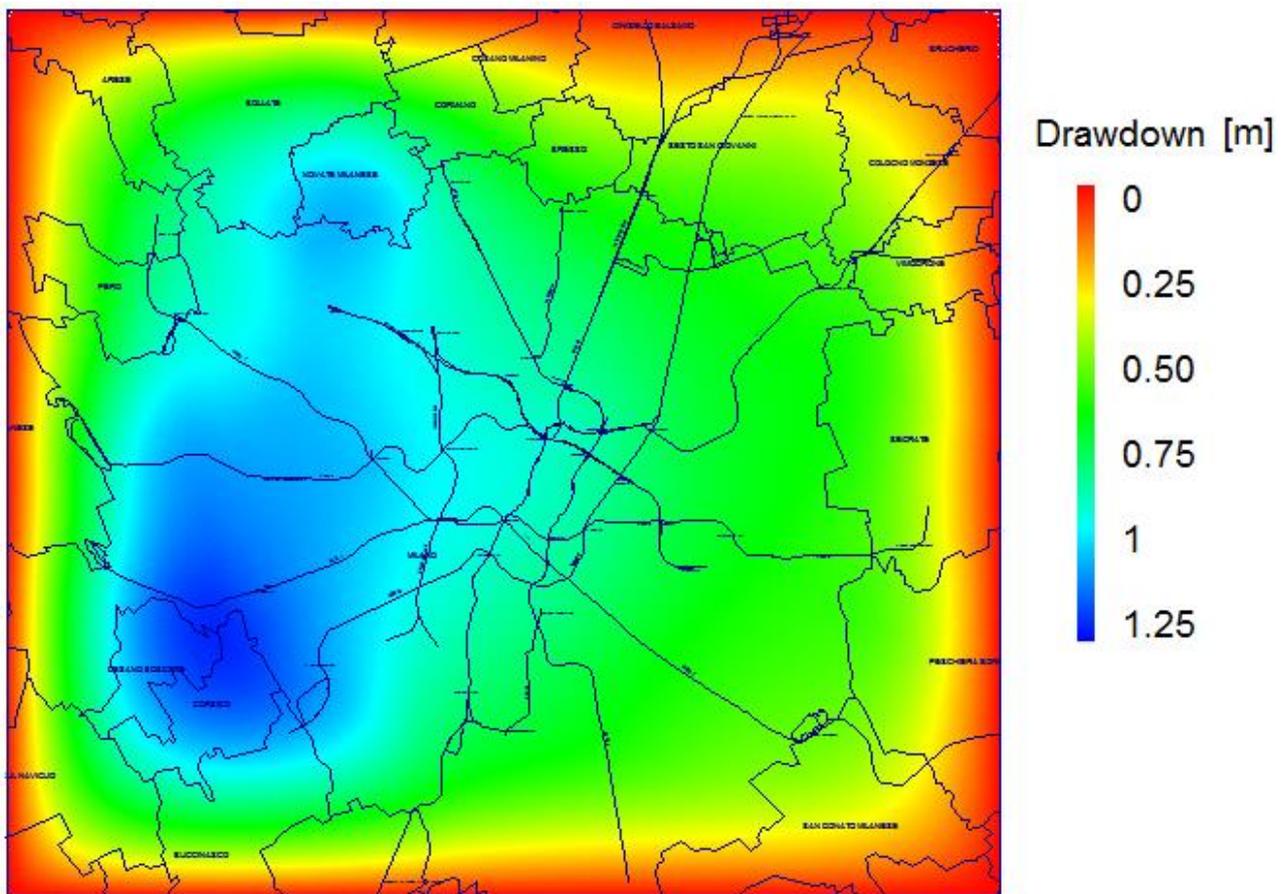


Figura 84 – Variazioni piezometriche rispetto allo scenario iniziale indotte da una diminuzione del recharge pari al 25% grazie alla gestione integrata delle risorse idriche

Si raggiungono dei valori di drawdown fino a 1.25 metri nella parte occidentale del dominio, dove si trovano i terreni con le permeabilità inferiori, ma tutto il territorio cittadino risente favorevolmente del miglioramento della gestione idrica con un costante abbassamento del livello di mezzo metro circa.

Diretta conseguenza sarebbe la discesa del livello idrico al di sotto della base delle stazioni di Molino Dorino e di S. Leonardo appartenenti al tratto Nord post-biforcazione della linea 1, grazie ad un drawdown di quasi 80 centimetri rispetto alla situazione odierna. In ottica futura, nonostante una ipotizzata forte decrescita dei prelievi totali, le stazioni di Inganni, Primaticcio e Bande Nere nel tratto Sud post-biforcazione della linea 1 potrebbero non risentire più della presenza acquifera: il livello attuale grazie ad una migliore gestione della risorsa idrica subirebbe un abbassamento di 1 metro circa, e anche nel peggiore scenario di prelievi dimezzati non ritornerebbe più ad altezze tali da intaccare le infrastrutture citate. I vantaggi nella tratta Sud sarebbero particolarmente importanti poiché inerenti all'ampliamento della linea metropolitana effettuato a metà anni '70, quando non si erano ancora previste possibilità di interazioni con la falda e opere di impermeabilizzazione.

5.2 L'ottimizzazione dei pompaggi dal primo acquifero

Si è visto come la semplice estrazione di acque sotterranee in quantitativo superiore rispetto alle effettive richieste idriche non possa essere considerato un intervento sostenibile nel lungo periodo, tanto meno risolutivo per problemi di livello piezometrico elevato su grandi estensioni territoriali; tuttavia in ottica di ottimizzazione dei pompaggi si può pensare ad una soluzione tecnica che permetta di estrarre portate dai corpi acquiferi per sfruttarle attivamente, ossia la geotermia: questa soluzione altamente sostenibile consiste nella creazione di impianti geotermici a circuito aperto che sfruttano le acque di falda a bassa temperatura grazie ad un emungimento a monte (rispetto alla direzione del flusso) dell'edificio da servire e con restituzione in un corpo idrico superficiale; attraverso la realizzazione di pompe di calore elettriche, si utilizzano questi impianti per la climatizzazione degli ambienti. Grande vantaggio di questa soluzione rispetto ai tradizionali sistemi di raffreddamento/riscaldamento è il notevole minore impatto ambientale, mentre rispetto ad altre fonti di energia alternativa (ad esempio solare) gode di un'elevata efficienza in tutte le situazioni climatiche, poiché la sorgente primaria, ossia l'acqua di falda, è caratterizzata da temperatura costante indipendentemente dalle condizioni esterne.

Per gli interventi l'utilizzo di un campo geotermico a bassa entalpia, ossia un funzionamento a bassa temperatura per il fluido di lavoro, risulta più agevole per via delle basse profondità da raggiungere; perciò impianti dediti a poche, se non singole, utenze sfrutterebbero solamente le acque del primo acquifero, quello più superficiale. Di conseguenza si ipotizza un utilizzo abbastanza diffuso di questa tecnologia dal basso impatto ambientale e dagli elevati vantaggi in termini di risparmio energetico nell'ambiente urbano, considerando un aumento dei prelievi idrici dalla falda freatica del 10%. Nel modello sviluppato si modificano quindi le portate emunte solo

per quei pozzi che estraggono dal primo acquifero, lasciando invariati le restanti captazioni: la variazione di portata rispetto alla condizione odierna è di circa $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$, pari a $7.8 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$, per una portata totale emunta dal primo acquifero di $2.7 \text{ m}^3/\text{s}$, ossia $85 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ annui.

Purtroppo, essendo molto maggiore il prelievo dal secondo acquifero, un lieve aumento degli emungimenti dall'acquifero superficiale non porta risultati soddisfacenti in termini di abbassamento del livello idrico, come si nota dal drawdown di figura 85 che supera i 30 centimetri per arrivare ai 40 centimetri massimi nell'area più centrale della città. Ipotizzando un possibile scenario futuro di maggiore sviluppo di soluzioni alternative dal punto di vista geotermico, si decide allora di aumentare le portate dall'acquifero superficiale del 30%, corrispondente all'estrazione di $0.74 \text{ m}^3/\text{s}$ in più rispetto all'attuale situazione per l'acquifero A, ossia un aumento di 23 milioni di metri cubi annui, per un totale di portate estratte dalla falda freatica di $3.21 \text{ m}^3/\text{s}$, ossia 101 milioni di metri cubi all'anno.

In questo secondo caso gli abbassamenti piezometrici sarebbero più apprezzabili, come da figura 85: nel centro città, dove insiste il maggior numero di pozzi estraenti dall'acquifero superficiale (zona Centrale-Porta Garibaldi), il drawdown raggiunge anche il metro.

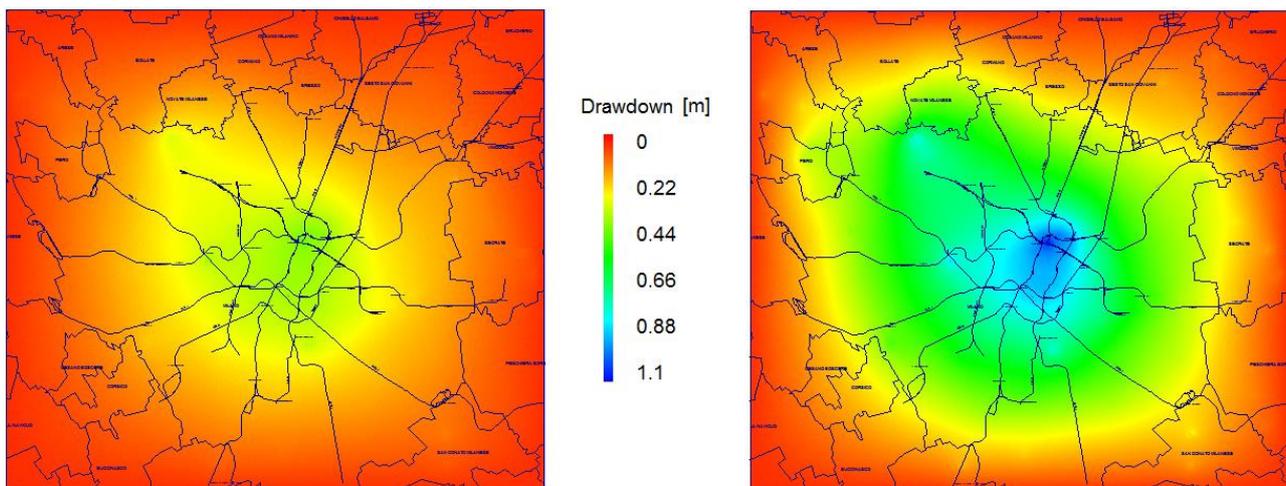


Figura 85 - Variazioni piezometriche rispetto alla situazione attuale indotte da un aumento del 10% (sx) e un aumento del 30% (dx) dei prelievi idrici dal primo acquifero grazie allo sfruttamento di impianti geotermici

Un simile drawdown nella stazione di Montenapoleone (linea 3) riuscirebbe a rendere nulla l'interazione della struttura con la falda; per la linea 2, nonostante il suo passaggio per la zona più interessata dagli abbassamenti, non si assisterebbe ad alcun miglioramento di condizione poiché l'altezza della presenza idrica nelle stazioni della tratta è ben maggiore rispetto a quella attualmente sviluppata a Montenapoleone. Considerando i futuri scenari socio-economici con la diminuzione dei prelievi totali, si potrebbe avere una completa sommersione delle stazioni di Maciachini e Lancetti per lo scenario più pessimistico dei prelievi dimezzati, invece che già alla prima diminuzione dei prelievi del 20%, così come Zara potrebbe non vedere la risalita d'acqua fino alla sua base se non con lo scenario peggiore.

5.3 Il tunnel scolmatore del fiume Seveso

Il Comune di Milano e Regione Lombardia hanno recentemente promosso un Protocollo d'intesa riguardo la possibilità della riapertura delle vie d'acque dei Navigli lombardi. In questo ambito si cercano di sviluppare soluzioni che possano riportare all'antica connessione idraulica del centro città; in particolare si vuole portare le acque del Naviglio Martesana fino alla Darsena, come era originariamente, seguendo l'antico tracciato del canale navigabile lungo la cerchia interna. L'intervento prevede di separare il torrente Seveso e il Naviglio suddetto, che vennero fatti confluire negli anni Sessanta in un'unica canalizzazione per poi dare origine al Cavo Redefossi. Per permettere più agevolmente questa riconnessione, data la variazione delle portate in arrivo rispetto al passato, è in fase di progettazione un tunnel sotterraneo, che avrà la duplice funzione di protezione idraulica come scolmatore di piena per il fiume Seveso (il quale è da molti anni protagonista di esondazioni nella parte Nord di Milano, in corrispondenza dell'inizio del suo tratto tombinato cittadino) e di drenaggio delle acque sotterranee. Così facendo, il corso principale del Seveso continuerà nel Cavo Redefossi, la Martesana raggiungerà la Darsena per proseguire nel Naviglio Pavese, dove le sue acque saranno utilizzate a scopi irrigui invece che disperse nel Lambro e il tunnel sotterraneo porterà le acque in eccesso prese dal Seveso fino al Lambro nella zona SE della città, secondo lo schema di figura 86.

Le più probabili caratteristiche geometriche e planimetriche del tunnel sono presentate nella seguente tabella 21:

Tunnel sotterraneo	
Lunghezza [km]	11
Diametro medio [m]	5
Portata totale [m ³ /s]	2
Profondità [m]	da 25 a 4

Tabella 21 - Caratteristiche geometriche e di portata del tunnel sotterraneo

Nella parte settentrionale il tunnel avrà la maggiore profondità di 25 metri poiché dovrà passare al di sotto di infrastrutture preesistenti: partirà dalla zona Ca' Granda dove il fiume Seveso è appena diventato tombinato, all'altezza della stazione di Istria della linea 5, incrocerà la Martesana, passerà al di sotto della linea rossa in zona Loreto a N della stazione di Pasteur e della linea verde presso Udine per poi proseguire verso S a profondità inferiori mano a mano che ci si avvicina al fiume Lambro, non incontrando ulteriori strutture se non la stazione poco profonda di prossima costruzione di Forlanini Q. Re della linea 4.

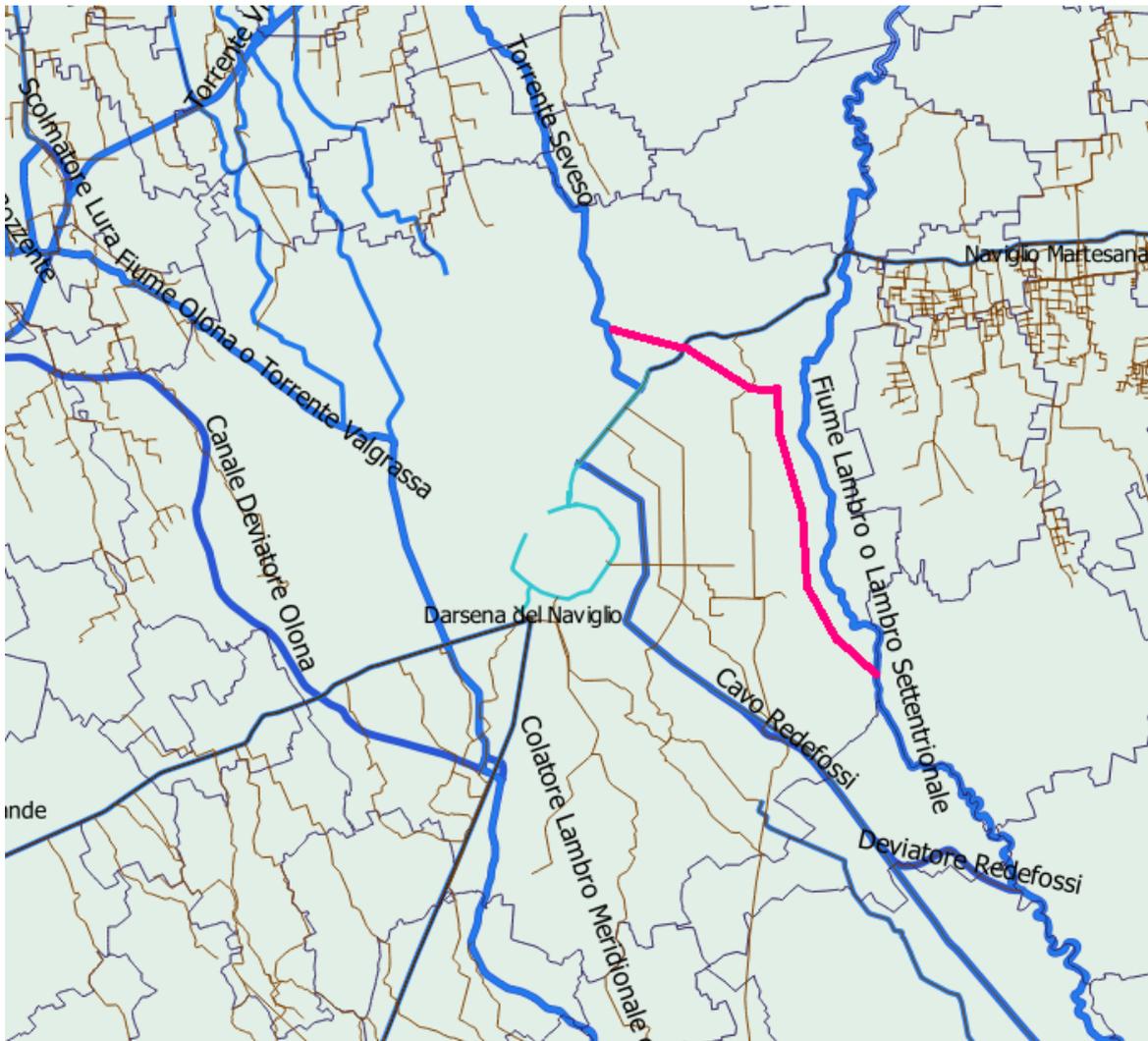


Figura 86 – Idrografia dell’area di studio con in rosso il tunnel sotterraneo in fase di progettazione

Il canale viene inserito nel modello passando dal layer 4 nella parte settentrionale al primo layer del tratto conclusivo; avendo una funzione drenante, si implementa il suo effetto tramite delle condizioni al contorno di tipo *'drain'*, per le quali il flusso idrico in uscita dall’acquifero dipende dall’altezza del livello idrico simulato rispetto all’altezza a cui si trova la condizione al contorno: se il carico simulato è più alto della posizione del dreno, significa che il dreno rimuove acqua dall’acquifero, mentre se il dreno insiste ad un’altezza superiore, non esiste acqua rimossa dalla cella in quanto il dreno è considerato essere in condizioni secche (con questa condizione al contorno non è possibile avere acqua immessa nell’acquifero, caratteristica che la distingue dalla condizione al contorno *'river'*, per la quale un flusso entrante nell’acquifero è concesso). Per semplicità tutta la lunghezza della cella è considerata attraversata dalla condizione drenante.

Il risultato della simulazione fornisce valori apprezzabili di abbassamento piezometrico (figura 87): nelle immediate vicinanze del manufatto, si arriva a superare il metro e mezzo, mentre tipici valori attorno al metro sono distinguibili nella zona del dominio prossima al tunnel.

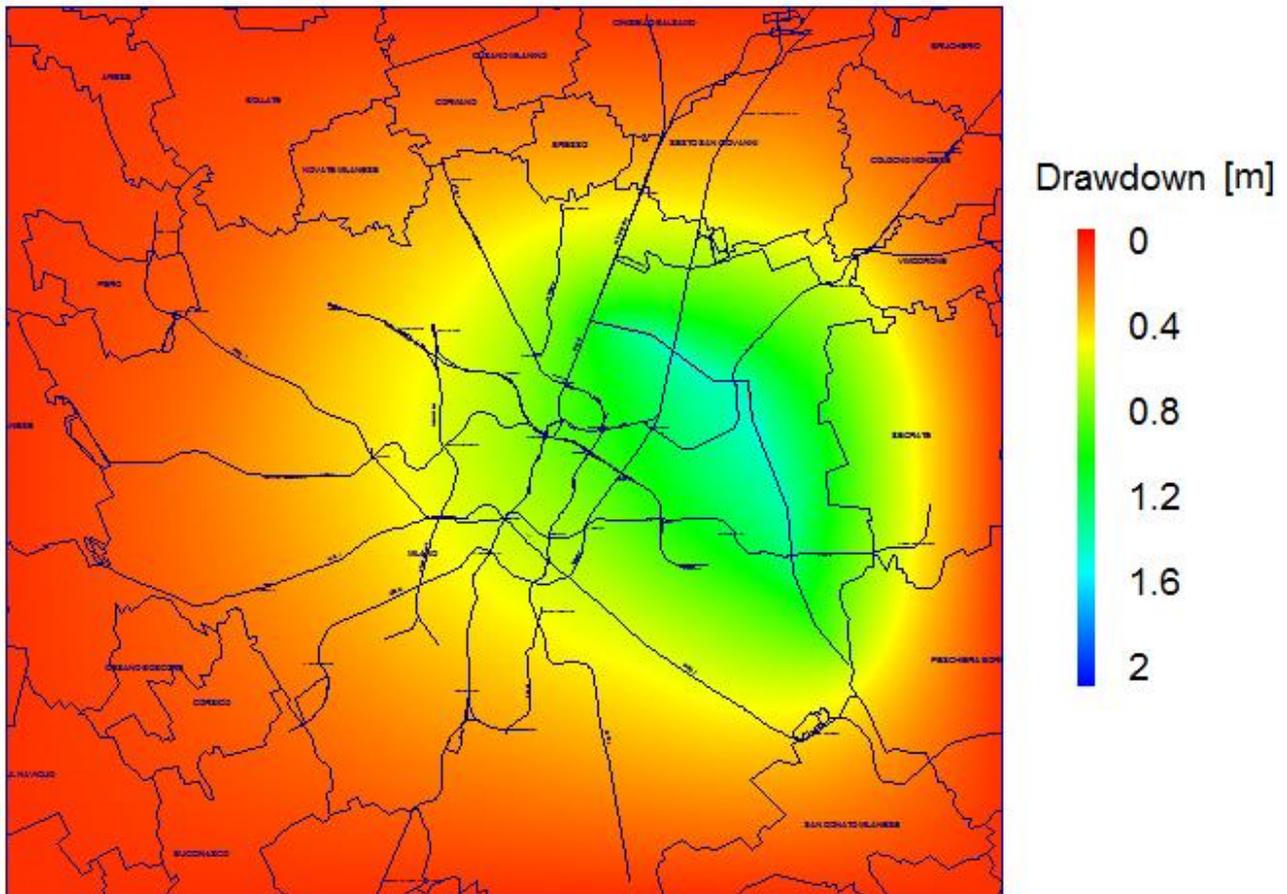


Figura 87 - Variazioni piezometriche rispetto alla situazione attuale indotte dalla costruzione del tunnel sotterraneo per la ricostituzione dell'originaria connessione idraulica

Per le stazioni della linea 2 di Piola e Lambrate, situate molto vicine al tunnel, l'abbassamento del livello dell'ordine di 1 metro permetterebbe la discesa dell'altezza di falda al di sotto della base degli elementi strutturali, mentre le altre stazioni rientranti nella zona di maggiore influenza dell'opera drenante vedrebbero sì una diminuzione del livello idrico, ma non tale da modificare la loro condizione in rapporto alla presenza acquifera.

5.4 Lo scenario completo di mitigazione

Si è visto come il tunnel dalla funzione drenante dia luogo a degli effetti sensibili sull'altezza di falda, ma solo localizzati nel settore nord-orientale del comune milanese; al contrario la diminuzione del recharge grazie alla migliore gestione delle risorse idriche e l'ottimizzazione dei pompaggi dal primo acquifero causano un abbassamento piezometrico inferiore, ma decisamente uniforme nell'intero territorio della cittadina per i valori di media variazione (colore verde in figura 84 e 85). Agendo i tre interventi considerati su differenti parametri del modello e note le aree maggiormente interessate dalle variazioni piezometriche per ogni sviluppo futuro (area occidentale per le irrigazioni, centrale per i pompaggi aumentati e orientale per il tunnel drenante), si conclude che la soluzione ottimale per il controllo del livello di falda sarebbe nella

commistione dei tre scenari auspicati, la quale definirebbe una realtà urbana caratterizzata da maggiore sostenibilità ambientale e da una gestione della risorsa idrica integrata con acque sotterranee e superficiali considerate nella loro totalità e non più come sistemi divisi.

Si sviluppa un modello in cui è implementato il tunnel drenante dal Seveso al Lambro come descritto al paragrafo 5.3 e dove la ricarica per le acque sotterranee è diminuita del 25% rispetto alla condizione attuale, così come i pompaggi dall'acquifero superficiale sono aumentati del 30%. Si mostra il risultato della simulazione in termini di drawdown (figura 88), che è nettamente superiore rispetto ai casi singoli grazie alla sovrapposizione degli effetti benefici degli interventi attuabili.

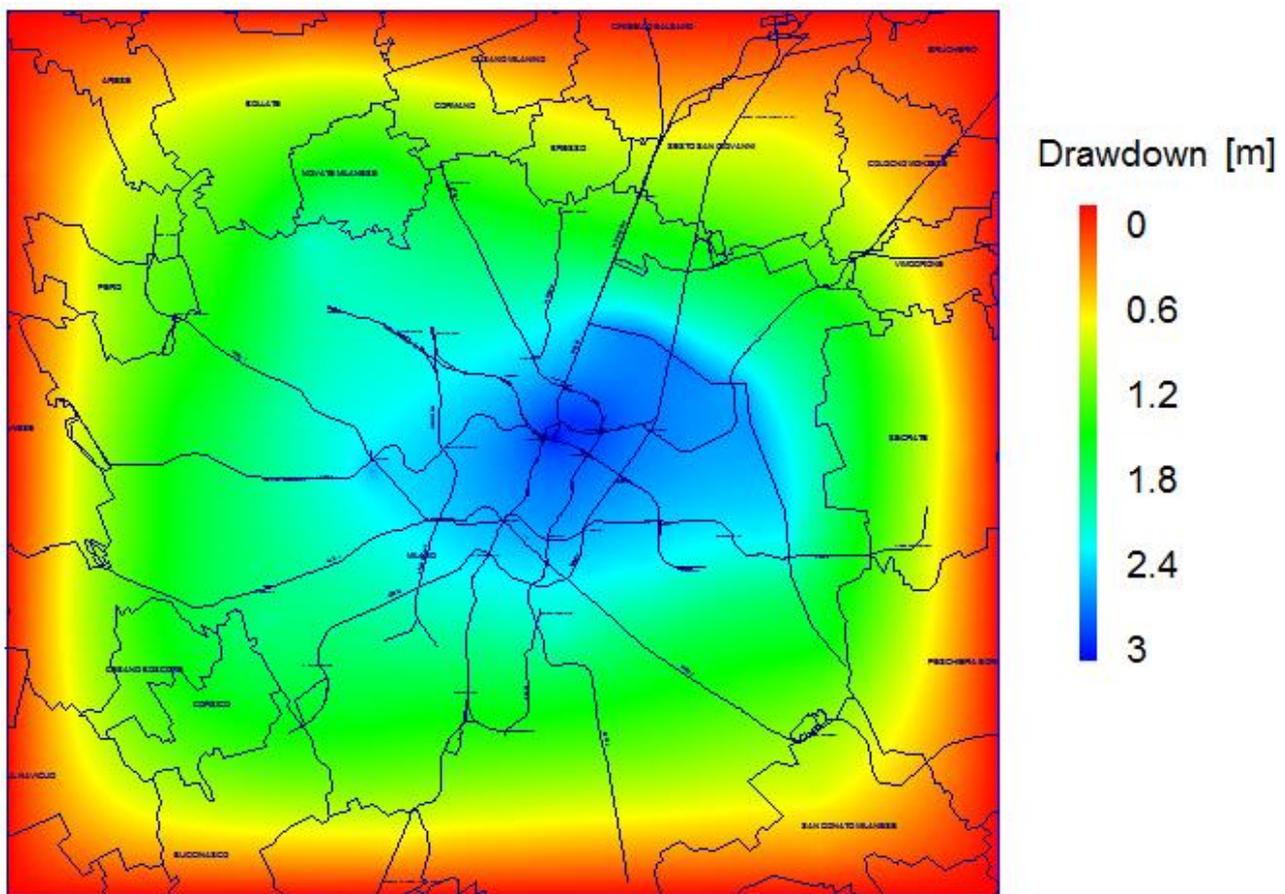


Figura 88 - Variazioni piezometriche rispetto alla situazione attuale indotte da uno scenario con tunnel drenante, recharge diminuito del 25% e pompaggi dal primo acquifero aumentati del 30%

La zona centrale dal tunnel drenante alla biforcazione della linea 1 è interessata da un abbassamento totale del livello idrico pari a 2.5 metri con drawdown localizzati nell'area tra Centrale e Porta Garibaldi fino a 3 metri, grazie all'intensa presenza di pozzi d'estrazione (presso le stazioni di Porta Garibaldi, Gioia e Centrale si hanno le maggiori variazioni percentuali rispetto ai valori attuali, ossia di circa il 2.7%). In tutto il territorio della città si ottiene comunque una costante diminuzione del livello di 1.5 m; l'obiettivo iniziale di ottenere una sensibile e diffusa variazione uniforme del livello idrico nel dominio è raggiunto grazie agli interventi sopracitati, con i

quali è possibile non solo ottenere vantaggi su grandi estensioni territoriali (problema riscontrato per esempio nei pompaggi da cava) ma anche mantenere a lungo termine una situazione più agevole e controllabile dal punto di vista della presenza idrica sotterranea.

Date le forti variazioni di livelli idrici, anche l'andamento della piezometria viene modificato sensibilmente (figura 89): rispetto alla situazione attuale la depressione piezometrica sarebbe ancora più marcata, con la linea piezometrica dei 100 m che cambia il suo andamento naturale e una distanza tra le isopieze 100 e 105 ancora più ampia (quindi un gradiente di diminuzione dell'altezza di falda molto basso relativamente al resto del dominio). A livello generale lo spostamento delle linee verso l'alto indica come tutto il territorio del comune milanese (fino alla isopieza 125) presenti valori più bassi di altezza idrica.

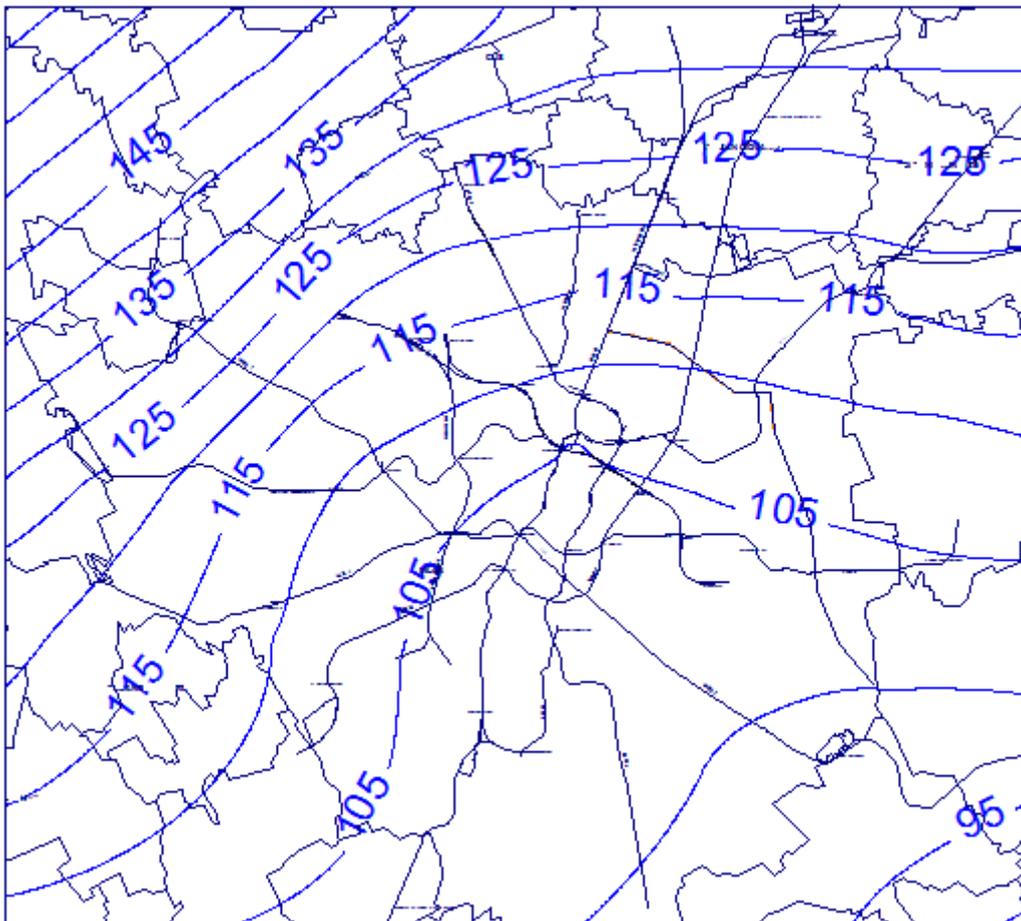


Figura 89 - Andamento piezometrico per lo scenario con tunnel drenante, recharge diminuito del 25% e pompaggi dal primo acquifero aumentati del 30%

Gli effetti positivi non si limiterebbero alla regolamentazione del livello piezometrico ad una quota sostenibile, ma si esplicherebbero direttamente sulle strutture metropolitane: la rete dei trasporti sotterranei ha infatti il suo nucleo proprio nell'area di maggiore effettività degli interventi mirati scelti. In generale con questi miglioramenti legati al sistema idrico sotterraneo, ma anche superficiale, sarebbero ben 14 le stazioni metro che vedrebbero un proprio cambiamento positivo nell'interazione con la falda. Affori centro nella linea 3 e Porta Venezia del passante ferroviario

sarebbero le uniche di queste stazioni a non essere più sommerse dalla circostante acqua di falda, bensì solo interessate da un livello tale da superare la loro base; le restanti 12, che invece raggiungerebbero condizioni di completa assenza di acqua, sono le seguenti:

- Molino Dorino e S. Leonardo per la linea 1
- Porta Garibaldi, Gioia, Piola, Lambrate e Udine per la linea 2
- Montenapoleone, Duomo, Missori e Crocetta per la linea 3
- Dateo del passante ferroviario.

In tabella 22 si riportano tutte le stazioni con relativi rapporti al livello idrico (direttamente confrontabile con la tabella 16 relativa alla situazione attuale):

Stazioni	Condizioni secche	Presenza d'acqua	Sommerse
linea 1 rossa	tutte le restanti	Rho Fiera; Pero	
linea 2 verde	Lanza; Porta Garibaldi; Gioia; Piola; Lambrate; Udine	tutte le restanti	
linea 3 gialla	Zara; Sondrio; Centrale; Repubblica; Montenapoleone; Duomo; Missori; Crocetta; Lodi Tibb; Brenta; Corvetto; Porto di Mare; Rogoredo	Affori centro; Dergano; Maciachini; Turati; Porta Romana	Comasina; Affori FS
passante	Dateo; Porta Vittoria	Lancetti; Repubblica; Porta Venezia	Porta Garibaldi

Tabella 22 - Possibili condizioni delle stazioni metropolitane in funzione del livello idrico per lo scenario di migliore mitigazione

In parallelo a quanto svolto per gli scenari futuri più critici, si presenta la mappa delle stazioni metropolitane per lo scenario di mitigazione proposto in funzione alla presenza idrica in confronto sempre con la situazione attuale (figura 90): si nota come la parte centrale della linea 3 e buona parte della tratta settentrionale della linea 2 non subiscano più interferenza da parte dei livelli acquiferi.

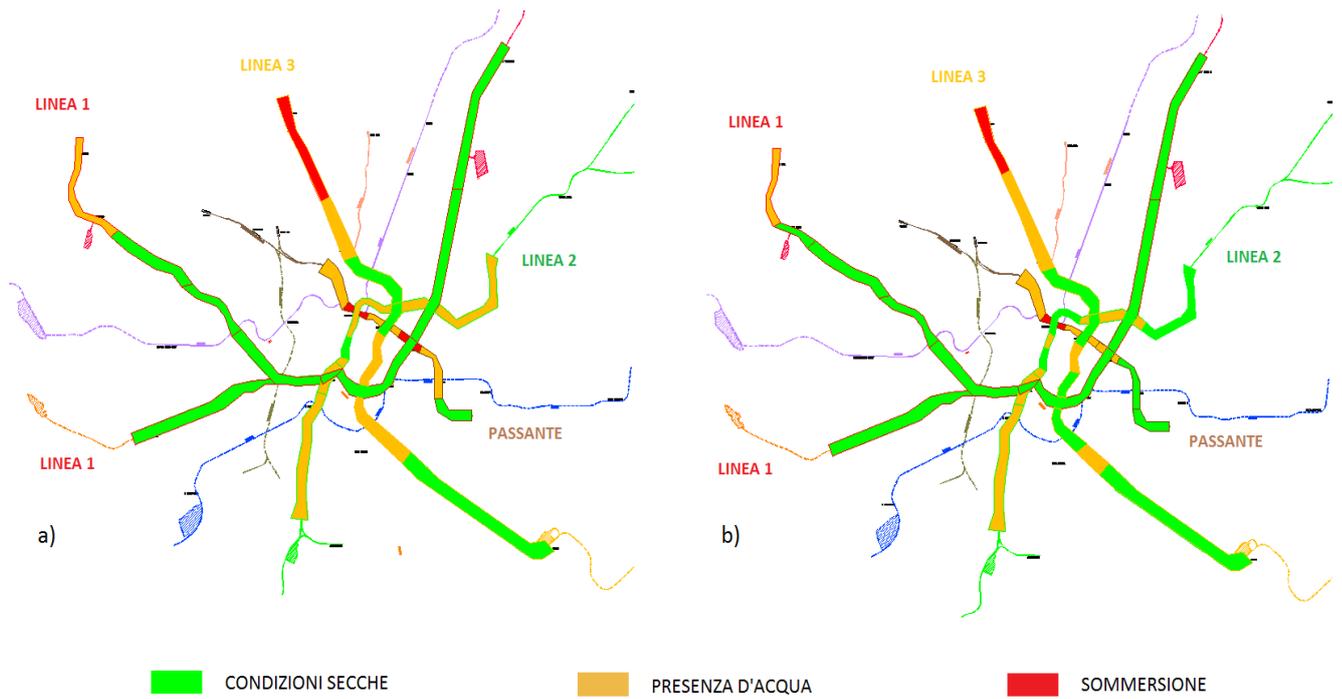


Figura 90 - Mappa dei trasporti sotterranei con indicazione delle relazioni tra stazioni e presenza idrica per a) la situazione attuale b) lo scenario di mitigazione più efficace

Conclusioni

L'obiettivo di questo elaborato è l'individuazione delle interazioni del flusso idrico sotterraneo dell'acquifero più superficiale presente nel territorio di Milano, ossia l'acquifero A secondo la classificazione eseguita da Regione Lombardia & Eni (2002), con le strutture sotterranee presenti grazie all'implementazione di un modello di flusso in regime stazionario.

Prerogativa principale per un adeguato e realistico risultato è l'inserimento delle strutture facenti parte del sistema di trasporti metropolitano sotterraneo all'interno del modello matematico: questa necessità è raggiunta grazie alla caratterizzazione del tessuto urbano sotterraneo con la conoscenza dello sviluppo planimetrico delle linee di trasporti, così come le loro sezioni trasversali lungo il loro percorso, quindi le quote di profondità delle gallerie.

Il modello concettuale ha principalmente preso il via dalle indagini svolte in ottica del progetto CARG per la realizzazione di un'aggiornata carta geologica del territorio milanese; i dati da qui derivanti, congiuntamente con una quantificazione precisa dei prelievi idrici da entrambi gli acquiferi modellizzati e la disponibilità di targets numerosi e distribuiti uniformemente nell'area di studio, hanno permesso di definire un modello dettagliato, la cui calibrazione ha ottenuto ottimi valori statistici.

La simulazione del modello ha portato a definire un andamento piezometrico in continuità con il trend degli ultimi decenni caratterizzato da un innalzamento del livello di falda freatica, che continua a vedere nel centro della metropoli un forte rallentamento del gradiente delle isopieze, formando una tipica depressione piezometrica.

L'obiettivo principale dell'influenza reciproca tra flusso idrico e strutture sotterranee ha effettivamente mostrato una duplice relazione:

- la presenza delle strutture dei trasporti al di sotto del tetto di falda provoca variazioni di velocità e di direzione del flusso, così come abbassamenti o risalite piezometrici, sia in aree diffuse del dominio sia localmente in prossimità di tratti impermeabili ortogonali al flusso
- le deviazioni del vettore velocità e l'instaurarsi di componenti verticali del flusso conseguenti alla presenza delle strutture portano problematiche agli elementi strutturali stessi, come fenomeni di spinta verso l'alto (*uplift*); l'aumento delle velocità al di sotto delle strutture può provocare fenomeni di erosione localizzata.

La valutazione delle traiettorie delle singole particelle è una chiara conferma del movimento idrico, che in corrispondenza degli elementi metropolitani si spinge al di sotto dell'ostacolo per poi risalire.

Obiettivo importante era anche la definizione puntuale delle situazioni dove il livello piezometrico è interferente con le singole stazioni metropolitane, obiettivo ottenuto grazie al modello di flusso studiato localmente per la situazione attuale; stessa operazione è svolta per scenari futuri scelti conseguentemente a previsioni socio-economiche e climatiche, oppure di sviluppo di nuove infrastrutture sotterranee. Possibili future interferenze tra livello di falda libera e strutture sotterranee sono segnalate, con particolare attenzione per le stazioni caratterizzate da nuova interferenza con la falda o da totale sommersione.

Per ovviare alla problematica attuale e futura dell'innalzamento del livello idrico si propongono soluzioni efficaci non solo nel breve periodo, ma anche a lungo termine, in grado di mantenere un livello piezometrico sostenibile sia dal punto di vista ambientale che antropico, in ottica di una razionalizzazione delle risorse idriche sotterranee e di una loro gestione integrata che consideri la totalità del sistema acque sotterranee e superficiali; per questi scenari di mitigazione si segnalano miglioramenti nell'interferenza dei livelli acquiferi con le stazioni metropolitane, in particolare se caratterizzate da scomparsa di presenza idrica.

Appendice A: Equazioni governanti del codice di calcolo MODFLOW

Il movimento tridimensionale d'acqua di densità costante nel sottosuolo attraverso un mezzo poroso può essere descritto dall'equazione differenziale alle derivate parziali (eq. 1):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

dove:

- h è l'altezza piezometrica (L)
- W è il flusso volumetrico per unità di volume rappresentante ingressi e uscite d'acqua dal sistema, con valori negativi nel secondo caso (T^{-1})
- K_{xx} K_{yy} K_{zz} sono le conducibilità idrauliche lungo le coordinate principali (L/T)
- S_s è il coefficiente di immagazzinamento specifico del materiale poroso (L^{-1}).

Le conducibilità idrauliche k e il coefficiente S_s possono essere funzioni dello spazio; nel caso di studio $K_{xx} = K_{xx}(x,y,z)$ (lo stesso vale per K_{yy} e per K_{zz}) mentre il coefficiente S_s è costante su tutto il dominio. Questa equazione, fornita di condizioni al contorno, in particolare di valori di livello piezometrico o di flusso stesso, e di condizioni iniziali per l'altezza piezometrica, costituisce la rappresentazione matematica del flusso d'acque sotterranee. Una soluzione analitica a tale equazione fa sì che si abbia un'espressione algebrica in $h(x,y,z,t)$ le cui derivate sostituite nell'equazione governante la soddisfino insieme alle condizioni iniziali e al contorno.

Essendo le soluzioni analitiche raramente possibili, si sviluppano metodi numerici per la soluzione dell'equazione 1 che danno soluzioni approssimate ma accettabili a fini ingegneristici, come per esempio MODFLOW: il codice si basa su un metodo alle differenze finite, dove il sistema continuo dell'eq. 1 è sostituito da un set finito di punti discreti nello spazio e nel tempo e le derivate parziali diventano termini calcolati dalle differenze dei valori di livello piezometrico nei punti discretizzati. Si ottiene un sistema di equazioni lineari alle differenze che dà una soluzione che produce valori di altezze d'acqua in punti specifici e in momenti specifici. Questa discretizzazione porta a descrivere il modello sotto forma di una griglia di celle, in ognuna delle quali è trovato il valore puntuale.

Lo sviluppo dell'equazione di flusso nella forma delle differenze finite deriva dall'applicazione dell'equazione di continuità: la somma di ogni flusso entrante e uscente da una cella deve essere uguale alla variazione del valore di immagazzinamento all'interno della cella. Seguendo sempre l'assunzione di densità costante dell'acqua, il bilancio idrico di una cella è descritto dalla seguente equazione di continuità (eq. 2):

$$\sum Q_i = SS \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V$$

dove:

- Q_i sono i flussi nella cella, siano essi dal contributo positivo o negativo (L^3/T)
- SS è lo specific storage in formulazione secondo le differenze finite ed è equivalente al significato di S_s , ossia il volume d'acqua che può essere recepito per unità di volume del materiale per unità di variazione del livello piezometrico (L^{-1})
- ΔV il volume della cella (L^3)
- Δh la variazione piezometrica nell'intervallo di tempo Δt .

Prendendo in considerazione la cella i, j, k secondo il seguente schema di figura 91

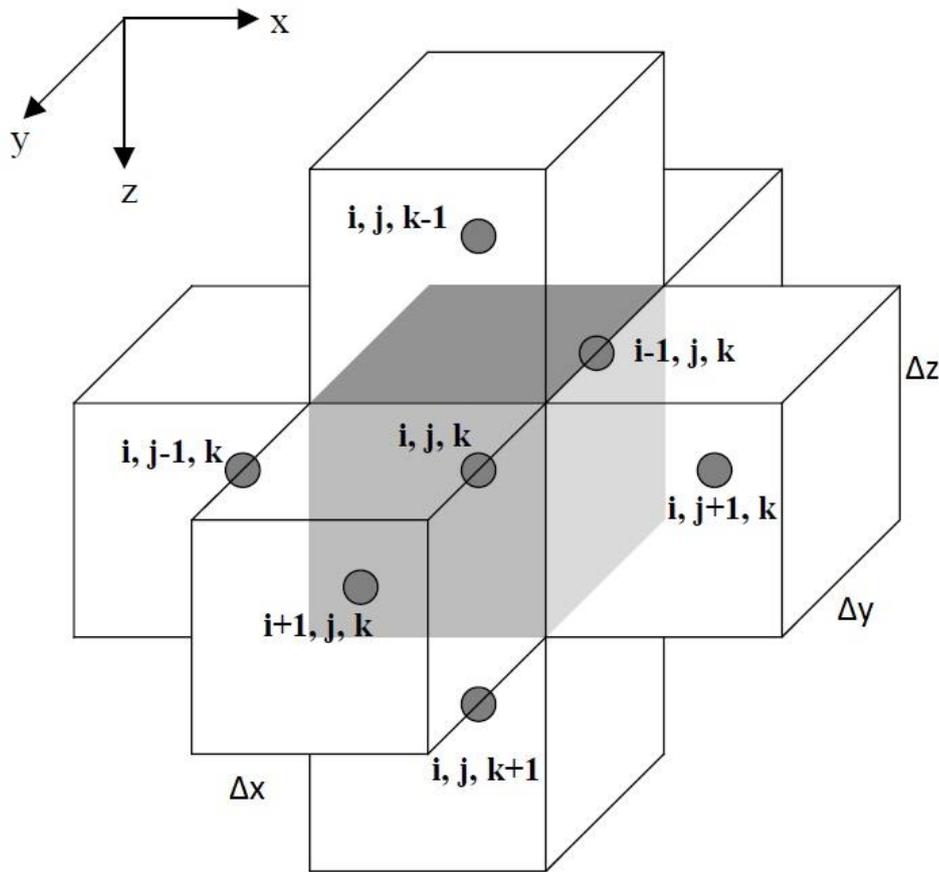


Figura 91 - Schema di definizione delle celle e delle loro dimensioni

e flussi entranti positivi, il flusso verso la cella i, j, k dalla cella $i, j-1, k$ è dato dalla legge di Darcy (eq. 3):

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta y \Delta z \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta x_{j-1/2}}$$

dove:

- $h_{i,j,k}$ è l'altezza idrica al nodo i,j,k e $h_{i,j-1,k}$ è l'altezza idrica al nodo $i,j-1,k$ (L)
- $q_{i,j-1/2,k}$ è il flusso volumetrico attraverso la faccia comune (L^3/T)
- $KR_{i,j-1/2,k}$ è la conducibilità idraulica lungo la riga tra i nodi $i,j-1,k$ e i,j,k (L/T)

La eq. 3 descrive l'esatto flusso per un caso monodimensionale; essendo la situazione studiata un movimento tridimensionale, si scrivono tutte le equazioni di Darcy per tutte le facce in comune con la cella i, j, k e si combinano i termini dimensionali della griglia e le varie conducibilità idrauliche in un unico termine, prodotto delle conducibilità idrauliche e dell'area di passaggio del flusso diviso per la lunghezza del percorso di flusso (coincidente nel caso con la distanza tra i nodi).

In tutto si hanno 6 equazioni di flusso, una per ogni faccia della cella i, j, k .

Si devono considerare anche eventuali flussi dovuti a sorgenti esterne all'acquifero, come fiumi, ricarica o pozzi (nel caso di studio, come già segnalato, importante è il contributo dei pozzi). In generale il flusso derivante da cause esterne può essere dipendente dal valore di altezza piezometrica della cella e indipendente da tutte le altre altezze nell'acquifero oppure completamente indipendente dal livello piezometrico; di conseguenza questa tipologia di flusso è rappresentata matematicamente dall'equazione di una retta (eq. 4):

$$a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + q_{i,j,k,n} \quad \text{con:}$$

$a_{i,j,k,n}$ flusso dalle n sorgenti esterne (L^3/T)

$p_{i,j,k,n}$ e $q_{i,j,k,n}$ costanti (rispettivamente L^2/T e L^3/T).

Ad esempio l'effetto di un pozzo viene considerato indipendente dall'altezza d'acqua quindi il suo apporto sarà costituito solo dalla costante q . Se si combinano invece tutti i possibili N stress agenti su una cella, il flusso combinato sarà espresso dall'equazione seguente (eq. 5):

$$\sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} = P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} \quad \text{con } P_{i,j,k} \text{ e } Q_{i,j,k} \text{ somma algebrica di tutte le } N \text{ costanti } p_{i,j,k,n} \text{ e } q_{i,j,k,n}.$$

Questi contributi vengono aggiunti all'eq. 2 per dare l'equazione finale (eq. 6):

$$q_{i,j-1/2,k} + q_{i,j+1/2,k} + q_{i-1/2,j,k} + q_{i+1/2,j,k} + q_{i,j,k-1/2} + q_{i,j,k+1/2} + P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k} (\Delta x_j \Delta y_i \Delta z_k) \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}$$

L'approssimazione alle differenze finite della derivata dell'altezza idrica nel tempo è espressa in termini di altezze specifiche e tempi. Conoscendo l'andamento nel tempo delle altezze specifiche e specificando due valori di tempo t^m , tempo in cui i termini di flusso sono stimati, e t^{m-1} , tempo che precede t^m , si associano ai tempi i relativi valori di altezza idrica $h_{i,j,k}^m$ e $h_{i,j,k}^{m-1}$ per poi approssimare la derivata d'interesse secondo

$$\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \cong \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}} \quad (\text{eq.7}).$$

Questo approccio per l'approssimazione della variazione di altezza idrica in un intervallo di tempo precedente rispetto al momento in cui si stima il flusso si definisce come backward-difference; sebbene esistano altre metodologie per arrivare alla derivata in questione, l'approccio suddetto è numericamente sempre stabile, poiché gli errori introdotti ad ogni valutazione temporale diminuiscono progressivamente con i tempi successivi. Unico difetto della backward-difference è l'elevato numero di equazioni che devono essere risolte contemporaneamente dal codice per ogni intervallo di tempo.

Sostituendo l'eq. 7 nella eq. 6 si ottiene un'equazione alle backward-difference che è sfruttata come base per la simulazione dell'equazione alle derivate parziali del flusso sotterraneo di acqua (eq. 1). Le incognite sono tuttavia 7: le sei altezze idriche h^m valutate per le sei celle adiacenti alla cella di riferimento e il valore di livello idrico per la cella stessa i,j,k . L'eq. finale non può essere quindi risolta indipendentemente perché per una sola cella si ha un'equazione sola in sette incognite, ma scrivendo tale equazione per ogni cella attiva della griglia si giunge ad un sistema di n equazioni in n incognite, poiché esiste una sola altezza h incognita per cella. Quindi si può risolvere il sistema contemporaneamente.

In conclusione si può dire che, noti i parametri idraulici, gli stress esterni all'acquifero, le condizioni al contorno e la distribuzione di altezze idriche iniziali, si raggiunge la stima delle distribuzioni di livelli idrici a tempi successivi. Attraverso ogni step risolutivo, partendo da un valore iniziale di h si giunge ad un valore di h al tempo finale dello step, scrivendo un'equazione tipo l'eq.6 per ogni cella della griglia in cui il livello acquifero è libero di variare nel tempo e risolvendo il sistema al tempo considerato di termine dello step. Questo procedimento è ripetuto tante volte quanti sono i time steps necessari per terminare l'intervallo di tempo d'interesse per la simulazione. Perciò all'interno di una stessa simulazione le incognite continuano a variare: le altezze idriche alla fine di ogni time step sono incognite per poi diventare termini noti all'inizio del time step successivo.

Lo scorrere del tempo nel codice di calcolo è perciò costituito da un generico 'stress period' (non necessariamente uno solo) suddiviso in m time steps in ognuno dei quali vengono realizzate n iterazioni; MODFLOW infatti utilizza un metodo iterativo per ottenere la soluzione per ogni time step:

- il calcolo dei valori di livello idrico è iniziato assegnando valori di tentativo di h per ogni nodo alla fine del time step
- la simulazione modifica tali valori, producendo un nuovo set di valori di h più vicini alla soluzione del sistema di equazioni
- si ripete la procedura fino a quando i valori ad interim trovati soddisfano esattamente il set di equazioni.

Ogni ripetizione del calcolo di valori di h è un'iterazione e queste vengono fermate quando i cambiamenti prodotti dall'avanzare delle iterazioni diventano molto piccoli; le iterazioni dovrebbero fermarsi quando le altezze calcolate sono abbastanza vicine alla soluzione esatta, ma essendo questa ignota, bisogna specificare quando fermare le iterazioni con un metodo indiretto: si stabilisce quindi che la variazione tra valori di h da un'iterazione alla successiva deve essere minore di una certa quantità, definita 'criterio di convergenza':

- quando alla fine di una iterazione il più grande valore assoluto di Δh tra tutte le celle supera il criterio di convergenza, le iterazioni continuano

quando il maggiore Δh è minore del criterio di convergenza, l'iterazione è giunta a convergenza quindi terminano le iterazioni e termina quel time step.

Appendice B: Equazioni governanti del codice di calcolo MODPATH

L'algoritmo di MODPATH per il particle-tracking può essere implementato sia per il caso di flussi stazionari che per quello transitorio; si descrive di seguito le assunzioni alla base dell'algoritmo e le equazioni governanti, il tutto riferito al caso stazionario. L'equazione differenziale alle derivate parziali che descrive la conservazione della massa in caso stazionario per un sistema di flusso idrico sotterraneo nelle tre dimensioni è espressa come:

$$\frac{\partial}{\partial x}(nv_x) + \frac{\partial}{\partial y}(nv_y) + \frac{\partial}{\partial z}(nv_z) = W \quad (\text{eq. 8})$$

dove:

- v_x v_y v_z sono le componenti principali del vettore della velocità media dell'acqua sotterranea [L/T]
- n è la porosità del materiale
- W rappresenta il volume d'acqua originato o consumato da cause indipendenti dall'acquifero per unità di volume dell'acquifero stesso.

Questa equazione, valida per un volumetto infinitesimo d'acquifero, deve essere ora riportata in forma di differenze finite con una approssimazione che può essere pensata come un'equazione di bilancio di massa per una cella di dimensioni finite appartenente al volume dell'acquifero, che è interessata sia dall'ingresso che dalla uscita di flusso idrico, così come da possibili fonti interne di generazione o di consumo d'acqua.

Si definiscono inizialmente il sistema di coordinate principali x-y-z e gli indici della griglia i,j,k a cui apparterranno le celle come da figura 92.

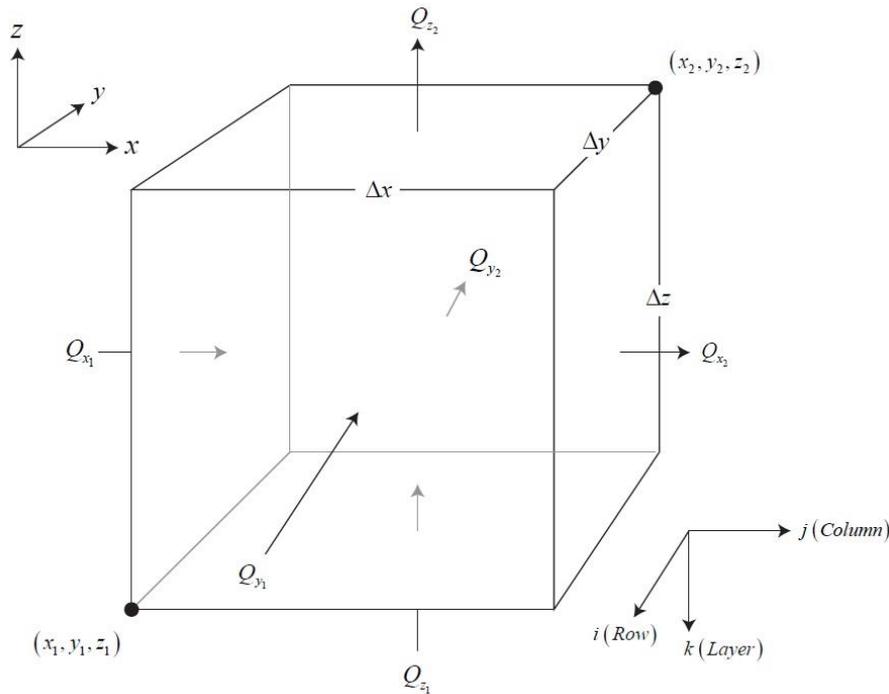


Figura 92 - Definizione coordinate e portate entranti-uscenti

In figura 61 si notano anche le portate volumetriche Q entranti e uscenti le sei facce della cella, con verso coincidente a quello della relativa coordinata del sistema di riferimento.

Si trovano le componenti della velocità media per ogni faccia della cella dividendo le portate volumetriche per l'area della faccia attraversata moltiplicata per la porosità del materiale: ad

esempio per la componente della velocità media per la faccia di sinistra, si ha $v_{x_1} = \frac{Q_{x_1}}{n\Delta y\Delta z}$ (eq. 9).

Se nella cella sono presenti contributi al flusso indipendenti dall'acquifero, ossia portate Q_s , si arriva a scrivere la seguente equazione di bilancio di massa per la cella (eq. 10), dove vengono rilevate le differenze tra le componenti della velocità relative alla medesima coordinata spaziale:

$$\frac{(nv_{x_2} - nv_{x_1})}{\Delta x} + \frac{(nv_{y_2} - nv_{y_1})}{\Delta y} + \frac{(nv_{z_2} - nv_{z_1})}{\Delta z} = \frac{Q_s}{\Delta x\Delta y\Delta z}$$

La parte sinistra dell'eq. 10 rappresenta il tasso volumetrico netto del flusso in uscita/entrata per unità di volume della cella, mentre la parte destra indica il tasso volumetrico netto della produzione di flusso da parte di fonti interne alla cella per unità di volume. Sostituendo la legge di Darcy per le portate (si faccia riferimento all'eq. 3), si ottiene un set di equazioni algebriche in termini di carichi idraulici, la cui soluzione porterà a conoscere i valori di altezza idrica ai nodi delle celle; ottenute le altezze h , si potrà sfruttare direttamente la legge di Darcy per stimare le portate volumetriche tra le varie facce delle celle. La necessità del codice MODFLOW è qui spiegata: computazionalmente è il modello di flusso 3D alle differenze finite di MODFLOW a calcolare i valori necessari di carico idrico e portate tra le celle.

Per modellare le traiettorie delle particelle, si è sviluppato un metodo per valutare le principali componenti del vettore velocità ad ogni punto del campo di flusso sulla base delle portate tra le celle grazie ad un modello alle differenze finite. L'algoritmo utilizzato sfrutta una semplice interpolazione lineare per trovare le principali componenti della velocità all'interno della singola cella; ad esempio l'interpolazione per la direzione x della velocità è la seguente (eq. 11):

$$v_x = A_x(x - x_1) + v_{x_1} \quad \text{con} \quad A_x = \frac{(v_{x_2} - v_{x_1})}{\Delta x},$$

ossia una costante corrispondente al gradiente della velocità all'interno della cella. Con l'interpolazione lineare si produce un campo continuo del vettore velocità che soddisfa perfettamente l'equazione della conservazione di massa in ogni punto interno alla cella, sotto l'ipotesi di sorgenti interne uniformemente distribuite nella cella; la soddisfazione del bilancio di massa con il campo del vettore velocità assicura che le traiettorie delle particelle si distribuiranno attraverso il campo di flusso in modo coerente con il movimento idrico nel sistema come definito dalla soluzione dell'equazione di flusso alle differenze finite (eq. 6).

Si consideri ora una particella p all'interno di una cella tridimensionale; la variazione della componente x della sua velocità mentre si muove attraverso la cella è data da (eq. 12):

$$\left(\frac{dv_x}{dt}\right)_p = \left(\frac{dv_x}{dx}\right)\left(\frac{dx}{dt}\right)_p \quad \text{dove:}$$

- $\left(\frac{dv_x}{dt}\right)_p$ è la variazione nel tempo della componente x della velocità valutata nel punto della posizione della particella
- $\frac{dv_x}{dx}$ rappresenta la variazione lungo la coordinata x della componente x della velocità
- $\left(\frac{dx}{dt}\right)_p$ è la variazione nel tempo della posizione della particella, per definizione la componente della velocità nella direzione x per la posizione corrente della particella v_{x_p} .

Derivando l'eq. 11 secondo la coordinata x , $\frac{dv_x}{dx} = A_x$ e sostituendo le ultime due definizioni

nell'eq. 12, si ottiene $\left(\frac{dv_x}{dt}\right)_p = A_x v_{x_p}$ (eq. 13), valutabile in ugual maniera lungo le restanti

coordinate y e z . Portando a destra la dt , integrando con una valutazione fatta tra due tempi successivi t_1 e t_2 con $t_2 > t_1$ e definendo Δt la loro differenza, si giunge alla seguente eq. 14:

$$\ln \left[\frac{(v_{x_p})_{t_2}}{(v_{x_p})_{t_1}} \right] = A_x \Delta t \quad \text{che, con la sostituzione in essa dell'eq. 11 e opportunamente riordinata,}$$

porta all'equazione finale per la coordinata x (eq. 15):

$$(x_p)_{t_2} = x_1 + \frac{1}{A_x} \left[(v_{x_p})_{t_1} e^{(A_x \Delta t - v_{x_1})} \right], \text{ identica per le restanti coordinate } y \text{ e } z. \text{ Essendo le}$$

componenti della velocità della particella al tempo t_1 funzioni note della coordinata iniziale della particella, nell'eq. 15 si conoscono tutti i termini con pedice 1 e quindi le coordinate della particella a qualsiasi tempo futuro maggiore di t_1 possono essere calcolate grazie alla stessa eq. 15.

Note le assunzioni e le equazioni governanti il movimento delle singole particelle, si studia ora come si arriva all'interno del codice di MODPATH alle posizioni finali delle traiettorie. Il metodo dell'integrazione diretta è implementato con un algoritmo che permette di determinare l'esatto punto di uscita dalla cella da parte della particella nota la posizione iniziale all'interno della cella. Si considera il caso 2D descritto in figura 93 con particella in posizione di partenza x_p, y_p .

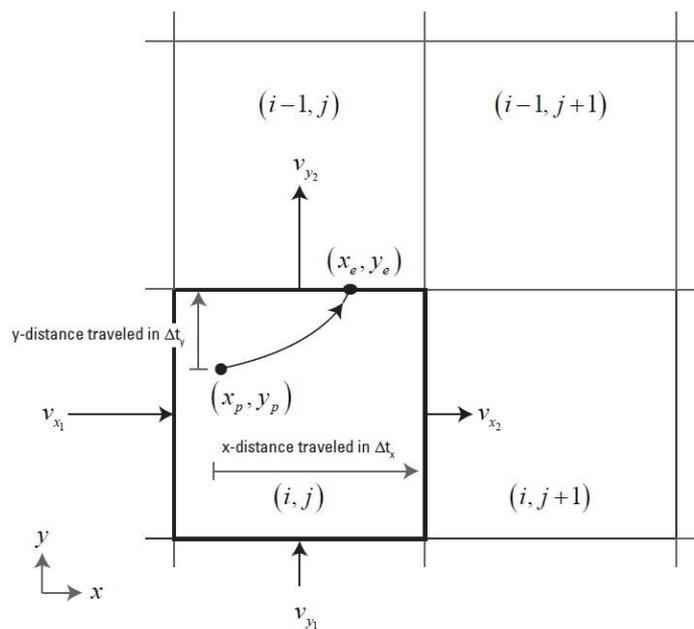


Figura 93 - Calcolo del punto d'uscita da una cella da parte di una particella

Si determina innanzitutto la faccia attraverso cui la particella lascia la cella: nella direzione x la velocità v_{x_p} viene calcolata al punto di partenza x_p, y_p grazie all'eq.11 e si determina il tempo richiesto alla particella per raggiungere la faccia x_2 tramite l'eq. 14; si ripete lo stesso procedimento per la direzione y e si confrontano i tempi di percorrenza della cella fino alla faccia di probabile uscita: se $\Delta t_x < \Delta t_y$ la particella uscirà dalla faccia x_2 , altrimenti se $\Delta t_x > \Delta t_y$ la particella uscirà dalla faccia y_2 , infine se $\Delta t_x = \Delta t_y$ l'angolo tra le facce x_2 e y_2 coinciderà col punto d'uscita.

Il tempo richiesto per viaggiare dalla posizione iniziale al contorno della cella è minore di Δt_x e Δt_y e chiamato tempo d'uscita Δt_e ; utilizzandolo nell'eq. 15, si possono determinare le coordinate d'uscita della particella x_e, y_e :

$$x_e = x_1 + \frac{1}{A_x} \left[(v_{x_p})_{t_p} e^{(A_x \Delta t_e - v_{x_1})} \right] \quad e \quad y_e = y_1 + \frac{1}{A_y} \left[(v_{y_p})_{t_p} e^{(A_y \Delta t_e - v_{y_1})} \right].$$

Il tempo totale in cui la particella raggiunge l'uscita dalla cella è dato da $t_e = t_p + \Delta t_e$, ossia la somma del tempo per arrivare alla posizione p e dell'intervallo di tempo per spostarsi fino al contorno d'uscita. Questa computazione dei tempi e delle nuove posizioni raggiunte viene svolta cella per cella finché la particella non raggiunge nel modello un punto di scarico come un fiume o un pozzo. Essendo la descrizione precedente relativa ad un caso 2D e avendo un caso di studio 3D per l'area dell'elaborato, si specifica che per ampliare suddetta descrizione al caso tridimensionale x-y-z, è sufficiente considerare l'eventualità del raggiungimento della faccia z_2 , calcolare tre diversi tempi di arrivo al contorno per le tre coordinate principali, individuare il minore tra questi tre e determinare anche la coordinata d'uscita z della particella, in modo da ottenere la traiettoria effettuata dalla particella non solo sul piano della sezione x-y, ma nel volume $\Delta x \Delta y \Delta z$ della cella.

Se si vuole determinare invece la posizione della particella ad un momento temporale di particolare interesse, per vedere quanto lontano dalla posizione di partenza può spingersi la particella in un ipotetico intervallo di studio, si possono calcolare le coordinate della particella ad un tempo intermedio direttamente grazie all'eq. 15 usando un appropriato valore di Δt compreso tra 0 e Δt_e , poiché in generale il momento temporale scelto non coincide certo con un momento esatto di passaggio della particella tra diverse celle.

Quanto qui sopra descritto vale per una griglia 3D regolare, con uno sviluppo planare rettangolare e celle in direzione verticale sempre rettangolari; la simulazione dei modelli dell'area oggetto dello studio è caratterizzata invece, come descritto al capitolo 3, da una griglia rettangolare con celle deformate in direzione verticale per adattarsi meglio alle unità stratigrafiche rappresentate, quindi variabili in spessore e non perfettamente orizzontali. Il metodo del particle-tracking può essere utilizzato anche per griglie deformate, poiché in questo caso nuove assunzioni vengono introdotte e una nuova coordinata introdotta: le celle sono assunte orizzontali e rettangolari, cioè con top e bottom elevations del nodo della cella uguali a quelle di ogni altro punto appartenente alla cella

(vedesi figura 94a) e si introduce la coordinata locale z_L definita come: $z_L = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1}$ con z_1 e z_2

bottom e top elevations della cella; la coordinata locale può assumere solo valori compresi tra 0 (punto più basso della cella) e 1 (punto superiore della cella): si assume per la traiettoria della particella che quando essa lascia lateralmente una cella, la coordinata locale non cambia, senza curarsi di quanto lo spessore o l'elevazione assoluta del layer cambi da una cella a quella successiva nel percorso della particella. Si nota da figura 94c come MODPATH, per un caso 3D come quello di studio, consideri il dominio esattamente come un caso con griglie rettangolari regolari con traiettorie orizzontali.

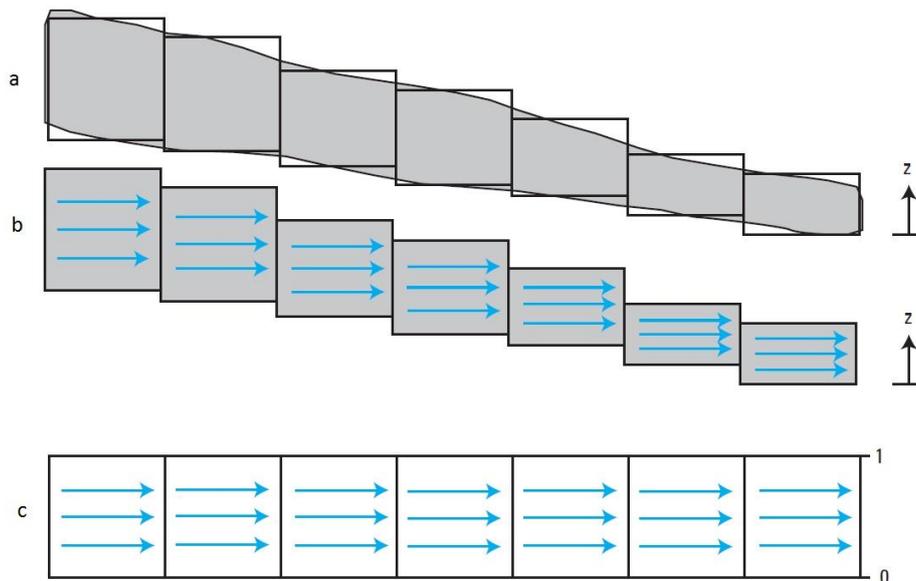


Figura 94 - a) e b) Approssimazione del dominio di studio secondo MODPATH c) griglia e traiettorie in coordinate locali

Il vantaggio di questa assunzione stratigrafica consiste nel poter gestire sistemi idrogeologici complessi con un inferiore numero di layers rispetto a quelli necessari se si usasse una griglia 3D realmente rettangolare, che per rappresentare adeguatamente la situazione dovrebbe suddividere il modello in numerosissimi layers; a discapito di questa semplificazione vanno gli errori nella discretizzazione spaziale difficili da quantificare (si noti come in figura 94b le celle 'piene' diano un andamento abbastanza diverso da quello reale di figura 94a); tuttavia si è dimostrato che questo metodo dà risultati coerenti con il bilancio idrico generato da MODFLOW anche per modelli con griglie deformate verticalmente (Pollock, 2012).

Il procedimento sopra descritto per giungere alla definizione delle traiettorie delle particelle in MODPATH è pensato in ottica di una *forward simulation*, ma con un semplice cambio di segno delle velocità medie è applicabile anche alla *backward simulation*: se nel primo caso si conoscono le posizioni iniziali delle particelle e si vuole individuare il loro possibile movimento seguendo il flusso sotterraneo con lo scopo di sapere se e quando raggiungeranno un determinato punto (se per esempio un contaminante possa raggiungere un pozzo d'estrazione o un fiume rischiando di contaminarne le acque), con la simulazione in reverse si parte dalle posizioni finali note di una qualsiasi particella e si vuole tornare indietro nel tempo per seguire il percorso che l'ha portata fino al punto noto (ad esempio si può ricavare la *capture zone* di un pozzo, ossia quell'area le cui particelle d'acqua vengono richiamate alla fonte di prelievo).

Appendice C: Scenari futuri per linea 3 gialla

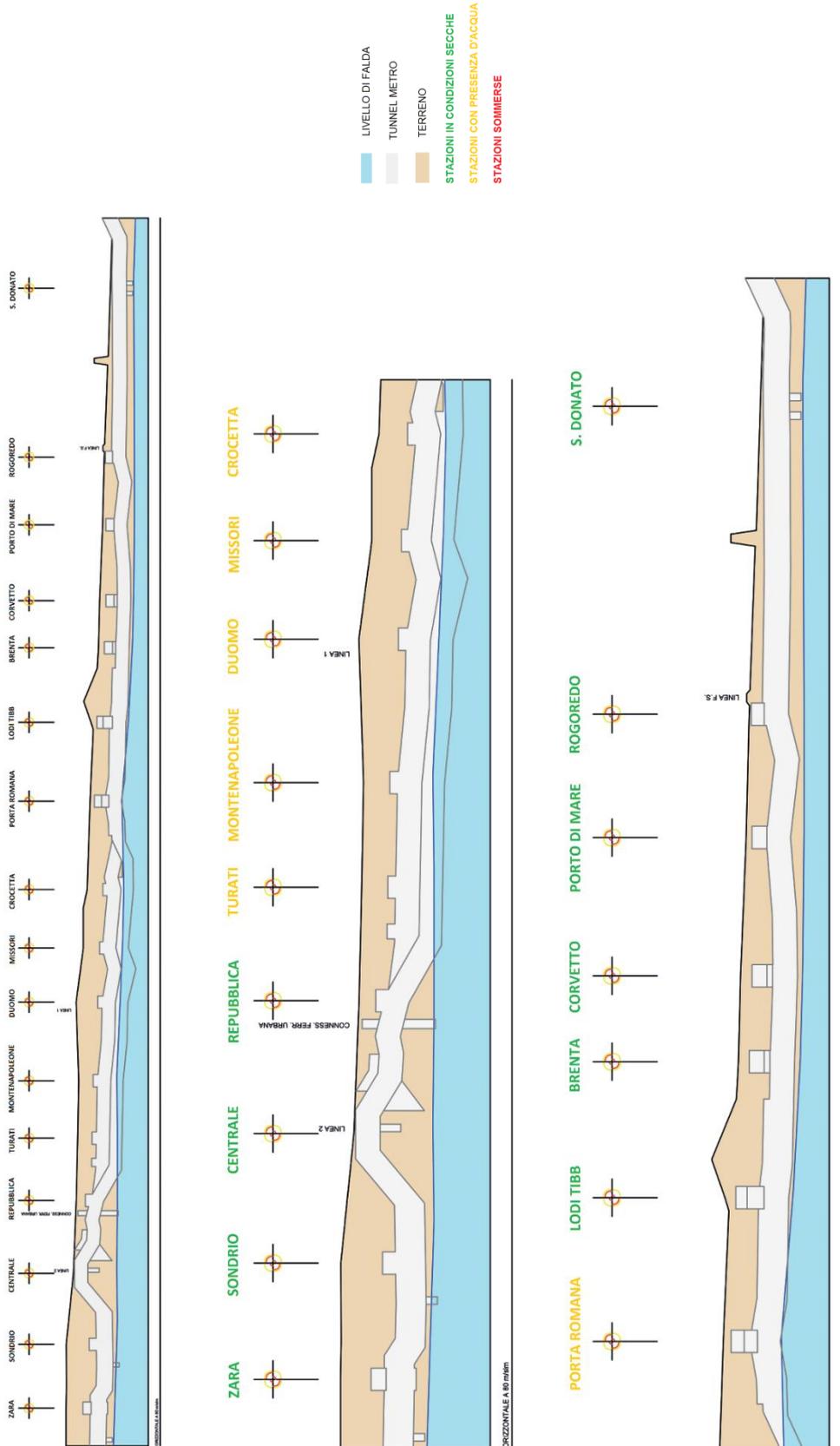


Figura 95 - Situazione attuale per la linea 3

Appendice C: Scenari futuri per linea 3 gialla

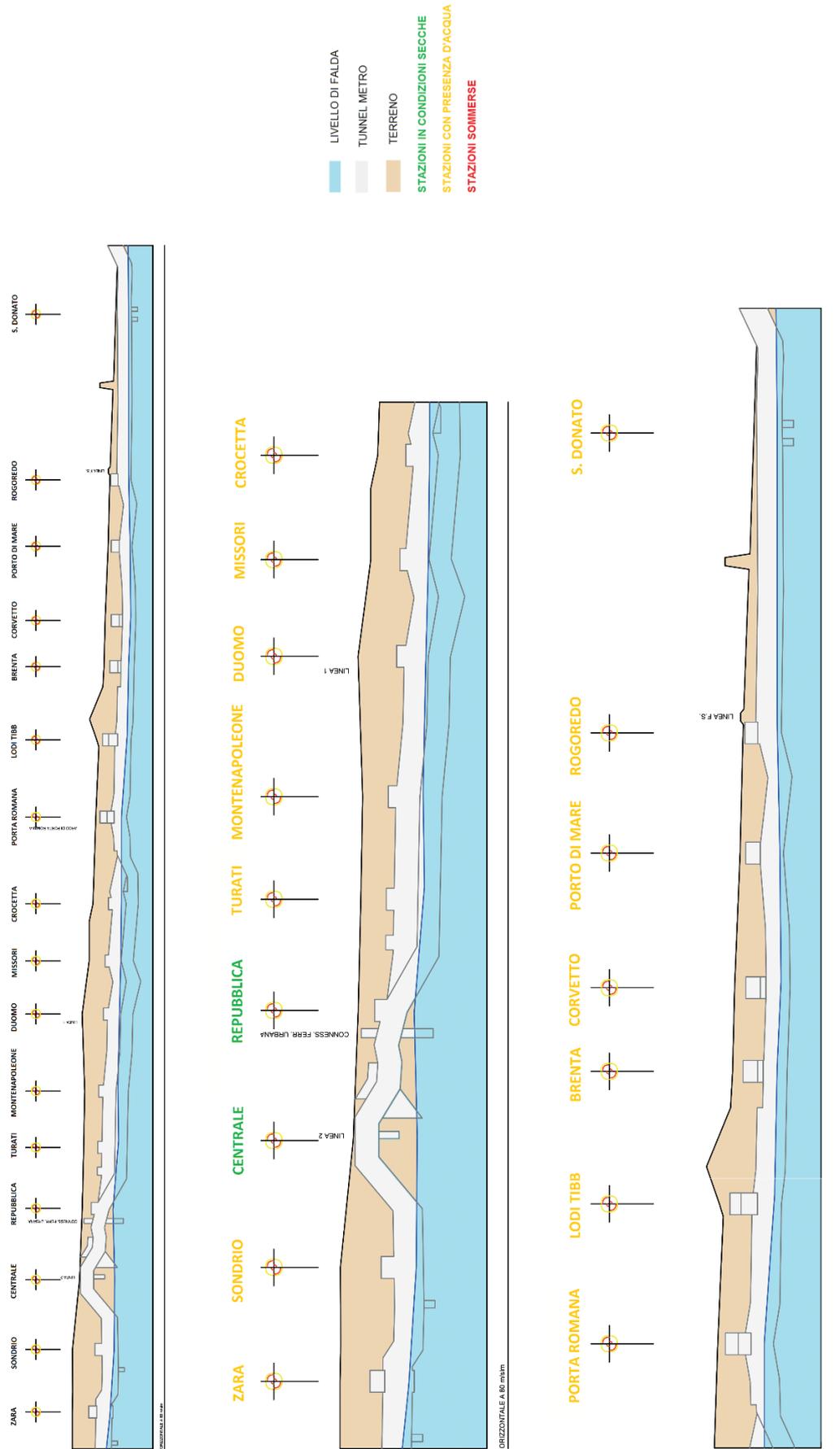


Figura 96 - Scenario futuro con prelievi diminuiti del 20% per la linea 3

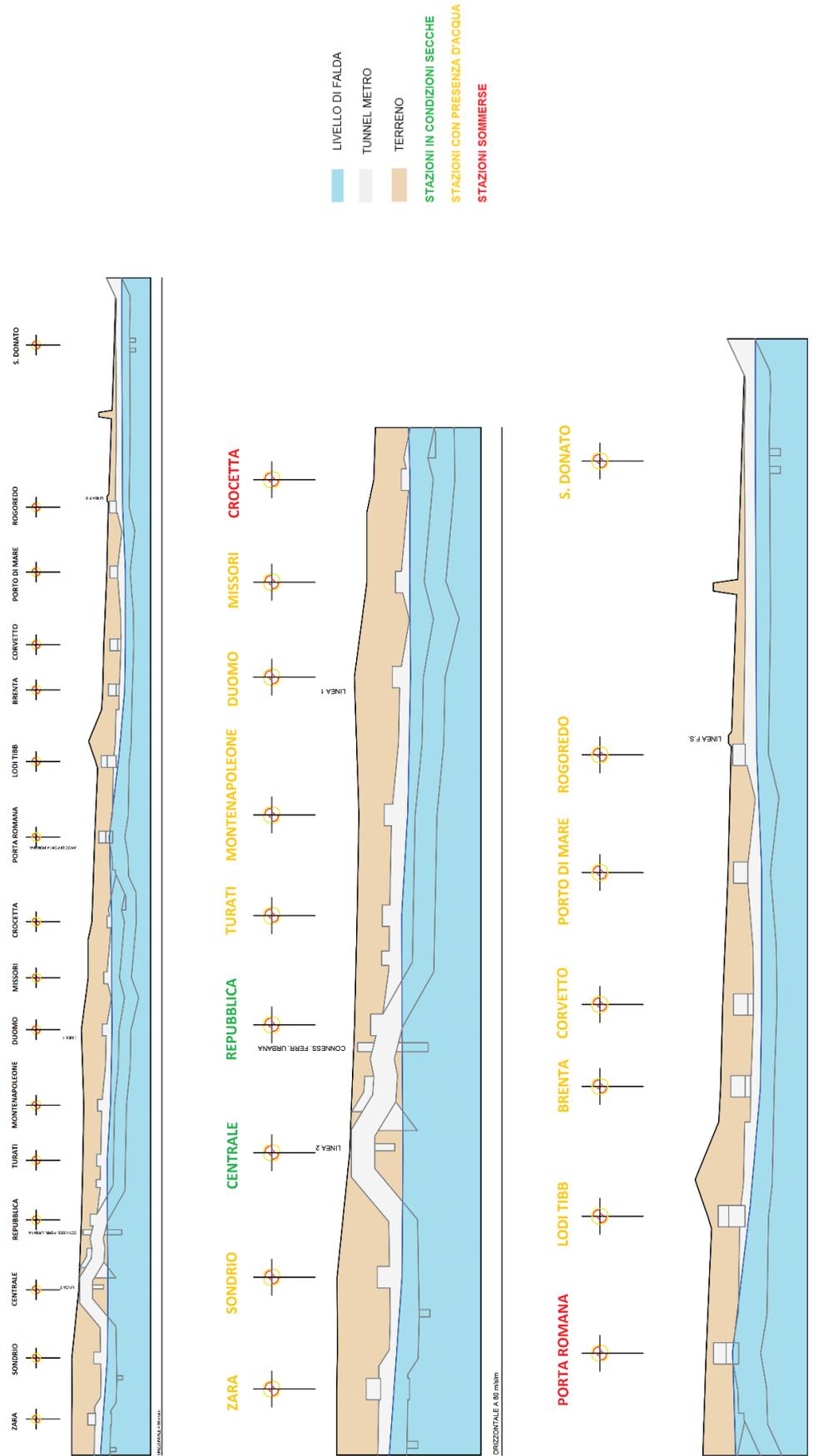


Figura 97 - Scenario futuro con prelievi diminuiti del 50% per la linea 3

Bibliografia

- Alberti L., Colombo L., Francani V., 2014, "The groundwater flow velocity distribution in the urban area: a case study"
- Alberti L., Francani V., Gattinoni P., Scesi L., 2015, "Milano e il suo hinterland: la modellazione matematica del flusso di falda per una gestione integrata e sostenibile della risorsa idrica"
- Arpa Lombardia, 2013, "Stato delle acque sotterranee della provincia di Milano, rapporto annuale 2012"
- Baldwin A., Zhao H., 2014, "Simulating well pumping effect on wetlands by using Groundwater Vistas"
- Berardi S., 2010, "Dinamica degli inquinanti (suolo saturo e insaturo)"
- Beretta G. P., 2015, "Inquinamento diffuso e puntuale da organo clorurati nelle acque sotterranee: approcci di caratterizzazione e gestione degli interventi"
- Beretta G. P., Avanzini M., Pagotto A., 2003, "Managing groundwater rise: experimental results and modelling of water pumping from a quarry lake in Milan urban area"
- Beretta G. P., Masetti M., 2015, "Acque sotterranee di Milano: problemi e interventi sostenibili per la regimazione del livello di falda"
- Bonomi T., 2007, "Database development and 3D modeling of textural variations in heterogeneous, unconsolidated aquifer media: application to the Milan plain"
- Bonomi T., Cavallin A., 2007, "La struttura idrogeologica e le variazioni piezometriche: elementi critici nella gestione delle acque sotterranee"
- Braga G., Ragni U., 1969, "Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100000. Foglio 44 – Novara e 58 – Mortara", Servizio Geologico d'Italia, Roma
- Brunetti M., Buffoni L., Maugeri M., Nanni T., 1999, "Trends of minimum and maximum daily temperatures in Italy from 1865 to 1996"
- Brunetti M., Colacino M., Maugeri M., Nanni T., 2001, "Trends in the daily intensity of precipitation in Italy from 1951 to 1996"
- Buffoni L., Maugeri M., Nanni T., 1999, "Precipitation in Italy from 1883 to 1996"
- Colombo L., Gattinoni P., Scesi L., 2016, "Influence of underground structures and infrastructures on the groundwater level in the urban area of Milan"
- Comizzoli G., Gelati R., Passeri L. D., Desio A., 1969, "Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100000. Fogli 45 – Milano e 46 – Treviglio", Servizio Geologico d'Italia, Roma
- Coppola E., Giorgi F., 2009, "An assessment of temperature and precipitation change projections over Italy from recent global and regional climate model simulations"
- Francani V., Alberti L., Trefiletti P., 2005, "The sustainable groundwater level in the Milan area"
- Francani V., Colombo L., Cremonesi D., Formentin G., 2012, "Metodi di previsione della piezometria nell'area milanese"

- Francani V., Pozzi R., 1981, "Condizioni di alimentazione delle riserve idriche del territorio milanese"
- Gattinoni P., 2015, "Risorse idriche sotterranee: caratterizzazione, gestione e protezione"
- Gattinoni P., Scesi L., 2016, "The groundwater rise in the urban area of Milan (Italy) and its interactions with underground structures and infrastructures"
- Giorgi F., Lionello P., 2008, "Climate change projections for the Mediterranean region"
- Harbaugh A. W., 2005, "MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular groundwater model – the groundwater flow process", chapter 16 of Book 6 "Modeling techniques", section A, "Groundwater", USGS
- Iglesias A., Garrote L., Flores F., Moneo M., 2007, "Challenges to manage the risk of water scarcity and climate change in the Mediterranean"
- IPCC, 2013, "Climate change 2013", Chapter 11 "Near-term climate change: projections and predictability", Chapter 12 "Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility"
- IPCC, 2014, "Climate change 2014", Chapter 23 "Europe"
- IRSA-CNR di Brugherio, "Progetto QUALFALDA II, lo stato qualitativo dei corpi idrici sotterranei in provincia di Milano, rapporto finale"
- ISPRA, 2016, "Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000, Foglio 118 Milano", Servizio Geologico d'Italia
- Mainardi M., 2012, "Coupling pre-season farmers planning and optional water supply management to mitigate climate change impacts"
- Margat J., 2004, "L'eau des mediterraneens: situations et perspectives"
- Marinos P., Kavvas M., 1997, "Rise of the groundwater table when flow is obstructed by shallow tunnels"
- Martinis B., Mazzarella S., 1971, "Prima ricerca idrica profonda nella pianura lombarda"
- Metropolitana Milanese s.p.a., 2015, "Rete di monitoraggio e andamento dei livelli piezometrici della falda freatica nella città di Milano"
- Milano M., Ruelland D., Fernandez S., Dezatter A., Fabre J., Servat E., 2012, "Facing climatic and anthropogenic changes in the Mediterranean basin: what will be the medium-term impact on water stress?"
- Muttoni G., Carcano C., Garzanti E., Ghielmi M., Piccin A., Pini R., Rogledi S., Sciunnach D., 2003, "Onset of major Pleistocene glaciations in the Alps"
- Orombelli G., 1979, "Il Ceppo d'Adda: revisione stratigrafica"
- Pollock D. W., 2005, "User guide for MODPATH – a particle-tracking model for MODFLOW", chapter 41 of Book 6 "Modeling techniques", section A, "Groundwater", USGS
- Regione Lombardia & Eni, 2002, "Geologia degli acquiferi padani della regione Lombardia"
- Sanchez-Gomez E., Somot S., 2009, "Future changes in the Mediterranean water budget projected by an ensemble of regional climate models"

Sitografia

- Scardia G., De Franco R., Muttoni G., Rogledi S., Caielli G., Carcano C., Sciunnach D., Piccin A., 2012, "Stratigraphic evidence of a Middle Pleistocene climate-driven flexural uplift in the Alps"
- Scesi L., 2015, "Incontro tecnico sui problemi della falda acquifera milanese"
- Toreti A., Desiato F., 2005, "Temperature trend over Italy from 1964 to 2004"
- Vazquez-Suñé E., Sanchez-Vila X., Carrera J., 2004, "Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch of hydrogeology"
- Zheng C., Gaisheng L., Steven M., Gorelick S. M., 2003, "The limit of advection-dispersion theory"

Sitografia

- www.ambiente.provincia.milano.it
- www.geoportale.regione.lombardia.it
- www.ilcittadinomb.it
- www.metropolitana-milano.it
- www.metropolitanamilanese.it
- www.metro4milano.it
- www.milano.corriere.it, "Apertura dei Navigli, arriva il tunnel"
- www.urbimlombardia.it