

POLITECNICO DI MILANO



Scuola di Ingegneria Civile Ambientale e Territoriale  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

# ANALISI DELL'INFLUENZA DELLE GALLERIE METROPOLITANE SULL'INNALZAMENTO DEL LIVELLO DI FALDA: IL CASO DI MILANO

---

RELATORE P.ssa Laura Scesi

CORRELATORE Ing. Loris Colombo

STUDENTE Alessandra Marzorati  
MATRICOLA 805601

ANNO ACCADEMICO 2014/2015



# INDICE

Abstract (English)	4
Abstract (Italiano)	4
CAPITOLO 1	
1.Introduzione	5
1.1Premessa	6
1.2 Area di studio e scopo della tesi	6
CAPITOLO 2	
2.Inquadramento geologico	9
2.1 Formazione della Pianura Lombarda	9
2.2 Inquadramento della Città di Milano all'interno della Pianura Lombarda	11
2.3 Assetto idrogeologico	12
2.4 Idrografia di superficie	19
2.4.1 I corsi d'acqua principali	21
2.4.1.1 Il Seveso	21
2.4.1.2 L'Olona	22
2.4.1.3 Il Lambro	22
2.4.2 I Navigli	23
2.4.2.1 Il Naviglio Grande	23
2.4.2.2 Il Naviglio della Martesana	23
2.4.2.3 Il Naviglio di Paderno	24
2.4.2.4 Il Naviglio Pavese	24
2.4.2.5 Il Naviglio di Bereguardo	24
2.4.2.6 La Fossa interna	24
2.4.2.7 La Darsena	25
2.4.3 Le cave, le rogge e i canali	26
2.4.3.1 I canali e le rogge	26
2.4.3.2 Le cave	27
2.5 Classificazione quantitativa dei corpi idrici sotterranei	28
2.6 Oscillazioni della superficie piezometrica dal 900' ai giorni	29
2.7 Fontanili	31
2.8 Carte della piezometria e della soggiacenza	35
CAPITOLO 3	
3. Innalzamento della falda, fenomeno a livello globale	47
3.1 Il caso di Londra	47
3.1.1 Breve inquadramento geologico ed idrogeologico	47
3.1.2 Strutture sotterranee che interagiscono con la falda	49
3.1.3 Provvedimenti istituzionali	50
3.2 Il caso di Parigi	52
3.2.1 Breve inquadramento geologico e idrogeologico	52
3.2.2 Strutture sotterranee che interagiscono con la falda	54
3.2.3 Ruolo della falda a Parigi	55
3.2.4 Provvedimenti istituzionali	55

3.3 Strutture danneggiate dall'innalzamento delle acque sotterranee	56
3.3.1 Parigi	57
3.3.2 Londra	61
 CAPITOLO 4	
4 Breve descrizione della rete di trasporto sotterraneo a Milano	62
4.1 Le linee metropolitane	62
4.1.1 La linea Rossa (M1)	62
4.1.2 La linea Verde (M2)	63
4.1.3 La linea Gialla (M3)	63
4.1.4 La linea Lilla(M5)	64
4.1.5 La linea Blu (M4)	64
4.1.6 Il Passante ferroviario	65
 CAPITOLO 5	
5 Ricostruzione della stratigrafia e della piezometria	66
5.1 Ricostruzione della stratigrafia	66
5.2 Ricostruzione del livello di falda per l'anno 2014	67
 CAPITOLO 6	
6.I materiali	70
 CAPITOLO 7	
7. Modello tridimensionale	75
7.1 Costruzione del modello	76
7.1.1 I livelli dell'acquifero	76
7.1.2 Profilo topografico	77
7.1.3 Le linee metropolitane e il passante ferroviario	78
7.1.4 Metodo degli elementi finiti	79
7.2 Aggiornamento del modello	80
7.2.1 Ricostruzione del profilo topografico	80
7.2.2 Infittimento della mesh	80
7.2.3 Ulteriore aggiornamento del modello	81
 CAPITOLO 8	
8 Analisi tridimensionale	82
8.1.1. Confronto col modello matematico	83
8.1.2 Analisi del moto di filtrazione	84
8.2 Analisi sulla galleria	91
8.2.1 Fattore di forma	91
 CAPITOLO 9	
9.Conclusioni	92
 APPENDICE	
A1 Campioni materiali per calcolo permeabilità	93

A2 Strumenti di modellazione idrogeologica: MIDAS GTS-Nx	95
A3 Profilo altimetrico linee metropolitane	102
A4 Sezioni Geologiche	105
A5 Tavole profilo altimetrico linee metropolitane	109
A6 Dati utilizzati per la costruzione delle carte della piezometria e della soggiacenza	110
BIBLIOGRAFIA	
Bibliografia	118

## Indice delle tabelle

Tab.1 Confronto tra il livello piezometrico riprodotto da Midas e quello della carta piezometrica del 2014.....	87
Tab.2 Profilo dei diametri lungo il tracciato piano altimetrico.....	94
Tab 3 Analisi di sensitività rispetto al diametro.....	95

## Indice delle figure

Figura 1 Inquadramento territoriale dell'area di studio	11
Figura 2 Unità idrogeologiche della città di Milano	16
Figura 3 Descrizione idrogeologica del territorio milanese secondo diversi autori	18
Figura 4 Carta della base del primo acquifero per Milano e hinterland	20
Figura 5 Carta delle isopieze del gruppo acquifero C	20
Figura 6 Caratteristiche dei gruppi acquiferi (Fonte ATO Milano)	21
Figura 7 Carta dello spessore dell'aquitard tra il primo e il secondo acquifero	22
Figura 8 Carta della distribuzione della permeabilità nel primo acquifero	22
Figura 9 Sistema principale delle acque superficiali	23
Figura 10 Fiumi e navigli a Milano	24
Figura 11 Sistema principale in blu, secondario in verde azzurro e magenta	24
Figura 12 Corsi d'acqua che costituiscono l'idrografia di superficie di Milano	25
Figura 13 Tracciato dei Navigli	30
Figura 14 Stato quantitativo dell'acquifero tradizionale secondo il D. Lgs. 152/99 (Fonte Qualfalda I)	33
Figura 15 Struttura di un fontanile (Cerabolini-Zucchi 1975)	36
Figura 16 Localizzazione dei fontanili nel territorio della provincia di Milano (Censimento corpi idrici su suerficiali Provincia Milano 1975)	38
Figura 17 Localizzazione dei fontanili nella provincia di Milano censti nel 1999 dal Parco Agricolo Sud Milano	39
Figura 18 Oscillazioni piezometriche pozzo Via Padova dal 2004 al 2014	40
Figura 19 Oscillazioni piezometriche pozzo via Noto dal 2004 al 2014	40
Figura 20 Oscillazioni piezometriche pozzo via Manduria dal 2004 al 2014	40
Figura 21 Oscillazioni piezometriche pozzo Viale Rimembranze Lambrate dal 2004 al 2014	41
Figura 22 Oscillazioni piezometriche pozzo via Padova anno 2014	41
Figura 23 Oscillazioni piezometriche pozzo via Noto anno 2014	41
Figura 24 Oscillazioni piezometriche pozzo via Manduria anno 2014	42
Figura 25 Oscillazioni piezometriche pozzo viale Rimembranze Lambrate anno 2014	42
Figura 26 Rappresentazione 3D del livello piezometrico di Milano anno 1990	43
Figura 27 Rappresentazione 3D del livello piezometrico di Milano anno 2000	43
Figura 28 Rappresentazione 3D del livello piezometrico anno 2013	44
Figura 29 Rappresentazione 3D del livello piezometrico anno 2014	44
Figura 30 Carta della piezometria e della soggiacenza marzo 2014	45
Figura 31 Piezometria e soggiacenza settembre 2014	45
Figura 32 Carta della piezometria e della soggiacenza settembre 2013	46
Figura 33 Carta di piezometria e soggiacenza marzo 2013	46
Figura 34 Carta di piezometria e soggiacenza settembre 2007	47
Figura 35 Carta di piezometria e soggiacenza marzo 2007	47

Figura 36 Carta di piezometria e soggiacenza anno 1982 (fonte Qualfaldà II)	48
Figura 37 Evoluzione del livello piezometrico dal 1982 al 2007	48
Figura 38 Confronto tra la soggiacenza del 1982 e quella del 2007	49
Figura 39 Variazione della soggiacenza dal 1982 al 2007	50
Figura 40 Inquadramento geologico della città di Londra	52
Figura 41 Inquadramento geologico della città di Londra	53
Figura 42 Volume di acqua che viene prelevata in modo regolato dalla falda	55
Figura 43 Differenza del livello delle acque sotterranee dal 2000 al 2014	55
Figura 44 Inquadramento geologico della città di Parigi	56
Figura 45 Schematizzazione dell'acquifero multistrato e caratteristiche geologiche	58
Figura 46 Inghiotto rilevato sotto i binari della Gare du Nord a Parigi	63
Figura 47 Danni all'edificio Rue du Papillon a seguito dell'apertura di una dolina	64
Figura 48 Schema della rete metropolitana milanese	66
Figura 49 Carta delle isoipse (Piano Campagna)	70
Figura 50 Carta delle isopieze (base Acquifero A)	70
Figura 51 Carta dello spessore dell'acquitard, in azzurro acquitard, in rosso acquitard discontinuo)	71
Figura 52 Carta delle isopieze (Base acquifero tradizionale)	71
Figura 53 Dislocazione dei piezometri in provincia di Milano	72
Figura 54 Carta di piezometria e soggiacenza marzo 2014	72
Figura 55 Carta di piezometria e soggiacenza settembre 2014	73
Figura 56 Esempio ricostruzione stratigrafia terreno da carota	74
Figura 57 Valori orientativi permeabilità per terreni sciolti [m/s]	74
Figura 58 Legame tra D10 e permeabilità secondo la relazione di Hazen	75
Figura 59 Distribuzione di probabilità del coefficiente di permeabilità di Limi e argille	76
Figura 60 Distribuzione del coefficiente di permeabilità delle sabbie	76
Figura 61 Distribuzione del coefficiente di permeabilità delle ghiaie	77
Figura 62 Valori di permeabilità di ghiaia sabbia e limo/argilla	77
Figura 63 Suddivisione stratigrafica del terreno	81
Figura 64 Carta delle isoipse importata nel modello per la costruzione della superficie topografica	81
Figura 65 Tracciato planimetrico delle linee metropolitana e modellazione falda	82
Figura 66 Livello piezometrico in assenza delle gallerie	86
Figura 67 Confronto tra i valori piezometrici e il coefficiente di permeabilità della galleria nella sezione 1	88
Figura 68 Confronto tra i valori piezometrici e il coefficiente di permeabilità della galleria nella sezione 2	88
Figura 69 Confronto tra i valori piezometrici al variare del coefficiente di permeabilità della galleria	89
Figura 70 Confronto tra i valori piezometrici al variare del coefficiente di permeabilità nella sezione 4.	89
Figura 71 Livello piezometrico in presenza della M1	90
Figura 72 Distribuzione del carico piezometrico attorno alla sezione 1 della M2 nel caso di $k=10^{-9}$	91
Figura 73 Distribuzione del carico piezometrico nella sezione 1 in assenza della galleria	92
Figura 74 Area di influenza della metropolitana sulla falda	92

## Abstract (Italiano)

Il problema dell'innalzamento della falda a seguito della deindustrializzazione è un fenomeno comune a molte città europee tra cui Milano. Il presente lavoro di tesi nasce in collaborazione con MM Metropolitana Milanese, azienda che gestisce le infrastrutture della rete metropolitana e del Passante ferroviario a Milano, con lo scopo di studiare come la presenza delle linee metropolitane influenzi il livello di falda.

La prima parte della tesi propone lo studio del naturale innalzamento della falda a Milano a seguito della dismissione dei poli industriali sia sul territorio di Milano sia nei comuni dell'hinterland.

Attraverso il software Surfer è stato possibile ricostruire la piezometria per l'anno 2014 e attraverso il software di modellazione agli elementi finiti MIDAS GTS-Nx è stato possibile modellare il sottosuolo milanese riproducendone la stratigrafia, la falda e modellando le gallerie delle metropolitane.

A seguito della modellazione è stato possibile simulare l'effetto indotto dal moto di filtrazione della falda nel terreno per osservare l'interazione tra la falda ed un corpo impermeabile.



## Abstract (English)

The growing of groundwater after the deindustrialization is a common factor to much more cities in Europe, Milan is an example of them

This thesis born through the collaboration with MM Metropolitana Milanese, that factory manage all the infrastructures of the Milan's underground transport network.

The purpose of this thesis is to find a relation through the underground water and the impermeable and how they interact.

The first part of the thesis purpose the study of the growing of the aquifer in Milan and after the dismissal of the industrial factories in Milan and in the hinterland

By the using of the software Surfer it was possible to define the groundwater level in the year 2014 and by using a 3D FEM program it was possible to model the underground by reproducing the stratigraphy, the groundwater level and the tunnel of the subway.

After the modelization it was possible to simulate the effect induct by the seepage of the groundwater in the underground and it was possible to simulate the interaction that borns through the groundwater and an impermeable body

# **1.Introduzione**

## **1.1Premessa**

A partire dagli anni Ottanta la città di Milano, come le altre principali città Europee, ha subito un graduale processo di dismissione dei grandi poli industriali che per più di un secolo avevano costituito l'anima dell'economia della città. Con la chiusura degli stabilimenti il livello della falda milanese inizia a salire cercando di recuperare il livello a cui si trovava nella prima metà dell'Ottocento.

Se il tasso di occupazione del sottosuolo milanese non fosse elevato, la risalita della superficie piezometrica di per se non costituirebbe un problema, ma la costruzione di grandi opere nel sottosuolo e l'occupazione degli strati che un tempo appartenevano alla falda hanno comportato non pochi problemi soprattutto in un'epoca in cui non si pensava alla prevenzione.

Dovremo capire come sfruttare in modo consapevole il sottosuolo e come evitare che la risalita del livello delle acque sotterranee comporti danni alle strutture e disagi alla popolazione.

## **1.2 Area di studio e scopo della tesi**

Il tema prescelto per il seguente elaborato di tesi è lo studio dell'innalzamento della falda acquifera nel territorio del comune di Milano e della sua interazione con le opere presenti nel sottosuolo come le gallerie delle linee metropolitane e le fondazioni degli edifici alti.

L'area oggetto di studio comprende il territorio del solo comune di Milano. Esso occupa un'area di circa 181,76 Km<sup>2</sup> e si trova nel settore centro-occidentale della Lombardia, 25 Km ad Ovest del fiume Adda e 25 Km ad Est del Ticino, 50 Km a Sud del Lago di Como e 35 Km a Nord del fiume Po (Figura 1). Il territorio milanese si trova lungo la così detta linea delle risorgive in cui si ha l'intersezione tra strati geologici a differente permeabilità e la superficie topografica, ciò permette all'acqua della falda di risalire in superficie in presenza di strati a minor permeabilità. Milano è caratterizzata dalla presenza di numerosi corsi d'acqua di origine naturale ed artificiale, si estende su un piano inclinato da Nord-Nord Ovest a Sud-Sud Est con una pendenza dello 0,26 % ed un dislivello tra il punto più alto e quello più basso della città di circa 40 m (max 145 m s.l.m., min 105 m s.l.m.).



Figura 1 Inquadramento territoriale dell'area di studio

Lo scopo dell'elaborato di tesi è quello di indagare l'impatto che le opere in sotterraneo hanno sulla circolazione idrica nella prima falda, in particolare si vuole studiare l'interazione tra le gallerie delle linee metropolitane milanesi e le acque della prima falda e tra le fondazioni degli edifici alti che assumono profondità notevole (edifici presenti a City Life) e le acque della prima falda. Comprendere come la presenza di costruzioni impermeabili devii le linee del reticolo di flusso permette di prevedere il percorso delle acque sotterranee. Nel caso della città di Milano la conoscenza della circolazione idrica sotterranea deviata è di grande interesse: la superficie piezometrica dalla seconda metà degli anni Ottanta si sta alzando a seguito della deindustrializzazione del territorio e alla conseguente diminuzione di emungimenti di grandi volumi d'acqua. La conseguenza all'innalzamento della falda è che strutture che non erano state progettate per essere immerse nell'acqua oggi lo sono e questo può causare danni a livello strutturale e problemi minori di varia natura come infiltrazioni e allagamenti.

Le attività svolte possono essere suddivise in diverse fasi:

Acquisizione dei dati riguardanti la prima falda e la soggiacenza dal sito della Provincia di Milano (SIT Settore Informativo Territoriale);

Costruzione delle carte piezometriche in 2D e in 3D dai primi anni Novanta al 2014 attraverso l'utilizzo del software Surfer 9;

Acquisizione dei dati relativi alla profondità del tracciato delle quattro linee metropolitane e della profondità delle fondazioni di alcuni grattacieli ritenuti importanti ai fini dello studio dell'interazione tra opere in sotterraneo e falda acquifera;

Modellazione agli elementi finiti tramite il software Midas GTS-NX dell'acquifero, del terreno e delle opere in sotterraneo per studiare l'interazione tra circolazione idrica e struttura impermeabile e quantificare numericamente l'effetto.

Alcune fasi operative come l'acquisizione dei dati relativi alla profondità delle linee metropolitane sono state svolte in collaborazione con MM Metropolitana Milanese.

La caratterizzazione delle interazioni tra la falda acquifera e le opere in sotterraneo costituisce un argomento di grande interesse non solo prettamente scientifico ma anche tecnico-amministrativo. MM ha mostrato notevole interesse nel collaborare per la realizzazione dell'elaborato di tesi seguente fornendo i dati necessari per lo sviluppo delle analisi effettuate ed utilizzando i risultati ottenuti al fine di una miglior gestione della risorsa idrica sotterranea e dello stato di salute delle linee metropolitane.

## 2. Inquadramento geologico

Il presente capitolo è il risultato della fase di ricerca bibliografica che converge in un'accurata revisione e sintesi delle pubblicazioni relative all'assetto geologico del territorio oggetto di studio il cui sottosuolo risulta essere interessato da ingenti risorse idriche ed è caratterizzato da una complessa evoluzione stratigrafico-strutturale.

### 2.1 Formazione della Pianura Lombarda

L'evoluzione della Pianura Padana può essere ricondotta all'era quaternaria e il suo sviluppo può essere schematicamente suddiviso in tre fasi:

- Fase di regressione marina con sedimentazione continentale fluvio-lacustre che ha interessato il settore occidentale della Lombardia (Pliocene superiore e Pleistocene inferiore);
- Fase glaciale (Pleistocene);
- Fase post glaciale con erosione e sedimentazione alluvionale (Olocene).

Le fasi precedentemente elencate hanno subito diverse interruzioni che sono testimoniate dalla presenza di paleosuoli e hanno avuto una durata sufficientemente elevata da permettere ai processi pedogenici di svilupparsi.

La stratigrafia è costituita da una serie di unità che possono essere distinte in base alle loro caratteristiche stratigrafiche ed idrogeologiche.

Seguendo una sequenza stratigrafica dal basso verso l'alto troviamo:

- Substrato indifferenziato: comprende varie formazioni con età che vanno dal Paleozoico al Terziario. Le formazioni più esterne sono la Gonfolite e il Flysch. La Gonfolite è un deposito clastico di ambiente continentale costituito prevalentemente da ciottoli di natura cristallina, la sua deposizione è avvenuta tra l'Oligocene ed il Miocene inferiore e precede la prima delle tre fasi di evoluzione. Sotto la Gonfolite si trova il Flysch, sedimento terrigeno costituito da una successione arenacea con intercalazioni pelitico-marnose. Sia la Gonfolite che il Flysch costituiscono orizzonti a bassa o scarsa permeabilità che isolano idrogeologicamente le unità sottostanti.
- Argille sotto il Ceppo: si tratta di argille con intercalazioni grossolane (sabbia, ghiaie, ciottoli), che localmente possono formare acquiferi sfruttabili. Queste unità passano verso l'alto a sedimenti sabbioso argillosi che testimoniano la transizione da un ambiente marino (litozona argillosa del Calabriano) ad un ambiente continentale (litozona sabbioso-argillosa). Queste unità sono state sottoposte dopo la loro deposizione ad un sollevamento nel corso del quale la parte superiore è stata erosa e profondamente incisa, nelle incisioni così create si sono depositate ghiaie e sabbie di notevole spessore.

- Ceppo: unità conglomeratica, precedente i depositi fluvio-glaciali del Mindel, formatasi in un ambiente fluviale a canali anastomizzati nel Pliocene superiore-Pliocene inferiore. E' costituito da conglomerati eterogenei a cemento carbonatico con intercalazioni lentiformi di arenaria, sabbia e argilla. Il Ceppo ha un rilevante interesse idrogeologico poichè dove la cementazione è meno marcata è sede di potenziali acquiferi. Nei livelli maggiormente cementati a volte presenta una permeabilità secondaria dovuta alla fratturazione.
- Depositi glaciali: comprendono tutte le unità che costituiscono gli apparati morenici, dei quali i più antichi affiorano in posizione più esterna. La parte inferiore, che poggia direttamente sul Ceppo, risale al fluvio-glaciale del Mindel. Litologicamente sono molto eterogenei passando dalle argille alle sabbie grossolane e la loro matrice, abbondantemente limosa, ne abbassa la permeabilità. Lo spessore di questi depositi può superare i 40 m.
- Depositi terrazzati con Ferretto: comprendono i depositi fluvio-glaciali che costituiscono i livelli più elevati della pianura. Si raccordano con le cerchie moreniche a monte del livello fondamentale della pianura, tramite terrazzi, a valle. Superficialmente sono alterati in Ferretto, che presenta la tipica colorazione rossastra ed uno spessore variabile tra i 2 e gli 8 metri. Litologicamente sono costituiti da elementi arrotondati, di diametro variabile, che presentano una matrice sabbioso-argillosa. Questi depositi risalgono al Mindel e durante il Mindel-Riss raggiungono un elevato grado di alterazione.
- Depositi lacustri: caratterizzano la parte interna degli apparati morenici e sono costituiti da sabbie fini ed argille varvate. Sono la testimonianza di numerosi bacini lacustri intramorenici. La loro importanza deriva dal fatto che rappresentano delle estese aree impermeabili.
- Depositi del livello fondamentale della pianura: sono depositi di origine fluvio-glaciale ed alluvionale, incisi solo dagli alvei dei fiumi, che costituiscono la superficie della pianura. Tessitualmente si possono distinguere da Nord verso Sud fasce con granulometria decrescente:
  - zona a ghiaie e ciottoli prevalenti: costituita da ghiaie fini e grossolane mescolate a sabbie subordinate;
  - zona a ghiaie e sabbie: presenta, a differenza della zona precedente, una maggiore concentrazione in sabbie;
  - zona a sabbie prevalenti: si ritrova nei settori più meridionali, i livelli ghiaiosi risultano essere subordinati;
  - zona ad argille prevalenti: si trova in aree limitate ed è dovuta probabilmente alla formazione di conche palustri o ad altre esondazioni.
- Alluvioni attuali e recenti: costituite da ghiaie prevalenti nel settore settentrionale e da termini più fini verso meridione, si rinvengono negli alvei dei corsi d'acqua. La loro

importanza è dovuta al fatto che consentono l'alimentazione degli acquiferi grazie alla loro elevata granulometria.

## **2.2 Inquadramento della Città di Milano all'interno della Pianura Lombarda**

La Città di Milano si inserisce nella media pianura milanese alla quota di circa 129,5 m s.l.m. Le litologie che costituiscono il sottosuolo dell'area oggetto di studio appartengono al così detto "Livello fondamentale della pianura": depositi fluvio-glaciali ed alluvionali di età Würmiana. L'area si estende tra i terrazzi alluvionali del fiume Ticino ad Ovest del fiume Adda ad Est e la sua continuità resta interrotta localmente da alvei di dimensioni minori.

Il territorio della Città di Milano si sviluppa su un deposito di origine fluvio-glaciale a cemento carbonatico, elemento comune a tutta la pianura lombarda, la cui caratteristica principale è quella di essere facilmente carsificabile. Questa roccia è ricoperta da sedimenti fluviali più recenti (era quaternaria) ed è visibile lungo i principali corsi d'acqua formando dei conglomerati che in Lombardia sono noti come Ceppo. I sedimenti hanno origine alluvionale per deposizione da parte dei corsi d'acqua e glaciale per deposizione da parte dei ghiacciai dove sono presenti colline moreniche; col termine fluvio-glaciale si intendono invece i depositi alluvionali Pleistocenici contemporanei alle fasi di avanzata e di ritiro dei ghiacciai.

L'area in esame si inquadra nella media pianura alluvionale in cui, dal punto di vista morfologico, sono riconoscibili solo i terrazzi attuali. L'attività morfogenetica è stata fortemente influenzata dalla presenza dell'attività antropica, ciò influisce sensibilmente soprattutto attraverso il controllo della circolazione idrica superficiale, sotterranea e l'impermeabilizzazione del suolo ad opera di coperture artificiali.

Il paleoalveo del fiume Lambro può essere individuato come unico elemento morfologico di rilievo: l'antico alveo fluviale presenta ancora, in alcune porzioni di territorio, scarpate naturali o semi-naturali, che incidono sul livello della pianura per circa 2-2,5 m. La geologia della pianura evidenzia una particolare complessità, si possono infatti riconoscere diverse unità litologiche, idrogeologiche e stratigrafiche a seconda dell'ambito specifico considerato nonché degli autori che hanno trattato l'argomento. Schematicamente nel sottosuolo della Città di Milano si può assumere di avere una successione di sedimenti plio-pleistocenici, composti, nella parte basale, prevalentemente da limi e argille di origine marina con rare sabbie e ghiaie, mentre nella parte sommitale si hanno alternanze di ghiaie, sabbie, limi e argille di origine alluvionale e fluvio-glaciale, con netta predominanza di ghiaie e sabbie (orizzonti permeabili-acquiferi).

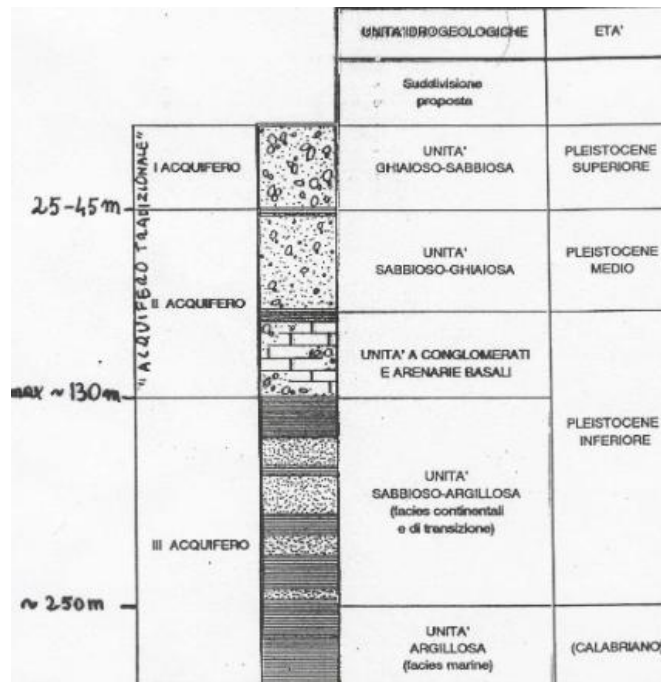


Figura 2 Unità idrogeologiche della città di Milano

### 2.3 Assetto idrogeologico

Il territorio della Provincia di Milano è caratterizzato da una spessa coltre di depositi alluvionali di natura varia, sia marina che continentale, che si è formata in un arco temporale che va dal tardo Miocene e si estende fino a parte dell'Olocene e lasciano traccia dell'evoluzione del bacino deposizionale padano. Su scala regionale la presenza di una successione di sedimenti plio-pleistocenici costituiscono un acquifero monostrato, spostandosi da N-NO verso S-SE si ha il passaggio da un corpo indifferenziato con falda libera (area pedemontana), ad un sistema monostrato suddiviso in compartimenti a causa della presenza di livelli limoso-argillosi che suddividono l'acquifero in più strati tra loro separati e che sono sede di falde confinate. I corpi sedimentari sono sede degli acquiferi e si sviluppano da NO a SE, presentano uno spessore minore nella zona pedemontana e spessore maggiore verso Sud in corrispondenza dell'area rappresentata dall'alveo del Pò.

Il sottosuolo, in linea generale, è costituito dalla presenza di orizzonti con litologia prevalentemente ghiaioso-sabbiosa, caratterizzati da permeabilità elevata, a questi, seguono in profondità sedimenti incoerenti con granulometria progressivamente più fine (sabbie, sabbie fini, limi e argille) le quali determinano una riduzione graduale della permeabilità. Il territorio può essere suddiviso in due settori: uno settentrionale ed uno meridionale; il primo è caratterizzato da sedimenti limoso-argillosi a tetto dei depositi terrazzati che impediscono l'infiltrazione, se non localmente, delle acque superficiali che alimentano gli acquiferi di dimensioni modeste e presentano, nelle zone più a Nord del territorio provinciale, valori di soggiacenza della falda superiori ai 40 m. Procedendo verso Sud la superficie piezometrica invece, si alza gradatamente avvicinandosi alla superficie topografica fino ad affiorare in corrispondenza della così detta linea dei fontanili. Questo settore è caratterizzato dalla



presenza di sabbie e ghiaie con lenti di limi e argille senza una distribuzione preferenziale dei diversi livelli di permeabilità. Per quanto riguarda la permeabilità si riscontrano valori mediamente inferiori nel settore meridionale rispetto a quello settentrionale anche se la diminuzione di permeabilità non avviene in modo netto come ci si potrebbe aspettare a causa del notevole incremento della frazione fine. La soggiacenza nel settore Sud presenta valori che mediamente si aggirano attorno ai 5 m, questi valori subiscono un notevole incremento, fino a 20 m, avvicinandosi ai fiumi Ticino e Adda che, in una fascia di territorio larga qualche km, esercitano un'azione drenante sulla falda poiché si trovano ad un livello inferiore rispetto ad essa.

Per quanto riguarda l'assetto idrogeologico, nel sottosuolo della città di Milano vengono generalmente riconosciute, da diversi autori (Figura 3), tre litozone che dall'alto verso il basso hanno granulometria decrescente:

- Litozona ghiaioso-sabbiosa all'interno della quale si riconosce una subunità sabbioso-ghiaiosa e conglomeratica;
- Litozona sabbioso-argillosa;
- Litozona argillosa.

Procedendo da Nord verso Sud ed aumentando la profondità si riscontra che le variazioni litologiche sono contraddistinte prevalentemente dalla presenza di terreni limoso-argillosi. Gli acquiferi con maggiore potenzialità si trovano entro i primi 100 metri di profondità, essi sono sede delle falde libere che sono alimentate per lo più da infiltrazione delle acque meteoriche o irrigue. Al di sotto dei 100 m di profondità si trovano gli acquiferi sabbiosi o sabbioso-ghiaiosi che sono sede delle falde confinate, la separazione degli acquiferi soprastanti avviene a causa della presenza di lenti di limo e argilla. Le falde confinate vengono alimentate dalle aree poste più a Nord e dallo scambio con gli acquiferi soprastanti ove i setti argillosi di separazione sono discontinui.

La classificazione degli acquiferi può essere effettuata in modi differenti, di seguito si è deciso di riportare nel dettaglio la classificazione degli acquiferi utilizzata dal 2002 da Regione Lombardia, effettuata in collaborazione con Eni-Gruppo AGIP.(Tab.2)

UNITA' LITOLOGICHE	UNITA' IDROSTRATIGRAFICHE	UNITA' IDROSTRATIGRAFICHE	ETA'	UNITA' IDROGEOLOGICHE		
Mazzarella e Martinis (1971)	Francani e Pozzi (1981)	Regione Lombardia – Eni (2002)		Avanzini et al. (1995)		
Litozona ghiaioso-sabbiosa	Acquifero Tradizionale	Fluvioglaciale Wurm Auct. (Diluvium recente)	I acq.	Gruppo acquifero A	Pleistocene superiore	Unità ghiaioso-sabbiosa
		Fluvioglaciale Riss-Minde (Dil. Medio-Antico)	II acq.		Gruppo acquifero B	Pleistocene medio
		Ceppo Auct.				
Litozona sabbioso-argillosa	Acquiferi Profondi	Villafranchiano	III acq.	Gruppo acquifero C	Pleistocene inferiore	Unità sabbioso-argillosa (facies continentali e di transizione)
Litozona argillosa		-		Gruppo acquifero D	Calabriano	Unità argillosa (facies marina)

Figura 3 Descrizione idrogeologica del territorio milanese secondo diversi autori

Le indagini svolte da AGIP fanno riferimento ad un'indagine multidisciplinare effettuata con diverse fonti di dati e propone un modello stratigrafico basato sul riconoscimento e la definizione di quattro unità idrostratigrafiche definite come elencato di seguito:

- Gruppo acquifero A: costituisce la parte più superficiale dell'acquifero tradizionale che si presenta generalmente libero e che attualmente viene sfruttato in modo intensivo nonostante sia spesso oggetto di fenomeni di inquinamento. A questo gruppo appartengono le litologie più grossolane: prevalentemente si ha la presenza di ghiaie e ghiaie grossolane poligeniche a matrice sabbiosa da media a molto grossolana, spesso ciottolosa. La base del Gruppo acquifero A presenta nell'area oggetto di studio un'immersione S-SE, con quote comprese tra i 150 e i 50 m s.l.m. circa ed una profondità rispetto al piano campagna che arriva fino a 30-40 m. Questo gruppo non sempre è presente nel sottosuolo del territorio comunale di Milano.
- Gruppo acquifero B: è presente al di sotto del Gruppo acquifero A e corrisponde alla parte più profonda dell'acquifero tradizionale e generalmente risulta essere confinato o semi-confinato. Questo gruppo acquifero è caratterizzato da una successione costituita da sedimenti di sabbie medie grossolane e ghiaie a matrice sabbiosa, materiali caratterizzati da una porosità e una permeabilità elevate. I sedimenti fini sono limitati alla parte bassa della successione con frapposizione di argilla limosa e limo. Alla base del Gruppo acquifero B è possibile individuare localmente livelli conglomerati poco cementati e facies maggiormente cementate riferibili al così detto Ceppo. Come il Gruppo acquifero A anche alla

base del Gruppo acquifero B presenta immersione S-SE con quote comprese tra i 130 e i 50 m s.l.m. e con spessori che variano dai 30-40 m ai 100 m.

- Gruppo acquifero C: l'origine di questo gruppo viene attribuita alla parte bassa del Pleistocene medio. E' costituito prevalentemente da argille limoso-sabbiose grigie e talvolta fossilifere, questi depositi possono essere riferiti ad un ambiente sia continentale che transizionale caratterizzato da sequenze cicliche di di sabbie fini e limi argillosi e subordinati a livelli sabbioso-ghiaiosi. Come per i gruppi citati precedentemente anche il Gruppo acquifero C alla base presenta un'immersione S-SE con quote comprese tra i 100 e i - 200 m s.l.m.
- Gruppo acquifero D: è costituito da una facies negativa di età risalente al Pleistocene inferiore ed è caratterizzato da argilla siltosa e silt con frapposizione di sabbia fine e finissima in strati sottili alla base, sabbia grigia fine e media nella porzione intermedia e ghiaia poligenica alternata con sabbia nella parte alta. La successione sedimentaria è interpretata come un sistema deposizionale di delta conoide che progredisce da Nord verso Sud.

Per ottenere uno schema semplificato della struttura idrogeologica del territorio milanese si è ritenuto opportuno distinguere solo due acquiferi, il primo acquifero (Figura 4) è costituito dai Gruppi acquiferi A e B, che spesso risultano poco distinguibili, ed il secondo è rappresentato dal Gruppo acquifero C (Figura 5). Nell'ambito di questa schematizzazione si è deciso di tralasciare le falde confinate contenute negli acquiferi più profondi poiché sono caratterizzate da una produttività limitata e da uno stato di alterazione chimica naturale.

### CARTA DELLA BASE DEL IACQUIFERO



SCALA 1:200.000

80 — Quota della superficie (metri s.l.m.)

Figura 4 Carta della base del primo acquifero per Milano e hinterland

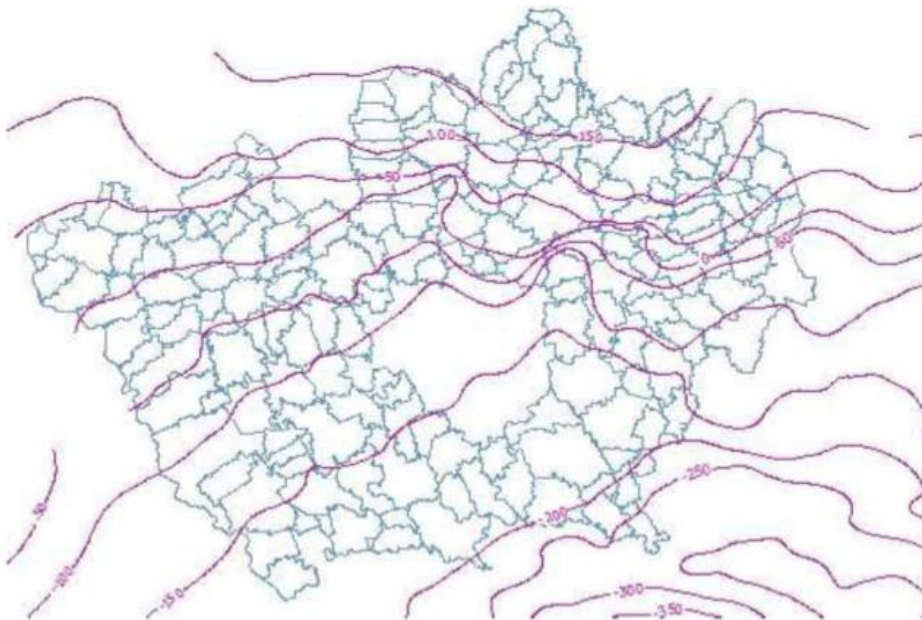


Figura 5 Carta delle isopiezies del gruppo acquifero C

L'acquifero che tradizionalmente viene sfruttato e che interagisce con le opere in sotterraneo è rappresentato dall'unione dei Gruppi acquiferi A e B, a questa successione di unità viene dato il nome di complesso idrogeologico. In questa struttura si possono distinguere, nel caso in

cui si verificano le condizioni, un acquifero non confinato ed uno semiconfinato, isolato per mezzo di lenti poco permeabili di spessore e continuità variabile. Analizzando il territorio della provincia di Milano si osserva che la separazione tra i due acquiferi non si realizza nella zona settentrionale del territorio mentre arrivando all'altezza della città di Milano la separazione tra i due acquiferi inizia a delinearsi a causa della presenza di lenti limoso-argillose ad una profondità di circa 60-80 m dal piano campagna. La presenza delle lenti limoso-argillose dà luogo ad una parziale separazione all'interno del complesso idrogeologico costituito dai Gruppi acquiferi A e B, questo determina notevoli variazioni del chimismo della falda con differenze di concentrazione che sono paragonabili a quelle che avvengono nel passaggio tra il complesso idrogeologico e quello sottostante, Gruppo acquifero C. La trasmissività dell'acquifero tradizionale decresce da Ovest verso Est riscontrando valori circa due volte inferiori nella zona orientale e centro orientale rispetto a quella occidentale e decresce da Nord verso Sud questa volta con un trend irregolare.

<b>GRUPPI ACQUIFERI</b>	<b>PROFONDITÀ (m)</b>	<b>CONDUCIBILITÀ IDRAULICA (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>CARATTERISTICHE QUALITATIVE</b>
A	da 0 a 30-40 m	10 <sup>-3</sup> – 10 <sup>-4</sup>	Molto vulnerabile, può essere soggetta a contaminazioni microbiologiche e chimiche
B	da 40 a 100 m	10 <sup>-4</sup> – 10 <sup>-5</sup>	Possono esserci pennacchi di contaminanti chimici specie nelle zone di intercomunicazione con l'acquifero sovrastante
C	da 100 a 200 m ed oltre	10 <sup>-4</sup> – 10 <sup>-6</sup>	Possibile presenza di H <sub>2</sub> S e a profondità maggiori di 200 m anche acqua salmastra.

Figura 6 Caratteristiche dei gruppi acquiferi (Fonte ATO Milano)

Nelle figure Figura 7 e Figura 8 sono riportate le carte in cui sono rappresentati lo spessore dell'acquifero tra il primo e il secondo acquifero e la carta che rappresenta la distribuzione della permeabilità nel primo acquifero.



## CARTA DELLO SPESSORE DELL'AQUITARD TRA IL I E IL II ACQUIFERO

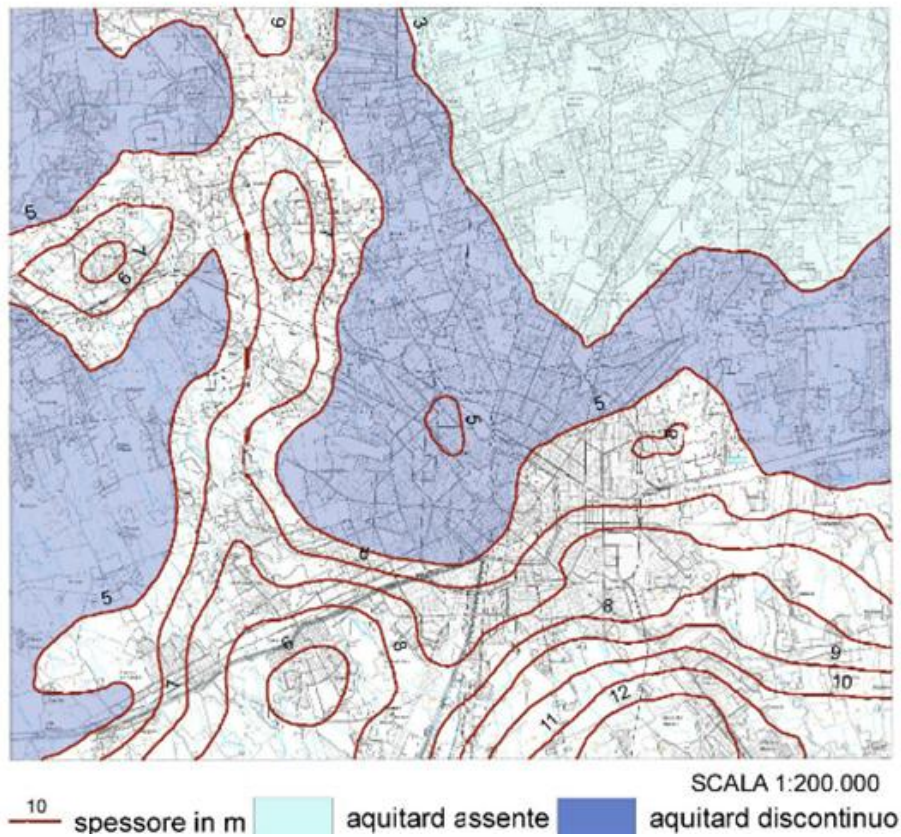


Figura 7 Carta dello spessore dell'aquitard tra il primo e il secondo acquifero

## CARTA DELLA PERMEABILITA' DEL I ACQUIFERO

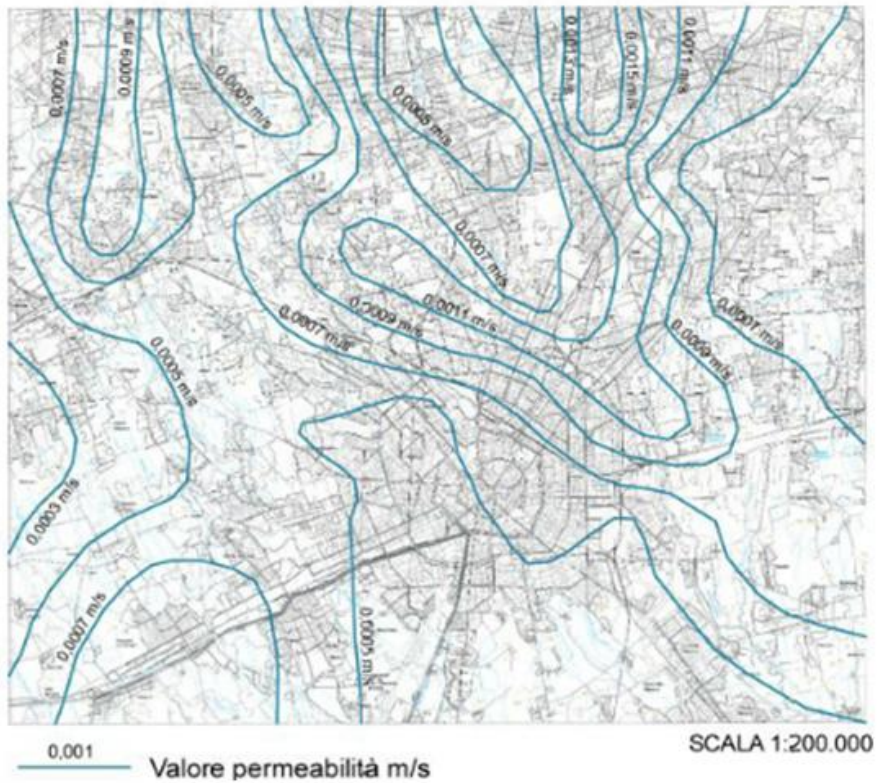


Figura 8 Carta della distribuzione della permeabilità nel primo acquifero



## 2.4 Idrografia di superficie

A livello idrografico il territorio della città di Milano è costituito da una realtà complessa ed eterogenea, ai bacini principali dei fiumi Lambro ed Olona si affianca una rete secondaria di rogge, cave e canali che ha acquisito la sua attuale conformazione nell'arco dei secoli. In Figura 9 e Figura 10 è stato riportato il sistema di acque superficiali principali nel territorio di Milano, in Figura 11 invece viene riportato il sistema di acque superficiali secondario del comune di Milano, come si può notare il sistema secondario è maggiormente sviluppato nei comuni dell'hinterland.

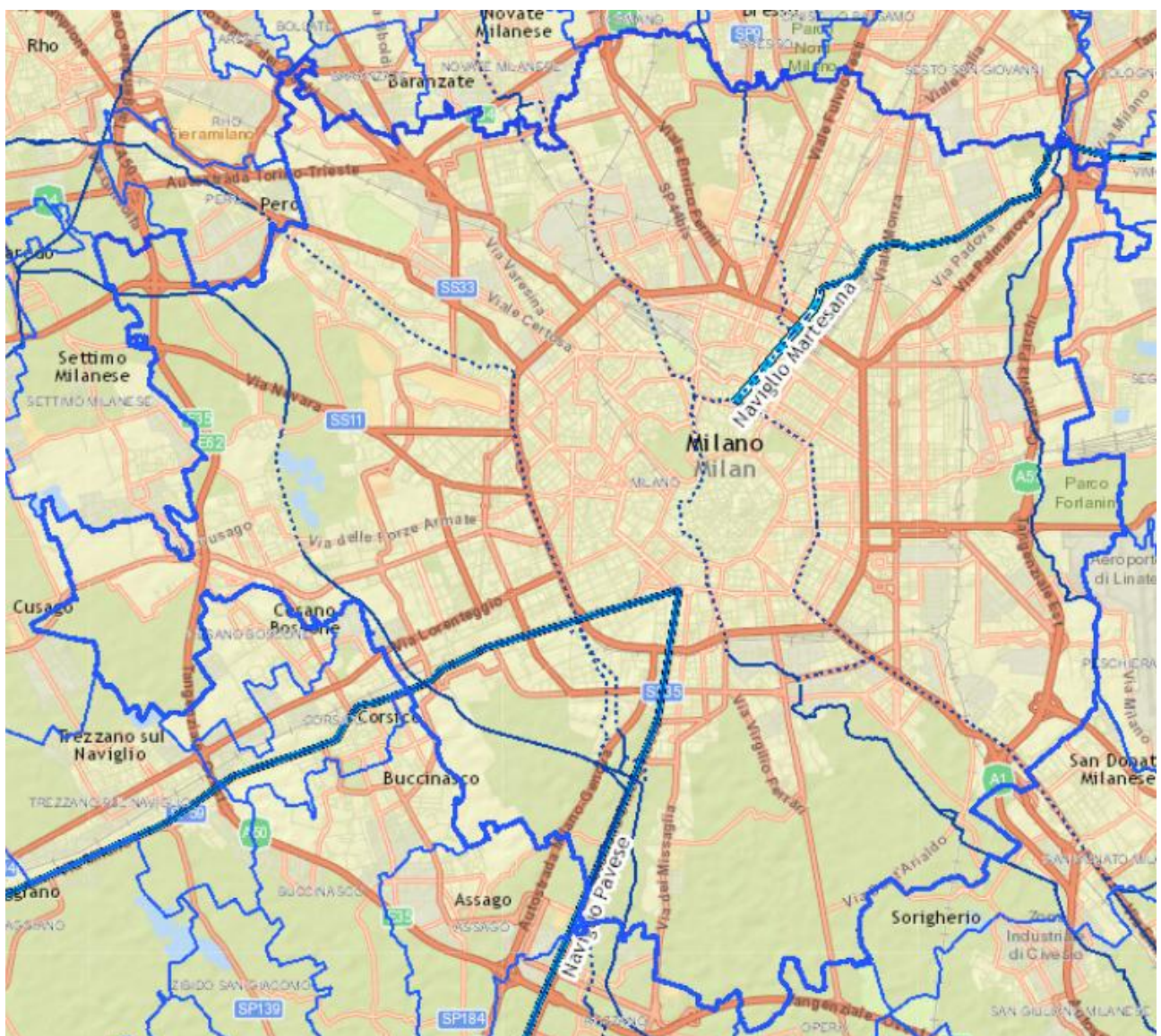


Figura 9 Sistema principale delle acque superficiali





Figura 10 Fiumi e navigli a Milano

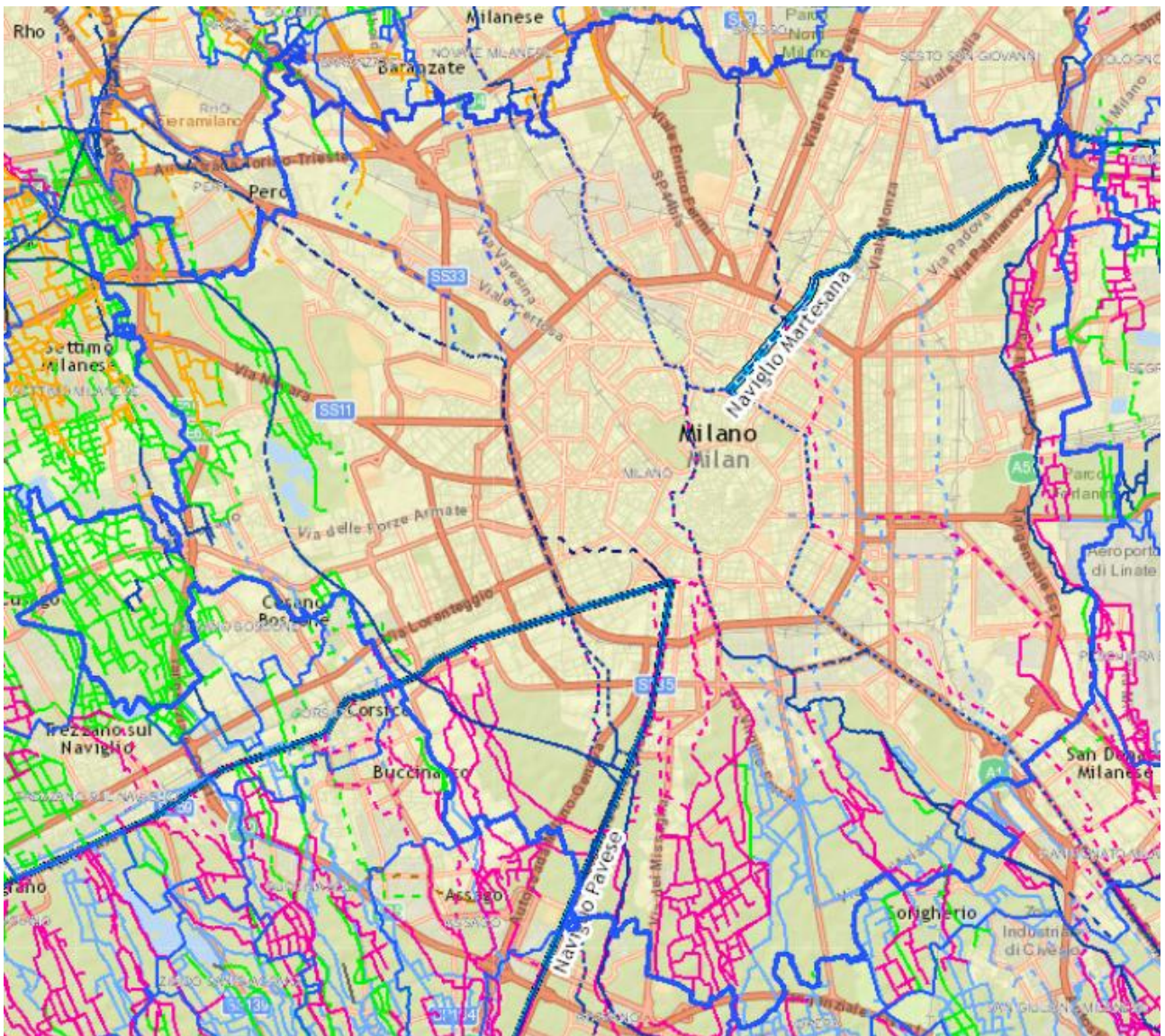


Figura 11 Sistema principale in blu, secondario in verde azzurro e magenta



Nelle Figura 9, Figura 10 e Figura 11 sono stati riportati in blu i corsi d'acqua principali, con tratto continuo dove il corso del fiume scorre in superficie e tratteggiato dove il corso è stato tombinato, in magenta sono riportate le rogge, in azzurro le cave e in verde i fontanili di cui si parlerà nel dettaglio nel paragrafo 2.7.

In Figura 12 vengono riportati gli elementi che costituiscono l'idrografia di superficie del comune di Milano e nei paragrafi seguenti ne verranno illustrati in modo approfondito gli elementi principali.

<b>FIUMI</b>
Olona, Lambro Sett.
<b>TORRENTI</b>
Seveso, Fugone, Lura, Pudiga, Garbogera
<b>NAVIGLI</b>
Pavese, Martesana, Grande
<b>COLATORI</b>
Lambro Merid.
<b>CANALI</b>
Deviatore Fiume Olona, Cavo Redefossi, Grande Sevese
<b>ROGGE</b>
Vettabbia alta, Vettabbia bassa, Carlesca, Triulza, Gerenzana, della Conserta, Dardarona, Boccafoppa, delle Cime, Paimera, Borrona, Misericordia, Cava, Spazzola, Molina, Bordone, Desa, Parasacco, Campazzino, Fuga, Malghera, Guardina, Ohman, Cornice, Reggina, Inferno, Bozzolo
<b>CAVI</b>
Lambretto, Ticinello, Sala, da Sesto, Taverna, Bolagnos, Cornice, Parea, Bissone, Melzi, Loreto
<b>FONTANILI</b>
Bicocca, Giglio, Cavetto Nuovo, Togliolo, Rile, Molla di S. Carlo, Bocchetta del Seminario

Figura 12 Corsi d'acqua che costituiscono l'idrografia di superficie di Milano

### 2.4.1 I corsi d'acqua principali

Il territorio milanese è caratterizzato da una struttura idrografica articolata e complessa, crocevia di tre principali bacini naturali: Lambro, Seveso e Olona e di un . In questo paragrafo verranno analizzati nel dettaglio le caratteristiche dei corsi d'acqua principali.

#### 2.4.1.1 Il Seveso

Il Seveso è un torrente che nasce sul monte Sasso a Cavallasca in provincia di Como e attraversa tutta la Brianza fino ad entrare a Milano nel quartiere Niguarda. Il corso del torrente fu deviato in antichità dai Romani per creare il Grande Seveso ed il Piccolo Seveso, due canali difensivi lungo le mura repubblicane. Nel 1471, quando il Naviglio della Martesana giunse fino alla Cascina de

Pomm, il corso del Seveso venne per fungere da scolmatore per le acque in eccesso della Martesana fino al 1496 quando, completata la Martesana, il Seveso ne divenne un suo affluente. Sul territorio milanese il Seveso è completamente tombinato, il suo percorso sotterraneo inizia in via Ornato e sfocia nella Martesana nei pressi dell'incrocio tra via dei Carissimi e via Melchiorre Gioia. Nonostante il suo percorso sia completamente sotterraneo, il Seveso ricopre un ruolo importante per Milano poiché causa esondazioni frequenti nel quartiere Niguarda a seguito di minimi aumenti di portata. Per far fronte alle esondazioni sono stati costruiti il canale scolmatore di Nord-Ovest ed una griglia di decantazione in prossimità della tombinatura anche se non hanno portato ai risultati sperati.

#### **2.4.1.2 L'Olona**

L'Olona è un fiume che nasce in località Fornaci della Riana presso il Sacro Monte di Varese, il suo corso giunge a Milano dopo aver attraversato la Valle dell'Olona e Rho dove sversa parte delle sue acque nel canale Scolmatore di Nord Ovest fino a sfociare a sud di Milano nel Lambro Meridionale. La storia dell'Olona è una storia di continui cambiamenti che iniziarono in epoca romana, già i romani infatti deviarono il suo percorso per rifornire d'acqua il fossato difensivo della città. Quando vennero costruiti i Navigli le acque dell'Olona vennero deviate per sfociare nella Darsena e quest'ultima è stata la foce dell'Olona dal XVI secolo fino a pochi decenni fa, ma è nel corso del 900' che l'Olona ha subito i cambiamenti maggiori.

Il corso dell'Olona entra a Milano nei pressi di piazzale Lotto e fino agli inizi del Novecento scorreva a cielo aperto fino a piazza De Angeli, nei pressi di piazzale De Agostini formava l'Isola di Brera e dopo aver attraversato lo scalo bestiame di Parco Solari si immetteva su viale Papiniano andando a sfociare nella Darsena. Il destino di questo corso d'acqua è stato segnato nel 1884 quando il PRG comunale prevedeva l'urbanizzazione di questa zona e la costruzione di una circonvallazione con la conseguente canalizzazione dell'Olona. In seguito alla canalizzazione avvenuta nel 1931 l'Olona si trova ad avere due foci una nella Darsena chiamata "ramo Darsena" ed una seconda nel Lambro Meridionale. Nel secondo dopoguerra Milano ha un grande sviluppo urbano contemporaneamente si ha un aumento delle industrie nelle periferie a nord della città, queste sversano gli scarti delle lavorazioni industriali direttamente nell'Olona rendendone le acque inquinate e maleodoranti, per questo motivo il corso dell'Olona tra il 1950 e il 1970 venne tombinato fino a farlo sparire completamente. Il "ramo Darsena" non ha un destino troppo diverso e negli anni 80' viene prosciugato per scongiurare rischi di inquinamento e rischi idrogeologici, Fig. 2.7 tratto verde, l'unica foce dell'Olona diventa di conseguenza il Lambro Meridionale.

Per evitare che le piene dell'Olona provocassero esondazioni come già accadeva per il Seveso venne costruito il Deviatore Olona che preleva le acque in eccesso a valle di Rho e le trasporta attraverso il "Boscoincittà", Baggio, Corsico per sfociare nel Lambro Meridionale nel quartiere Barona.

### **2.4.1.3 Il Lambro**

Il Lambro nasce dai monti del San Primo a Magreglio (CO), attraversa la Brianza comasca, a Monza devia verso Est e passando per Cologno Monzese entra a Milano a Cascina Gobba dove il suo corso sottopassa il Naviglio della Martesana di cui riceve le acque in eccesso. Nel territorio del comune di Milano scorre attraverso il Parco Lambro, viale Forlanini, Cascina Monluè ed esce in zona Peschiera Borromeo. A Melegnano riceve le acque della Vettabbia, del cavo Redefossi di cui si parlerà in seguito, a Sant'Angelo Lodigiano riceve le acque del Lambro Meridionale e a Senna Lodigiana sfocia nel Po.

Ad oggi il Lambro si presenta completamente scoperto e, nonostante la scarsa qualità delle sue acque, è stato preservato dalla tombinatura grazie alla sua posizione estremamente periferica. Il Lambro assume una grande rilevanza poiché l'attuale sistema idrico milanese scarica direttamente o indirettamente, attraverso canali e navigli, in questo corso d'acqua, l'alternativa al Lambro per l'uscita delle acque da Milano è costituita dal Naviglio Pavese di cui si parlerà più avanti.

### **2.4.2 I Navigli**

Il territorio del comune di Milano è caratterizzato dalla presenza dei Navigli, canali d'acqua artificiali nati sulla fine del XII secolo con lo scopo di creare una via d'acqua navigabile che collegasse Milano con la Valtellina, il Lago Maggiore e il Mar Adriatico. Sul territorio si contano in tutto cinque navigli.

#### **2.4.2.1 Il Naviglio Grande**

Il primo in ordine temporale è il Naviglio Grande, costruito a partire dal 1179, anno della sconfitta dell'imperatore Barbarossa nella battaglia di Legnano, sulla sponda sinistra del Ticino con lo scopo di intensificare i commerci con l'area del Verbano e della Svizzera, venne ultimato nel 1257 e reso navigabile nel 1272. Il canale è lungo 50 Km e collega il Ticino dalla frazione Tornavento di Lonate Pozzolo (VA) a Milano Porta Ticinese dove si congiunge al Naviglio Pavese nella Darsena. E' collegato al Naviglio di Bereguardo presso Castelletto di Abbiategrasso e al Naviglio Pavese, come già detto, presso la Darsena di Porta Ticinese. La grande importanza che questo canale ha avuto nei secoli è legata al duplice ruolo che ricopriva: trasporto e irrigazione.

#### **2.4.2.2 Il Naviglio della Martesana**

Il Naviglio della Martesana collega Trezzo sull'Adda a Milano, fu realizzato tra il 1457 e il 1463 sulla sponda destra dell'Adda nei pressi del castello di Trezzo sull'Adda e nel 1497 venne allacciato alla Fossa Interna della città di Milano presso il Tombone di San Marco su disegno tecnico di Leonardo. Il canale, lungo 38 Km, segue il tracciato dell'antica strada romana, attuale SS 11, e sfocia nel Seveso all'altezza di Via Melchiorre Gioia a Milano. Il naviglio nasce inizialmente con lo scopo di irrigare i terreni al di sopra della fascia dei fontanili e nel 1482 viene reso navigabile. Il canale

provvede così all'uso irriguo, di trasporto e di forza motrice necessaria per gli opifici idraulici e costituisce il confine tra la pianura asciutta a nord e quella irrigua a sud.

#### **2.4.2.3 Il Naviglio di Paderno**

Il Naviglio di Paderno è un canale artificiale parallelo al fiume Adda della lunghezza di 2,9 Km nel territorio del comune di Paderno d'Adda. Fu costruito tra il 1516 e il 1777 per rendere navigabile l'Adda ininterrottamente da Paderno d'Adda fino alla Cerchia interna dei navigli milanesi attraverso il Naviglio della Martesana e grazie alla costruzione di questa opera fu collegato il lago di Como con Milano attraverso una via d'acqua. Il canale nasce dalla diga a panconcelli in legno presso il ponte di Paderno d'Adda e sfocia a Cornate d'Adda nell'omonimo fiume.

#### **2.4.2.4 Il Naviglio Pavese**

Il Naviglio Pavese nasce nel 1359 come canale non navigabile che unisce Milano a Pavia con lo scopo di irrigare il giardino del Castello di Pavia e della Certosa, a metà del XVI secolo vennero avviati i lavori di ampliamento per rendere navigabile il canale ma è solo nel 1819 che venne inaugurato il Naviglio Pavese come canale navigabile. Il canale ha origine dalle acque di scolo della Darsena di Porta Ticinese e sfocia nel Ticino nell'area del Confluente a Pavia seguendo il percorso dell'antica via postale e assolve le funzioni di trasporto e di irrigazione.

Il tracciato ricalca in parte quello del Navigliaccio, canale realizzato a metà del XIV secolo, a cui scorre a fianco e attraverso i 33 Km di canale vengono riportate nel Ticino le stesse acque raccolte più a Nord dal Naviglio Grande.

#### **2.4.2.5 Il Naviglio di Bereguardo**

Il Naviglio di Bereguardo, che come quello di Paderno non permette di raggiungere direttamente Milano, è un canale nato per la navigazione interna scavato tra il basso medioevo e il XIX secolo. Realizzato nel 1457 collega Castelletto di Mendosio (Abbiategrasso, MI) con Bereguardo dove sfocia nel Ticino dopo aver percorso circa 19 Km, nel tratto tra Abbiategrasso e Binasco segue il tracciato del Ticinello. Il canale fu impiegato per il trasporto del sale e delle merci preziose che provenivano da Oriente, tali merci transitavano da Venezia via Po per risalire attraverso il Ticino e il sistema dei Navigli e giungere a Milano. Nel 1819 a seguito dell'inaugurazione del Naviglio Pavese al transito delle barche il Naviglio di Bereguardo a causa delle difficoltà di navigazione venne declassato a canale a uso irriguo.

#### **2.4.2.6 La Fossa interna**

La cerchia interna dei Navigli milanesi, attualmente in disuso poiché nel 1884 il Piano Regolatore della città di Milano ne aveva previsto la chiusura, collegava le acque del Naviglio Grande con il fossato della Cerchia interna dei bastioni attraverso la Conca di Viarenna. In seguito alla

costruzione del Naviglio della Martesana la fossa interna dei navigli venne ridotta e collegata al nuovo canale nel 1496 attraverso la Conca della Cassina de' Pomm.

Il tracciato, circa 5 Km, aveva origine all'intersezione tra Piazza San Marco e via Fatebenefratelli e terminava nella Darsena di Porta Ticinese, attraverso questo canale si realizzò il collegamento tra le acque dell'Adda e quelle del Ticino presso la Darsena di Porta Ticinese.

Altri importanti manufatti che caratterizzano la cerchia interna dei Navigli sono la Conca dell'Incoronata, di San Marco, di Borgo Nuovo e di Porta Orientale. Il tracciato della Fossa interna è stato ripreso dalla circonvallazione e lascia intravedere le Conche di Viarenna e quella dell'Incoronata.

#### **2.4.2.7 La Darsena**

Il laghetto di Porta Ticinese, o Darsena, è collegato alla Cerchia interna dei Navigli attraverso la Conca di Viarenna e nasce ai piedi dei Bastioni spagnoli nel 1603 per volere del governatore spagnolo Conte di Fuentes. La Darsena è alimentata dalle acque del fiume Olona e da quelle del Ticino attraverso il Naviglio Grande e alimenta a sua volta il Naviglio Pavese che nasce dal Ponte del Trofeo. Nei pressi dell'area dove giaceva il Mercato Comunale si trova il canale scolmatore che scarica le acque in eccesso. La Darsena venne allargata con l'inaugurazione nel 1819 del Naviglio Pavese come canale navigabile e venne ulteriormente ampliata nel 1918 su progetto dell'ufficio tecnico comunale. A seguito di un abbandono delle vie d'acqua come via di trasporto per merci la Darsena subì un abbandono graduale a partire dagli anni Sessanta del 900. Nel 2008 con l'avvento di Expo Milano 2015 la Darsena entra a far parte di un progetto di riqualificazione e il 26 aprile 2015 viene inaugurata la nuova Darsena.

In figura Figura 13 viene illustrato il sistema dei Navigli, in giallo e rosso sono riportati i Navigli, in azzurro i canali irrigui.

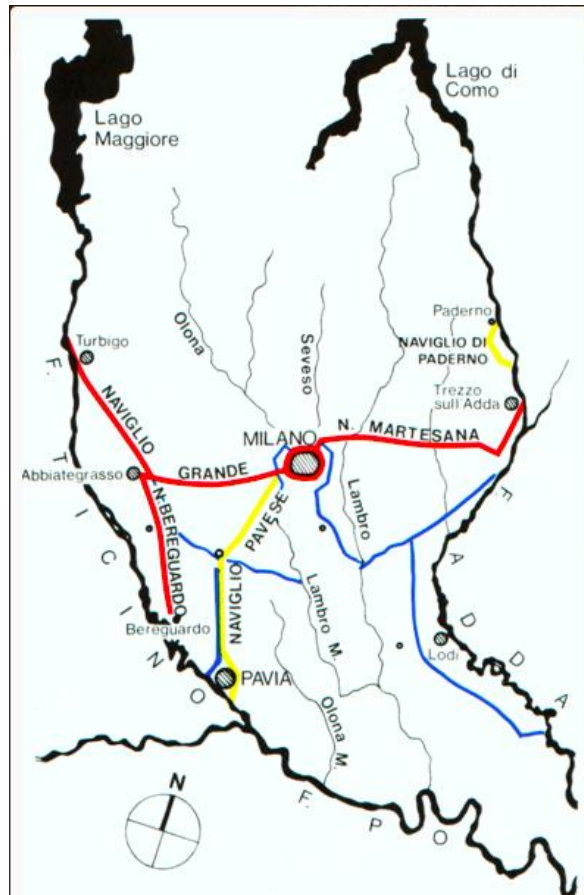


Figura 13 Tracciato dei Navigli

### 2.4.3 Le cave, le rogge e i canali

Il territorio milanese è caratterizzato non solo dalla presenza di canali navigabili di cui si è ampiamente parlato al paragrafo 2.4.2 ma anche da una rete di canali e rogge ad uso esclusivamente irriguo.

#### 2.4.3.1 I canali e le rogge

Il territorio milanese è caratterizzato dalla presenza di numerosi canali artificiali che nascono da deviazioni dei corsi d'acqua naturali che attraversano il comune. Di seguito vengono illustrati nel dettaglio quali sono i canali che attraversano Milano.

Il Grande Seveso e il Piccolo Seveso sono due canali artificiali scavati durante l'età repubblicana dell'impero Romano come derivati da una deviazione del Seveso a Nord della città di Milano. Il tracciato del Grande Seveso costeggiava le mura romane dal lato orientale mentre il Piccolo Seveso da quello occidentale e dalla loro unione nel Parco delle Basiliche nasceva la Vettabbia.

La Vettabbia è una roggia che, come già detto in precedenza, nasce dall'unione del Grande e del Piccolo Seveso che avviene nel Parco delle Basiliche. Il suo percorso ha direzione sud-est e sfocia

nel Lambro all'altezza di Melegnano. Durante l'epoca romana riceveva anche le acque provenienti dall'Olonza ed era un canale navigabile, la deviazione dell'Olonza come evidenziato in figura Fig. 2.7 è in secca. Fino alla copertura avvenuta nel 1929 la Vettabbia fu lo scaricatore principale della fossa interna e attualmente scarica le acque del Grande Sevese, parte di quelle della Darsena e una parte delle acque depurate dall'impianto di Nosedo.

Il Lambro Meridionale è un canale colatore nato sull'antico alveo del torrente Lombra. La sua storia inizia in epoca romana quando veniva utilizzato come canale di scarico fognario. Le acque di scarico della città arrivavano al Lambro Meridionale attraverso un canale che percorreva via Conca del Naviglio e sfociava nel canale all'altezza dell'attuale San Cristoforo, a seguito dello scavo del Naviglio Grande il Naviglio stesso divenne una delle sue foci. Nel 1930 nel Lambro Meridionale, sempre a San Cristoforo, vennero fatte confluire anche le acque dell'Olonza e venne canalizzato nel suo percorso attuale.

Il Lambro Meridionale nasce dalle chiuse del Naviglio Grande sotto il ponte della ferrovia a San Cristoforo e danno origine al canale che pochi metri dopo riceve le acque dell'Olonza provenienti dalla circonvallazione. Il colatore prosegue scoperto fino all'incrocio con viale Famagosta dove inizia la tombinatura, attraversa scoperto l'autostrada A7 e il deposito della metropolitana a Famagosta, in via Boffalora anche le acque del Deviatore Olona si sversano in questo canale che dopo aver sottopassato il Naviglio Pavese vicino a Chiesa Rossa abbandona la città in direzione Rozzano per sfociare nel Lambro all'altezza di Sant'Angelo Lodigiano.

#### **2.4.3.2 Le cave**

Le cave sono vasche di laminazione che nascono con lo scopo di raccogliere le acque dei corsi d'acqua per evitarne le esondazioni durante i periodi di piena. Il territorio milanese, essendo attraversato da un gran numero di corsi d'acqua sia artificiali che naturali, è caratterizzato dalla presenza dei cavi.

Tra questi degni di nota sono il Cavo Redefossi, il Cavo Borgonuovo, il Cavo Ticinello.

Il Cavo Redefossi nasce nel 1783 dalla diga al ponte delle Gabelle con lo scopo di evitare le esondazioni del Naviglio della Martesana nei periodi di piena. Percorrendo i viali di circonvallazione dei Bastioni orientali porta le sue acque da Porta Nuova a Porta Romana dove il suo percorso devia verso sud percorrendo Corso Lodi sfociando nel Lambro all'altezza del comune di Melegnano.

Dal Ponte delle Gabelle nasce un piccolo canale che porta una minima quantità d'acqua lungo via San Marco sfociando nel Cavo Borgonuovo che rifornisce il Grande Sevese, canale sotterraneo che ha origine sotto via Montenapoleone.

Il Cavo Ticinello, da non confondere col Ticinello, canale che scorre al confine con la provincia di Pavia da Abbiategrasso a Bereguardo, è un canale che scarica le acque della Darsena dal lato di

Porta Ticinese e fu utilizzato come canale scolmatore della Darsena già prima che venisse costruito il Naviglio Pavese. Il suo percorso, in uscita da Milano, è parallelo a quello della Roggia Vettabbia e sfocia nel Lambro Meridionale.

## 2.5 Classificazione quantitativa dei corpi idrici sotterranei

Il D. Lgs. 152/06 definisce un corpo idrico sotterraneo come “un volume distinto di acque sotterranee contenute da una o più falde acquifere”, definendo la falda acquifera come “uno o più strati sotterranei di roccia o di altri strati geologici di porosità e permeabilità sufficiente da consentire un flusso significativo di acque sotterranee o l'estrazione di quantità significative di acque sotterranee”.

Per poter identificare e caratterizzare i corpi idrici sotterranei si devono prima identificare i complessi idrogeologici che, partendo dal quadro di riferimento nazionale “Carta delle risorse idriche sotterranee di Mouton”, possono essere suddivise in sette tipologie differenti. All'interno dei complessi idrogeologici vengono individuati gli acquiferi sulla base di considerazioni di natura idrogeologica ed in particolare sulla base dei flussi e dei quantitativi che possono essere reputati significativi. In seguito si suddividono i corpi idrici sotterranei su basi di tipo fisico e dei confini idrogeologici che derivano dalla suddivisione della pianura lombarda in bacini ad opera dell'azione drenante che i principali corsi d'acqua (Adda, Mincio, Oglio, Sesia e Ticino) esercitano sulla falda. Il D. Lgs. 30/2009 prevede che, se il corpo idrico sotterraneo può essere descritto accuratamente alla scala di riferimento, allora esso coincide con l'acquifero, se invece ciò non è possibile, è necessario suddividere il corpo idrico sotterraneo tenendo conto dei confini idrogeologici, degli spartiacque e delle linee di flusso.

La normativa nazionale prevede che i corpi idrici sotterranei vengano classificati attraverso l'Allegato 1 del D. Lgs. 152/99 il quale prevede che lo stato qualitativo dei corpi idrici sotterranei vengano definiti in base allo stato quantitativo e allo stato chimico, tale classificazione deve essere riferita ad ogni acquifero che viene individuato.

La normativa prevede che siano le Regioni a definire i parametri necessari per redigere la classificazione quantitativa dei corpi idrici in base alle caratteristiche dell'acquifero stesso (tipologia, permeabilità, coefficienti di immagazzinamento) e del suo livello di sfruttamento (prelievi e tendenza piezometrica o delle portate).

Nel D. Lgs. 152/99 lo stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei viene classificato nel modo seguente:

- Classe A: l'impatto antropico è nullo o trascurabile con condizioni di equilibrio idrogeologico. Le estrazioni di acqua o le alterazioni della velocità naturale di ravvenamento sono sostenibili sul lungo periodo;
- Classe B: l'impatto antropico è ridotto, vi sono moderate condizioni di disequilibrio del bilancio idrico senza che tuttavia ciò produca una condizione di sovrasfruttamento, consentendo un uso della risorsa sostenibile sul lungo periodo;
- Classe C: l'impatto antropico è significativo con notevole incidenza dell'uso della disponibilità della risorsa evidenziata da rilevanti modifiche degli indicatori generali esposti



precedentemente;

- Classe D: l'impatto antropico è nullo o trascurabile, ma si ha la presenza di complessi idrogeologiche con caratteristiche intrinseche di scarsa potenzialità.

In Figura 14 si può osservare la classificazione dei corpi idrici sotterranei secondo il D. Lgs. 152/99 per il territorio delle provincie di Milano e Monza Brianza.

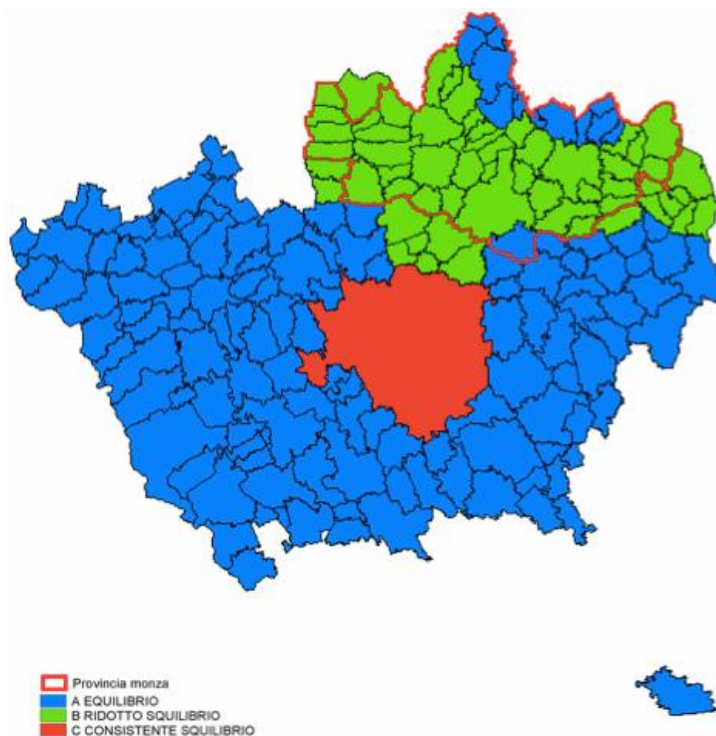


Figura 14 Stato quantitativo dell'acquifero tradizionale secondo il D. Lgs. 152/99 (Fonte Qualfaldà I)

Osservando la Figura 14 si nota che il territorio del comune di Milano risulta avere un consistente squilibrio per quanto riguarda i corpi idrici sotterranei.

La normativa nazionale più recente, D. Lgs. 152/06, prevede la suddivisione dello stato quantitativo in due classi: Buono e Scarso, non vengono fornite indicazioni su come correlare le nuove classi con quelle del D. Lgs. 152/99.

A livello regionale lo stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei è definito dal “Piano di tutela delle acque della Regione Lombardia”, la Fig. (fonte Qualfaldà I) evidenzia lo stato quantitativo delle acque sotterranee della provincia di Milano, tale carta è rappresentativa della prima e della seconda falda ovvero quello che viene considerato l'acquifero tradizionale.

## 2.6 Oscillazioni della superficie piezometrica dal 900' ai giorni

Il livello piezometrico della città di Milano ha subito variazioni considerevoli nel corso del XX secolo, con l'avvento dell'industrializzazione si è registrato un abbassamento di grande entità della superficie piezometrica. In alcuni documenti risalenti agli anni Sessanta si riporta che gli emungimenti avevano causato un prosciugamento dell'intera risorsa idrica presente nella

prima falda portando le captazioni dei pozzi ad uso industriale ad utilizzare la falda più profonda. Al contrario a seguito del processo di deindustrializzazione, iniziata negli anni Ottanta, il livello della falda milanese è tornato ad alzarsi e se le captazioni dovessero cessare del tutto, si riporterebbe idealmente al livello in cui si trovava all'inizio del secolo scorso.

Nel 1940 Theis osservò che in condizioni naturali, ovvero prima dell'introduzione dei pozzi, l'acquifero della città di Milano si trovava in condizioni di equilibrio dinamico poiché da decine di anni il deflusso veniva eguagliato dalla ricarica. Il prelievo idrico dai pozzi modifica la condizione di equilibrio e causa una diminuzione di immagazzinamento da parte dell'acquifero e si instaura una nuova condizione di equilibrio dinamico o attraverso una ricarica indotta che consiste in un incremento dell'alimentazione, o per mezzo di una diminuzione del deflusso a valle o tramite la combinazione di entrambi i fattori.

Dalle note illustrative redatte per la Carta Geologica d'Italia fogli 45, 46 sotto la direzione di A. Desio (1969) lo sfruttamento della falda acquifera nella città di Milano veniva descritta così:

*Milano* — Sono state individuate numerose falde. La prima e la seconda falda, che giacciono rispettivamente a 4 m e a 12-13 m di profondità, sono ora praticamente esaurite. Attualmente vengono utilizzate soltanto le acque delle falde comprese tra 40 e 110 m. Le falde più profonde sono pochissimo conosciute e dove sono state raggiunte non sono state utilizzate per la scarsa portata e a causa della presenza di H<sub>2</sub> S e di cloruri.

Un elemento da considerare nella classificazione quantitativa dell'acquifero consiste nel definire le situazioni non desiderate e gli effetti negativi che può indurre una variazione del livello piezometrico.

In Beretta, 2002, si trova un elenco degli ambiti di riferimento da considerare:

- Interconnessione con le acque superficiali collegate;
- Direzione media di flusso idrico sotterraneo;
- Ecosistemi;
- Strutture nel sottosuolo;
- Liscivazione di inquinanti;
- Subsidenza;
- Funzionalità delle captazioni;
- Rischio idraulico.

Per valutare se l'attuale livello di falda produce o meno effetti negativi su ciascuno degli elementi sopra citati, si deve introdurre il concetto di "condizione di riferimento" che nel

caso di risorse idriche si traduce in “livello piezometrico sostenibile”. Questo livello varierà a seconda del parametro di riferimento che si sta analizzando, infatti non è possibile utilizzare lo stesso livello di riferimento nel caso in cui per esempio si voglia garantire l’approvvigionamento idrico e l’alimentazione dei fontanili.

Dopo aver definito il rapporto tra il livello di falda rilevato e il livello piezometrico sostenibile si potrà classificare la risorsa in relazione ad ogni specifico impatto, si definiranno anche delle soglie intermedie per una caratterizzazione più dettagliata.

## 2.7 Fontanili

L’area di minima profondità della falda freatica corrisponde alla fascia dei “Fontanili”. I fontanili sono delle sorgenti di emergenza che si manifestano spontaneamente o sono provocate artificialmente da scavi che si trovano al passaggio dall’alta pianura ghiaiosa alla bassa pianura prevalentemente sabbiosa. La zona dei fontanili della città di Milano fa parte della fascia continua che nella Pianura Padana e Veneta si estende da Mondovì fino al fiume Isonzo. In questo caso è limitato ad Ovest dal Ticino e ad Est dall’Adda.

La presenza e l’attività dei fontanili è determinata da vari fattori come il variare della litologia del sottosuolo con conseguente ostacolo allo scorrimento sotterraneo della falda che causa l’innalzamento della superficie piezometrica. Un altro fattore che condiziona la presenza dei fontanili è rappresentato dall’alimentazione della falda freatica addebitabile alla rete irrigua dei Navigli e del Canale Villoresi. In ogni caso, condicio sine qua non, affinché vi possa essere presenza di fontanili è che il livello piezometrico sia a scarsa profondità dal piano campagna (1-3m).

[\(http://www.cittametropolitana.milano.it/ambiente/acque\\_superficiali/info\\_tecniche/fontanili/\)](http://www.cittametropolitana.milano.it/ambiente/acque_superficiali/info_tecniche/fontanili/)

I fontanili sono composti da una testa, scavo di forma semicircolare eseguito dall’uomo e con profondità variabile tra i 2 e i 10 m, esiste una differenziazione tra la zona Ovest, dove gli scavi sono più profondi, e la zona Est, dove le teste sono più superficiali e di conseguenza più sensibili alle variazioni del livello di falda. Lo scavo viene effettuato in modo tale da avere il letto appena al di sotto del livello della soggiacenza della falda.

Dopo la testa si trova l’asta che permette all’acqua di defluire nel canale irrigatore che la distribuisce nei campi. Generalmente la testa è costituita da un rilievo di modesta entità prodotto dall’accumulo di materiale scavato e caratterizzato da vegetazione arborea che permette di individuare facilmente un fontanile nel paesaggio agricolo padano.

L’acqua, che viene raccolta nella testa del fontanile, ha origine da polle e da infiltrazioni laterali, defluisce nell’asta e sfruttando la naturale pendenza del terreno del terreno risale verso il piano campagna ed è collegata ad una serie di canali irrigatori. Il fondo della testa e la parte iniziale dell’asta sono caratterizzate da una permeabilità che permette la formazione di piccole vene idriche in corrispondenza dei quali si trovano i così detti occhi di fonte (Figura 15), inizialmente erano tini in legno che negli anni divennero prima tubi in ferro e poi in calcestruzzo, essi erano infissi nel terreno e favoriscono la fuoriuscita delle acque sotterranee anche al di

sopra del pelo libero dell'acqua. Concludendo si può affermare che la testa del fontanile forma una depressione di entità modesta nella superficie della falda richiamando continuamente acque anche lateralmente all'alveo del fontanile.

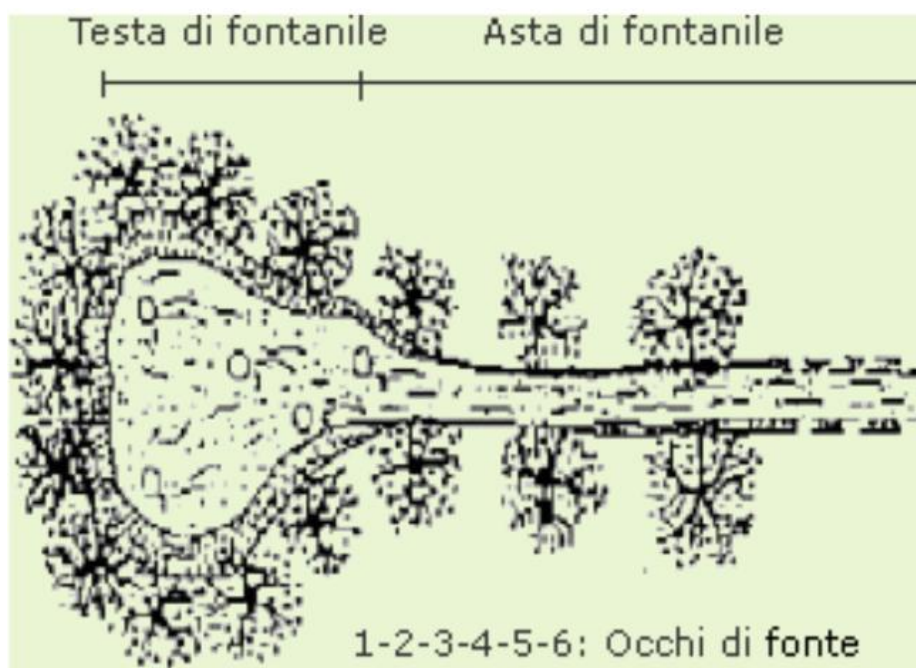


Figura 15 Struttura di un fontanile (Cerabolini-Zucchi 1975)

I fontanili nel corso degli ultimi cinquant'anni andarono via via prosciugandosi per cause naturali ma soprattutto a causa dell'intervento dell'uomo. A partire dal 1945 i fontanili andarono via via scomparendo nell'intero territorio del comune di Milano. Le secche stagionali causavano fenomeni di putrescenza lungo i fossati che raccoglievano scarichi ad uso industriale e civile e l'interramento di rogge, canali, fontanili e percorsi dei fiumi divenne inevitabile.

A partire dagli anni Cinquanta-Sessanta si è assistito ad una drastica diminuzione nel numero dei fontanili, la causa di tale decremento può essere associata a fattori differenti tra cui:

- Impermeabilizzazione dei suoli che ha notevolmente ridotto l'apporto delle acque meteoriche alla falda freatica;
- Enorme prelievo di acque sotterranee per alimentare la crescente industrializzazione ed urbanizzazione;
- Abbandono dei tradizionali metodi di coltura e soprattutto delle marcite. (Progetto Qualfalda II, Carraro, Guzzella, Ravelli, Salerno, 2005)

Nel 1975 i fontanili attivi nella provincia di Milano erano almeno 430 con una portata complessiva giornaliera (rilevata su media annua) di circa 28 mc/s, il dato aggiornato al 1995

riporta 186 fontanili attivi e risultano quasi del tutto scomparsi nella città di Milano e nell'area NE del territorio provinciale.

Osservazioni compiute su tutti i fontanili segnati sulle tavolette dell'I.G.M. nella zona compresa tra Monza, Milano e San Giuliano Milanese durante i mesi di febbraio e marzo 1963 hanno dimostrato che parecchi fontanili (i più prossimi alla città) si sono estinti o sono in via di estinzione. La causa è da ricercare nell'abbassamento del livello freatico provocato dal notevole emungimento della falda stessa con pozzi. Ad esempio, nella sola città di Milano il numero dei pozzi in servizio a fine marzo 1963 era di 730 comunali e di circa 2300 privati, con un'eterogazione complessiva valutata sui 40 m<sup>3</sup>/sec.

In seguito a questo fortissimo emungimento il livello della falda freatica che a Milano alla fine del secolo scorso era situato a 3-4 m di profondità (F. SALMOJRAGHI, 1892), si trovava all'inizio del 1963 in media a 23 m. Quindi in poco più di 70 anni si è verificato un abbassamento medio del livello freatico di circa 20 m: il fenomeno si è particolarmente accentuato dal dopoguerra in poi.

In conclusione, tutti i fontanili di Milano si sono estinti perché in parte interrati o combinati, in parte privi di teste risorgive e in parte ridotti all'asciutto per costruire strade e complessi residenziali. I recenti innalzamenti della falda non hanno avuto come diretta conseguenza un aumento del numero di fontanili attivi, nonostante negli anni molti ex stabilimenti industriali abbiano perso le caratteristiche proprie di funzionalità idraulica. ([http://www.milanofree.it/milano/storia/fontanili\\_milano.html](http://www.milanofree.it/milano/storia/fontanili_milano.html))

In Figura 16 viene riportata la localizzazione dei fontanili nel territorio della provincia di Milano relative all'anno 1975.



Figura 16 Localizzazione dei fontanili nel territorio della provincia di Milano (Censimento corpi idrici su suoerficiali Provincia Milano 1975)

A partire dagli anni Novanta la chiusura dei grandi poli industriali ha causato un innalzamento della falda freatica e le amministrazioni, tra cui la Provincia di Milano, hanno ricominciato a considerare il ruolo dei fontanili favorendone, ove possibile, il ripristino ed emanando norme per tutelarli. Nonostante i consistenti innalzamenti della falda non si è assistito però ad un incremento del numero di fontanili attivi.

Il Parco Agricolo Sud Milano nel 1999 ha effettuato un nuovo censimento dei fontanili presenti nel territorio milanese, attraverso questa attività di campionamento è stato possibile aggiornare lo stato di conoscenza dei fontanili. Il territorio censito, come risulta visibile in Figura 17 (in rosso è stata segnata la porzione di territorio che attualmente appartiene alla provincia di Monza e Brianza), comprende la fascia della provincia che va dal comune di Corbetta a quello di Melzo.

Nell'ambito di questa indagine sono stati analizzati 350 fontanili e per ciascuno di essi sono stati riportati in un database georeferenziato i seguenti dati di rilevanza idrogeologica:

- Dati riguardanti la localizzazione (coordinate, codice identificativo);
- Stato del fontanile (attivo, inattivo o interrato);
- Grado di alimentazione (continua o con secche periodiche);
- Profondità della testa dal piano campagna;
- Portata.

Al termine del censimento si è rilevato che i fontanili ancora attivi sul territorio provinciale



risultano essere 253 che corrispondono circa al 72% del campione censito.

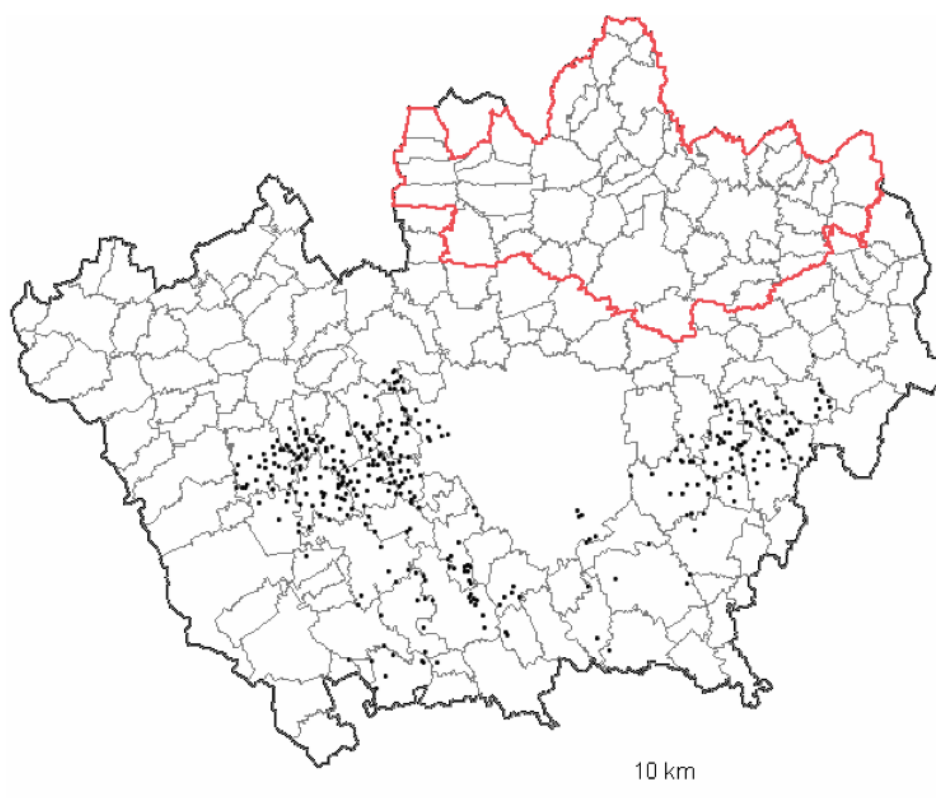


Figura 17 Localizzazione dei fontanili nella provincia di Milano censiti nel 1999 dal Parco Agricolo Sud Milano

## 2.8 Carte della piezometria e della soggiacenza

La Provincia di Milano nel documento Qualfalda II fornisce un confronto tra le carte piezometriche degli anni 1982 e 2007, nel seguente elaborato si farà riferimento a tale confronto estendendolo agli anni 2013 e 2014. I dati utilizzati per redigere le carte della piezometria e della soggiacenza sono stati estrapolati dal sito della Provincia di Milano SIA (società informativa ambientale). Le carte di piezometria e soggiacenza si riferiscono ai mesi di marzo e settembre dei diversi anni per i quali si è deciso di redigerle, parte delle carte, in particolare per gli anni 2013 e precedenti sono stati forniti dal sito della provincia di Milano. Per poter rendere compatibili queste ultime con quelle già esistenti relative agli anni precedenti è stato necessario utilizzare lo stesso software, lo stesso metodo di interpolazione per quanto riguarda la griglia infatti, le carte relative all'anno 2014 invece sono state costruite attraverso il software Surfer 12 e la griglia di riferimento è stata ottenuta mediante il metodo di interpolazione Kriging. Nelle figure Figura 22, Figura 23, Figura 24 e Figura 25 viene riportato l'andamento medio mensile relativo al decennio 2004-2014 della piezometria di quattro pozzi pubblici situati nei settori Nord, Sud, Ovest ed Est del territorio comunale. I pozzi su cui sono state effettuate le analisi del livello piezometrico sono il 151461377 sito in via Noto, il 151462399 sito in via Manduria, il 151461312 sito in viale Rimembranze di Lambrate e il 151462391 sito in via Padova. Nell'Appendice A6 si trovano le tabelle in cui vengono riportati tutti i dati relativi ai pozzi presi in analisi. Oltre alle oscillazioni della piezometria dei

quattro pozzi presi in esame si analizzano nel dettaglio le oscillazioni piezometriche mensili relative all'anno 2014.

Oscillazioni della falda nel decennio 2004-2014:

- Nord, via Padova

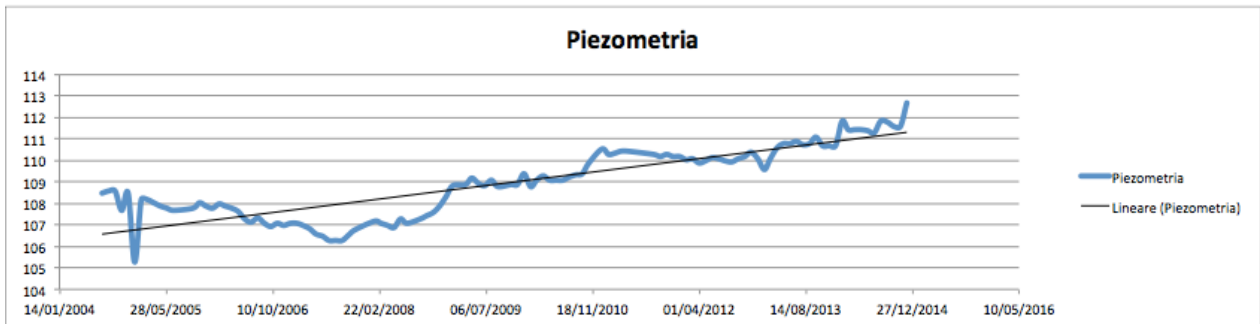


Figura 18 Oscillazioni piezometriche pozzo Via Padova dal 2004 al 2014

- Sud, via Noto

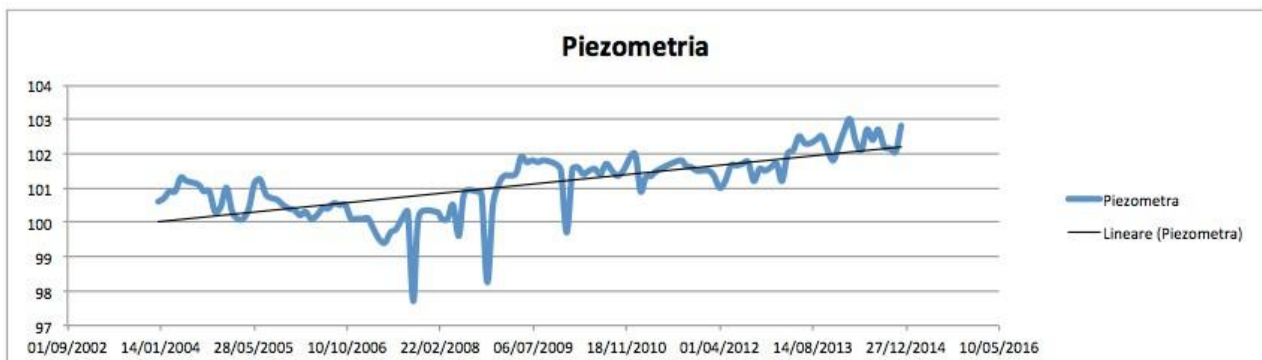


Figura 19 Oscillazioni piezometriche pozzo via Noto dal 2004 al 2014

- Ovest, via Manduria

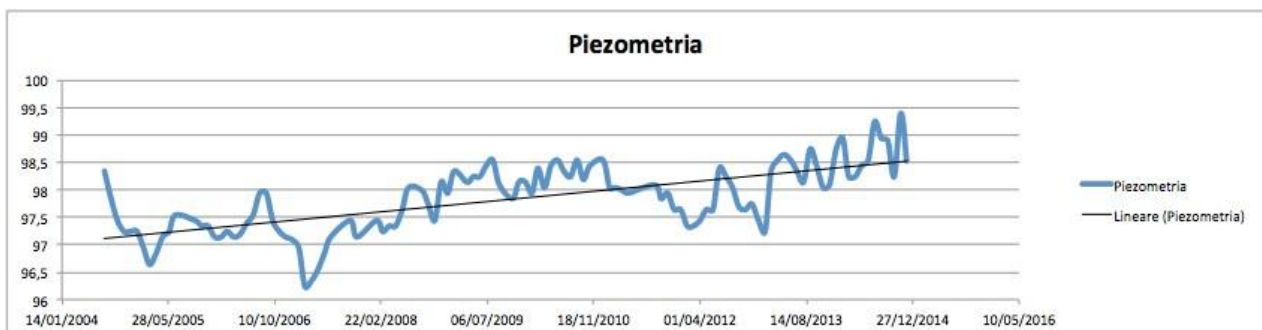


Figura 20 Oscillazioni piezometriche pozzo via Manduria dal 2004 al 2014



- Est, viale Rimembranze di Lambrate

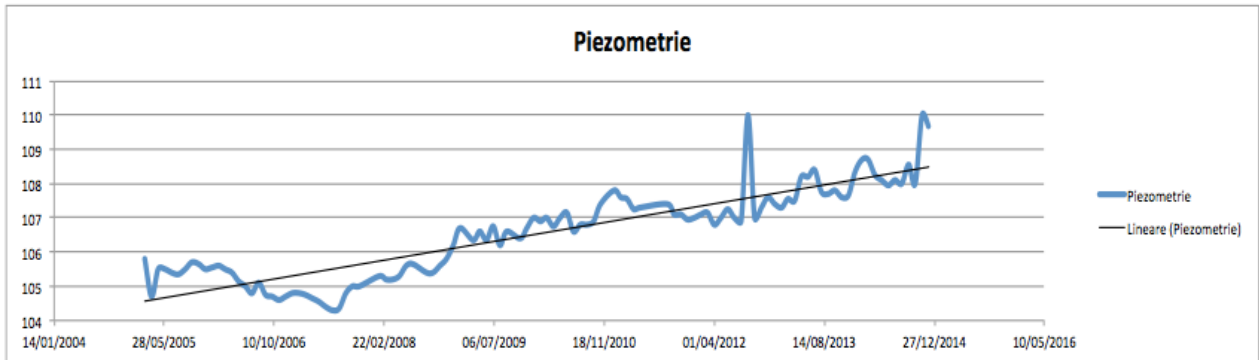


Figura 21 Oscillazioni piezometriche pozzo Viale Rimembranze Lambrate dal 2004 al 2014

Anno 2014 livelli piezometrici:

- Nord, via Padova



Figura 22 Oscillazioni piezometriche pozzo via Padova anno 2014

- Sud, via Noto



Figura 23 Oscillazioni piezometriche pozzo via Noto anno 2014

- Ovest, via Manduria

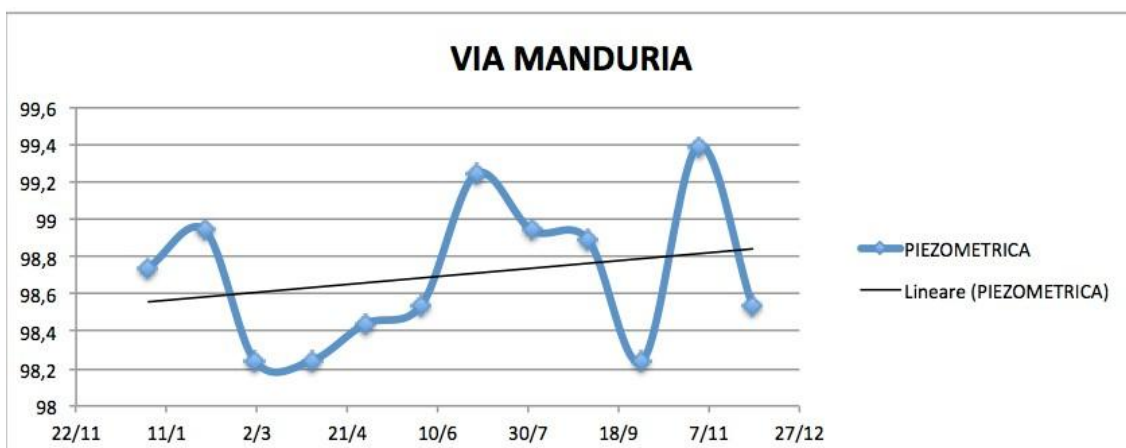


Figura 24 Oscillazioni piezometriche pozzo via Manduria anno 2014

- Est, viale Rimembranze di Lambrate

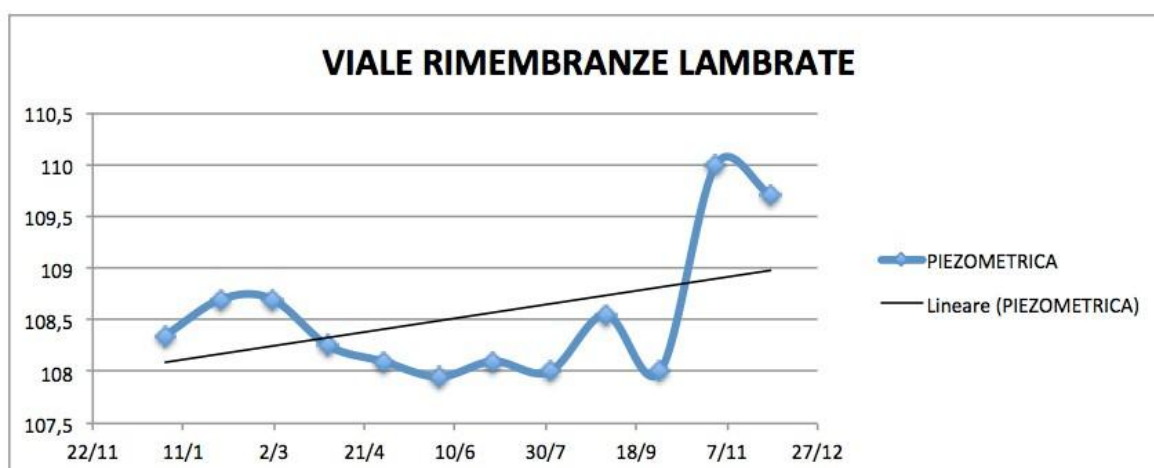


Figura 25 Oscillazioni piezometriche pozzo viale Rimembranze Lambrate anno 2014

Osservando i grafici nelle figure Figura 18, Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22, Figura 23, Figura 24 e Figura 25 si nota che il livello di falda negli ultimi dieci anni ha un trend crescente così come ha un trend crescente durante l'arco dell'anno ad eccezione del pozzo sito in via Noto nella zona Sud della città di Milano. Da un'analisi dei grafici relativi ai singoli pozzi per l'anno 2014 si nota che il livello di falda massimo viene raggiunto nei mesi di marzo-maggio mentre il livello minimo nei mesi di settembre-ottobre.

Nelle figure Figura 26, Figura 27, Figura 28 e Figura 29 vengono riportate delle ricostruzioni 3D del livello di falda del territorio del comune di Milano per gli anni 1990, 2000, 2013 e 2014. Non è stato possibile ricostruire le carte piezometriche relative agli anni precedenti il 1990 poiché i dati relativi ai livelli di falda dei pozzi non sono registrati nel database informatizzato della Provincia di Milano.

- 1990

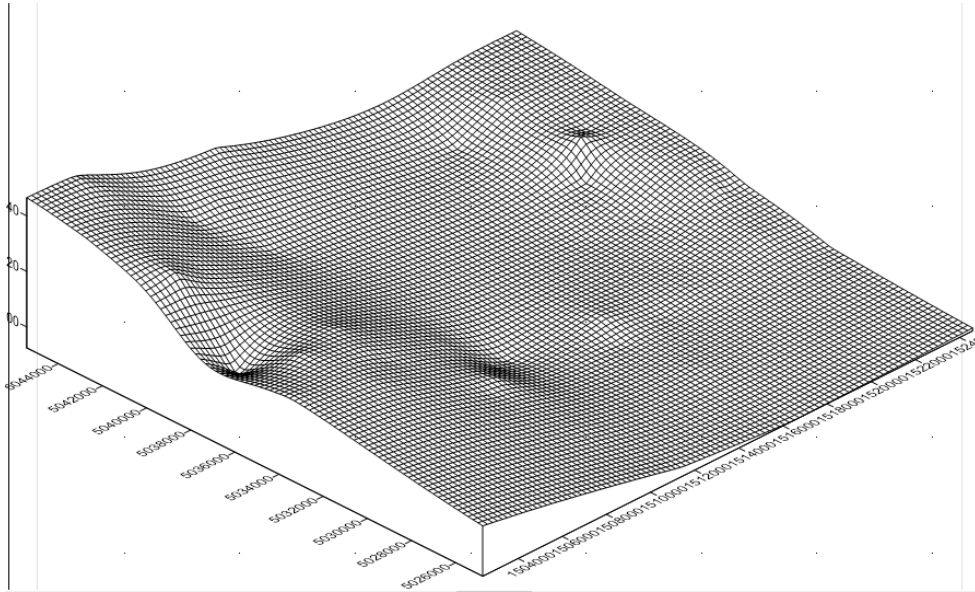


Figura 26 Rappresentazione 3D del livello piezometrico di Milano anno 1990

- 2000

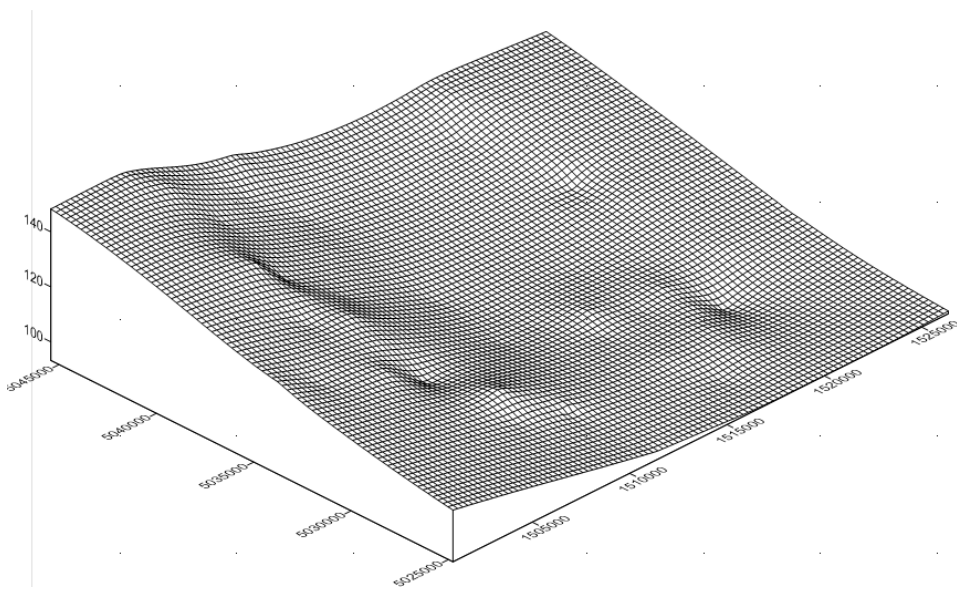


Figura 27 Rappresentazione 3D del livello piezometrico di Milano anno 2000

- 2013

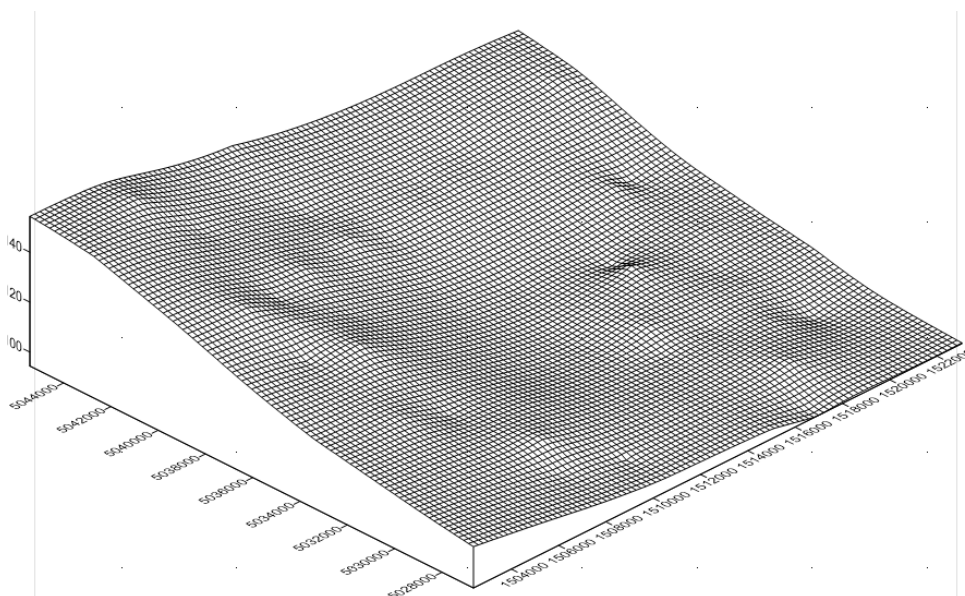


Figura 28 Rappresentazione 3D del livello piezometrico anno 2013

- 2014

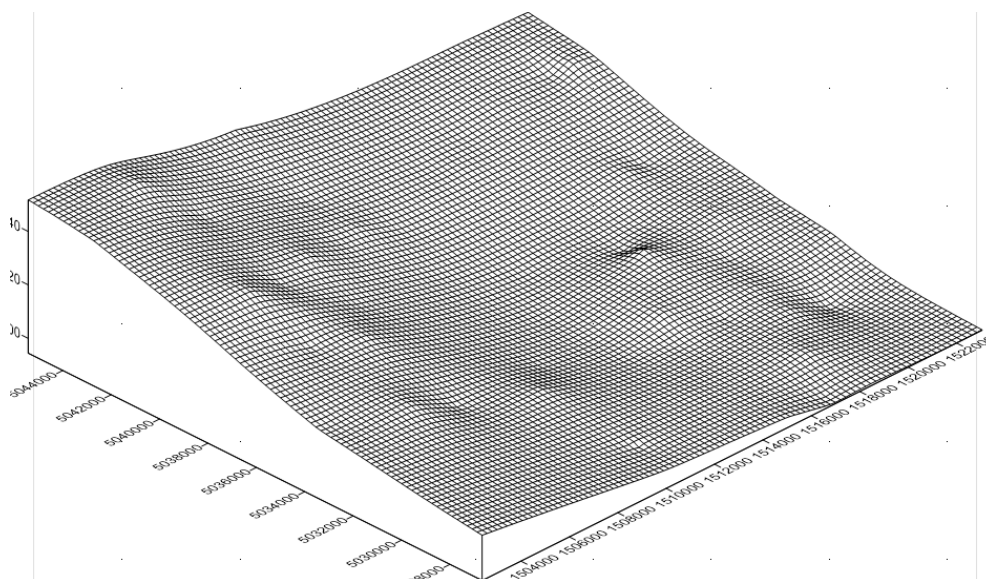


Figura 29 Rappresentazione 3D del livello piezometrico anno 2014

Analizzando le ricostruzioni della superficie freatica 3D delle figure Figura 26, Figura 27, Figura 28 e Figura 29 si nota che il cono di depressione che era ben visibile nel settore Nord-Ovest della carta del 1990 risulta essere molto attenuato se non quasi del tutto sparito nelle carte degli anni successivi ed in particolare in quelle relative agli anni 2013 e 2014. Dalle figure Figura 30, Figura 31. si può osservare che la direzione del flusso delle acque sotterranee è N-NO S-SE.



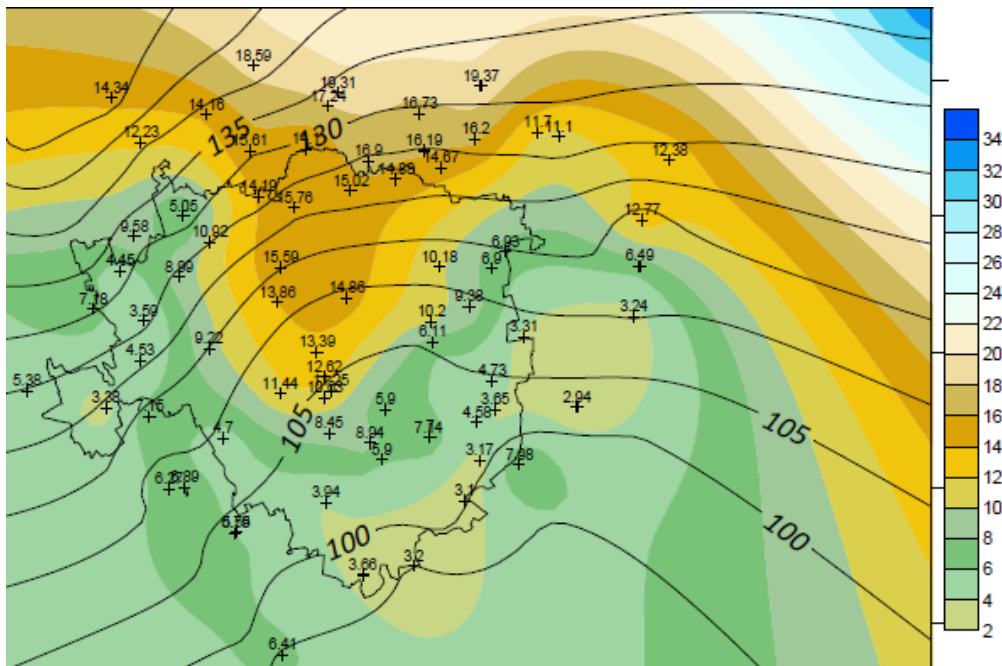


Figura 30 Carta della piezometria e della soggiacenza marzo 2014

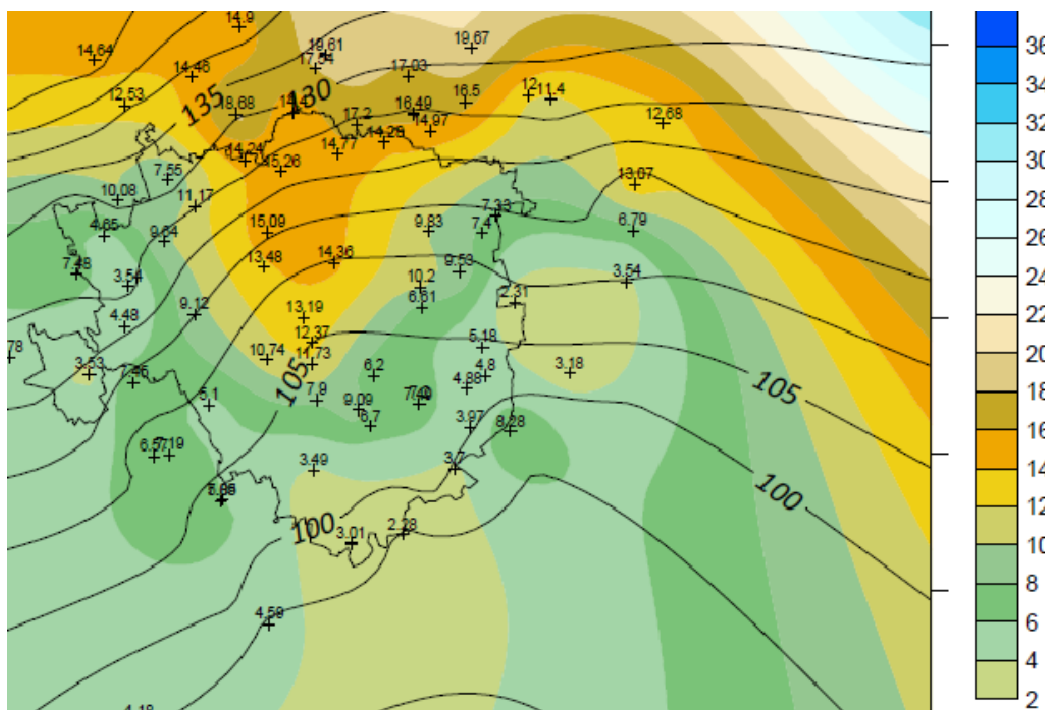


Figura 31 Piezometria e soggiacenza settembre 2014

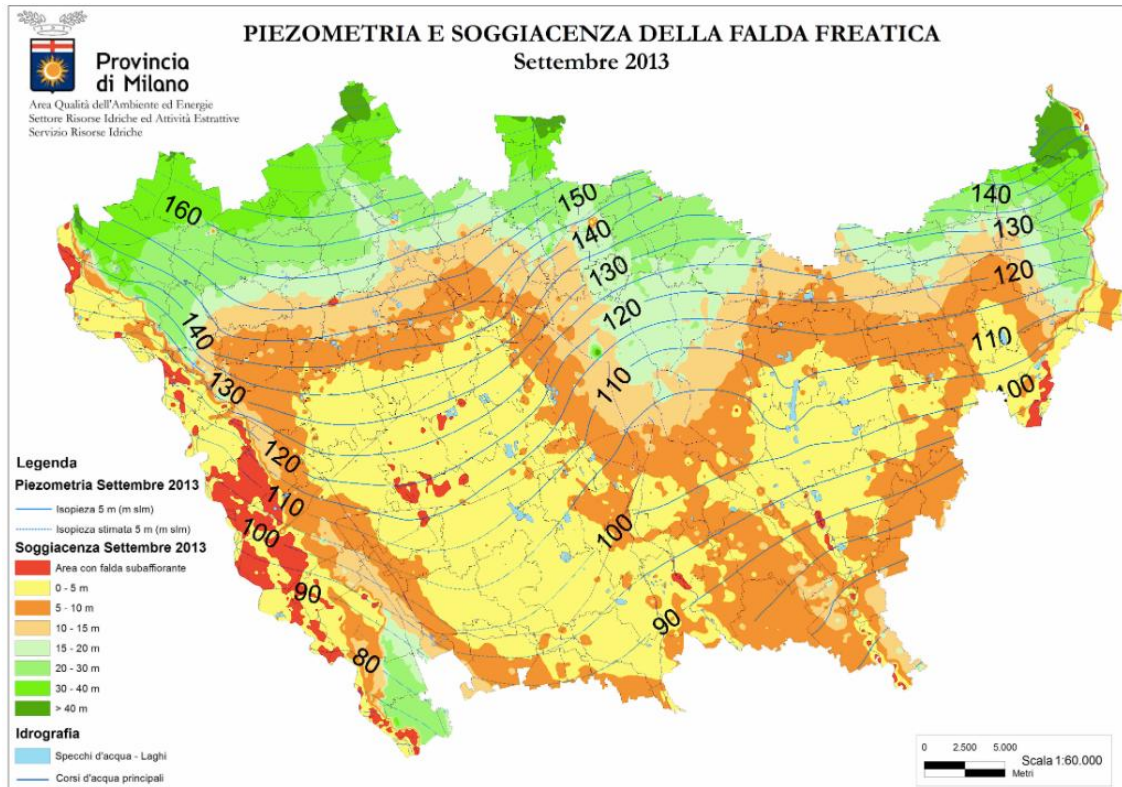


Figura 32 Carta della piezometria e della soggiacenza settembre 2013

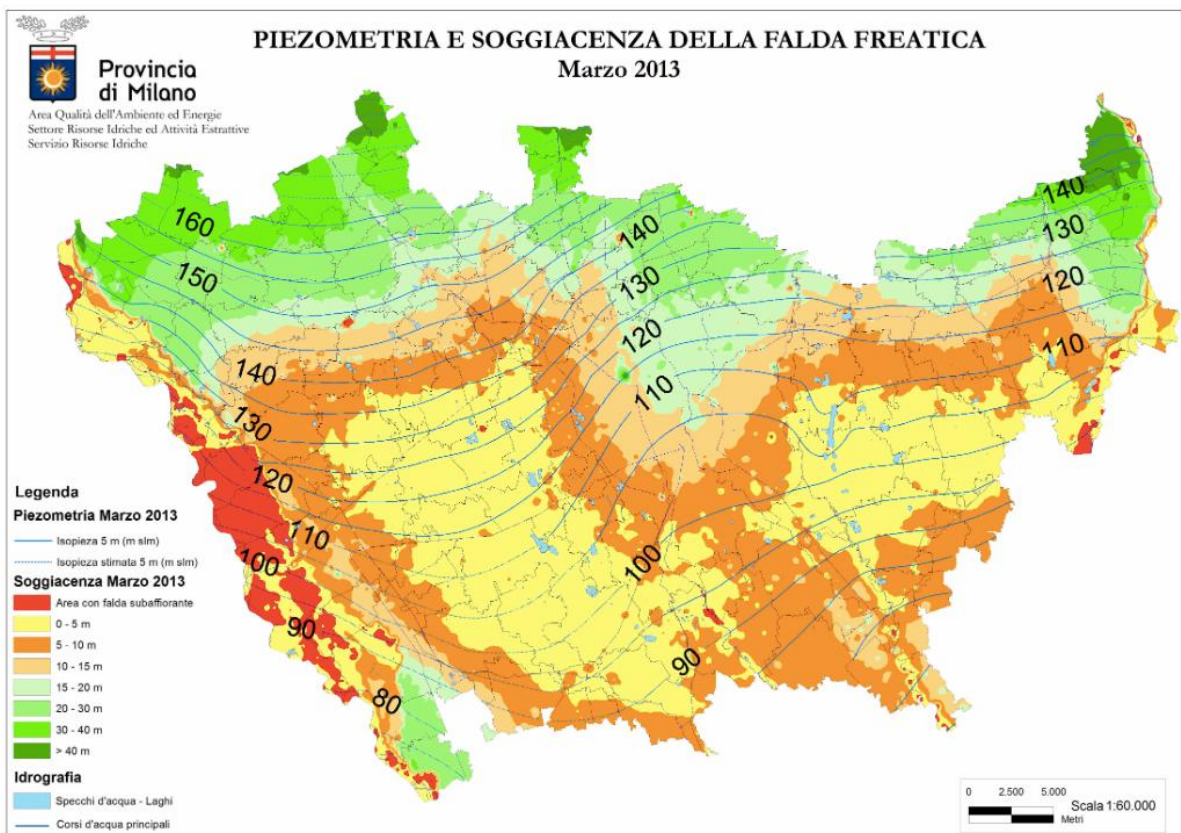


Figura 33 Carta di piezometria e soggiacenza marzo 2013



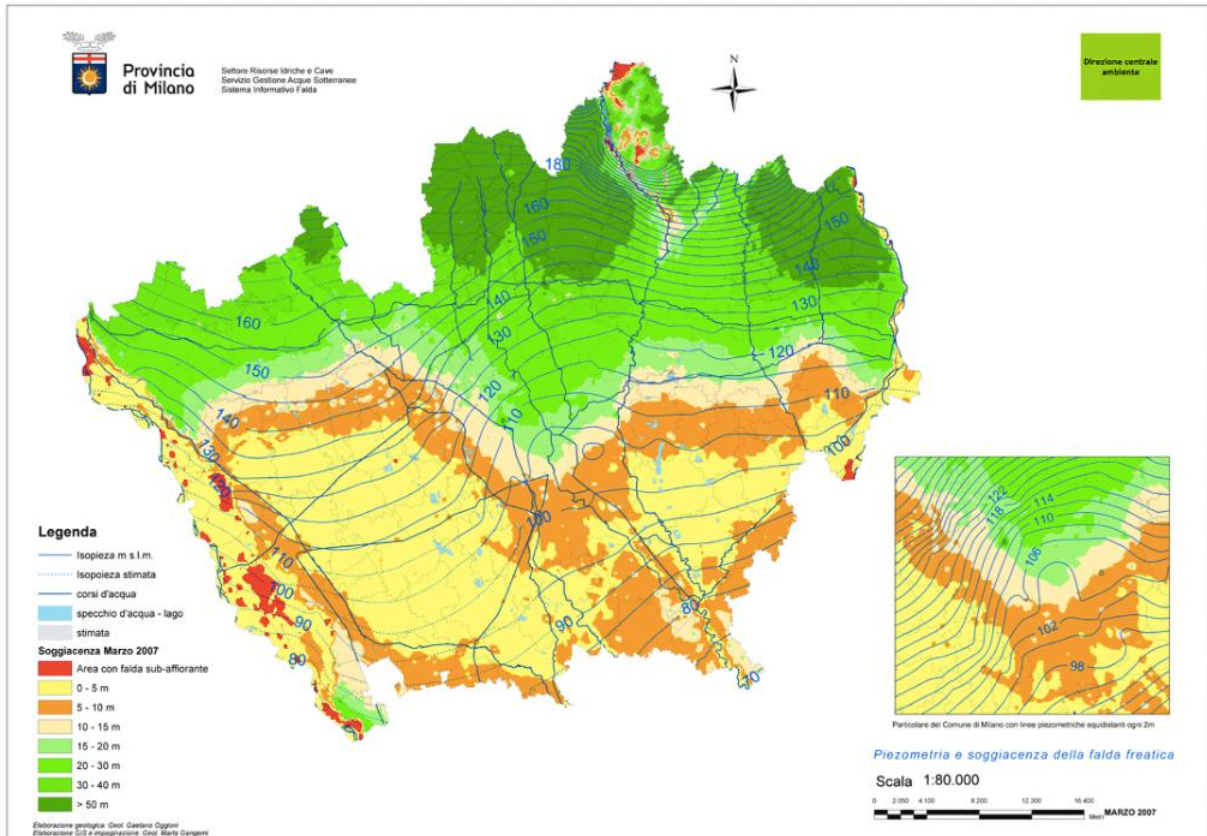


Figura 34 Carta di piezometria e soggiacenza settembre 2007

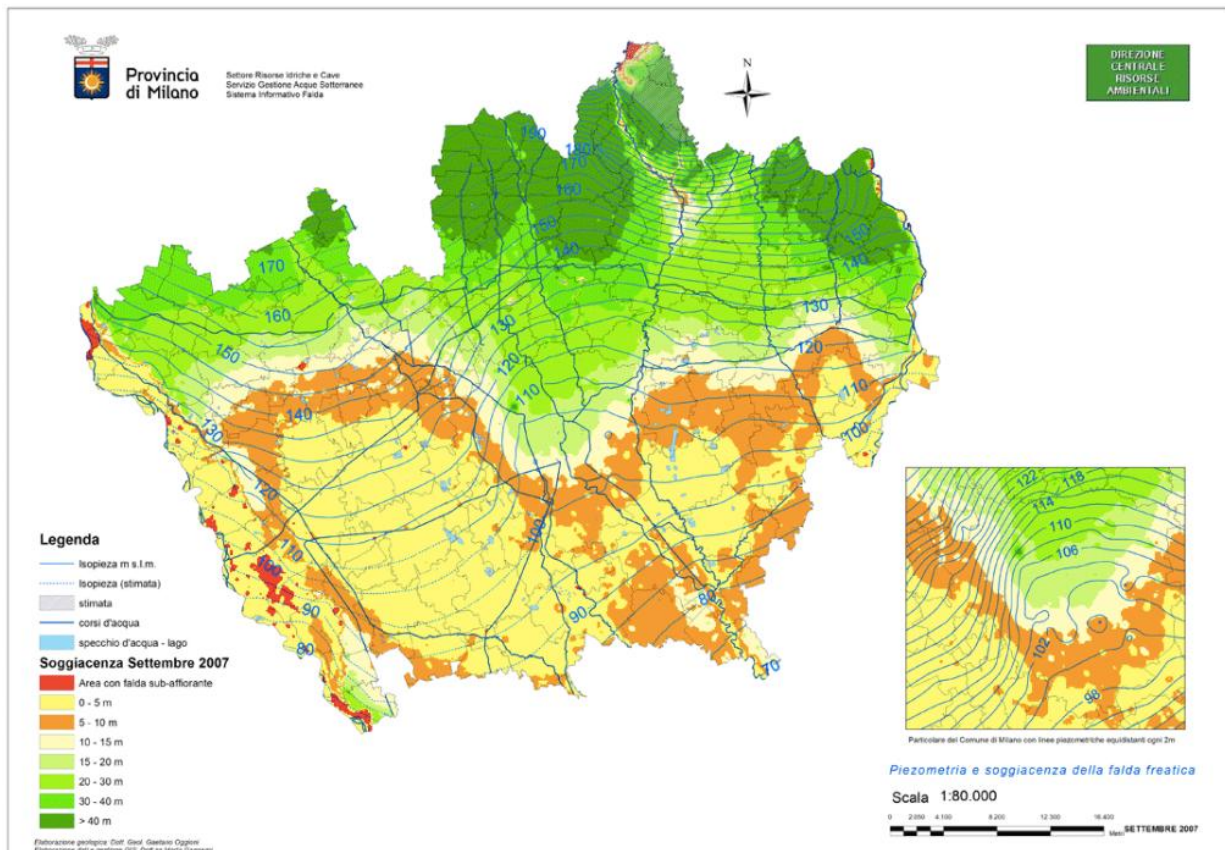


Figura 35 Carta di piezometria e soggiacenza marzo 2007

## PIEZOMETRIA E SOGGIACENZA DELLA FALDA FREATICA (media 1982)

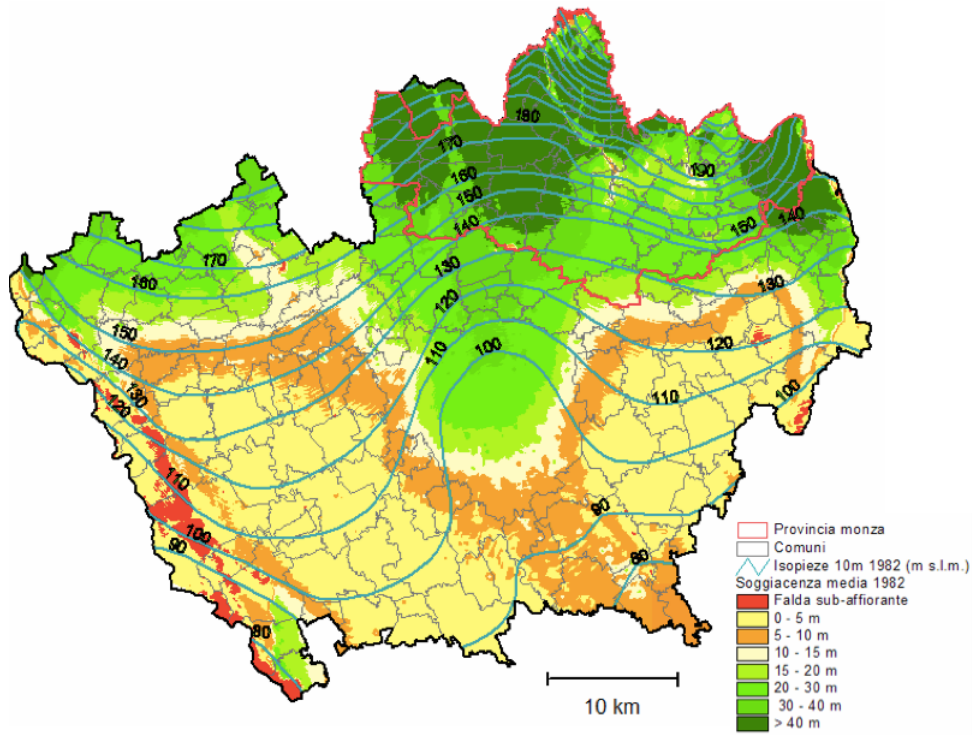


Figura 36 Carta di piezometria e soggiacenza anno 1982 (fonte Qualfalda II)

## CARTA DELLA PIEZOMETRIA DELLA FALDA FREATICA (1982-2007)

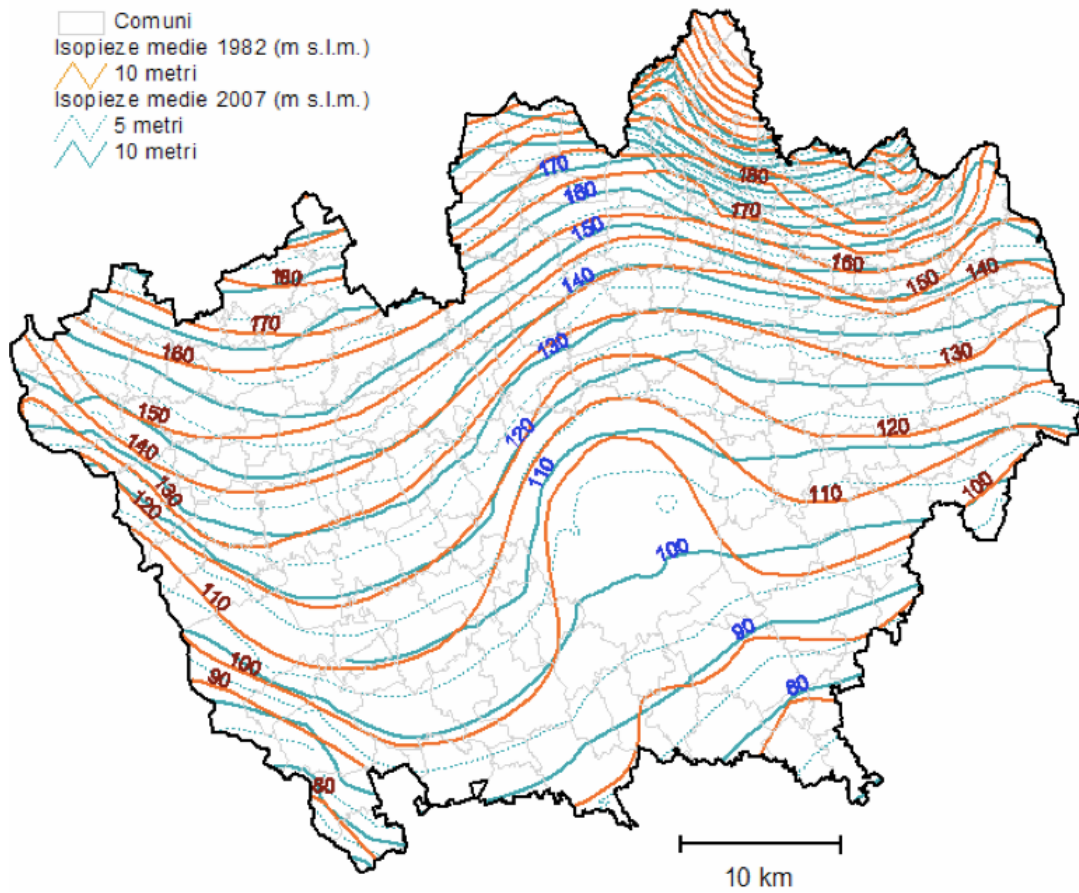


Figura 37 Evoluzione del livello piezometrico dal 1982 al 2007



Nelle figure Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35 e Figura 36 viene riportato l'andamento delle isopieze degli anni 2014, 2013, 2007 e 1982. Le carte relative al 1982 è stata reperita dalla bibliografia (Qualfada II), le carte degli anni 2007 e 2013 dal sito della Provincia di Milano mentre per quanto riguarda il 2014 sono state ricostruite attraverso il software Surfer 9.

In Figura 38 e Figura 39 viene espresso il confronto tra la soggiacenza dell'anno 1982 e quella dell'anno 2007. Le tonalità del giallo e del rosso esprimono un aumento del livello di falda, mentre con le tonalità dell'azzurro e del blu ne viene espressa una sua diminuzione. Osservando la carta si nota che il territorio della città di Milano ha registrato diminuzioni superiori ai 7 m, mediamente la diminuzione è stata di 5,6 m ed in generale si hanno diminuzioni di minore intensità nei comuni limitrofi al capoluogo procedendo in direzione Nord. Si ha invece un evidente aumento della soggiacenza, superiore anche in questo caso ai 7 m, nei comuni a Nord-Est e Nord-Ovest di Milano.

Le maggiori differenze in termini di direzione del flusso idrico sotterraneo vengono riscontrate nel comune di Milano dove si può osservare che tra il 1982 e il 2007 la depressione piezometrica causata dall'intenso sfruttamento di acque sotterranee, avvenuto nel corso degli anni 70', si sia attenuato. Per quanto riguarda il resto del territorio provinciale si ha una diminuzione del livello piezometrico con conservazione della direzione del flusso idrico.

CARTA DELLA DIFFERENZA DELLA SOGGIACENZA (2007-1982)

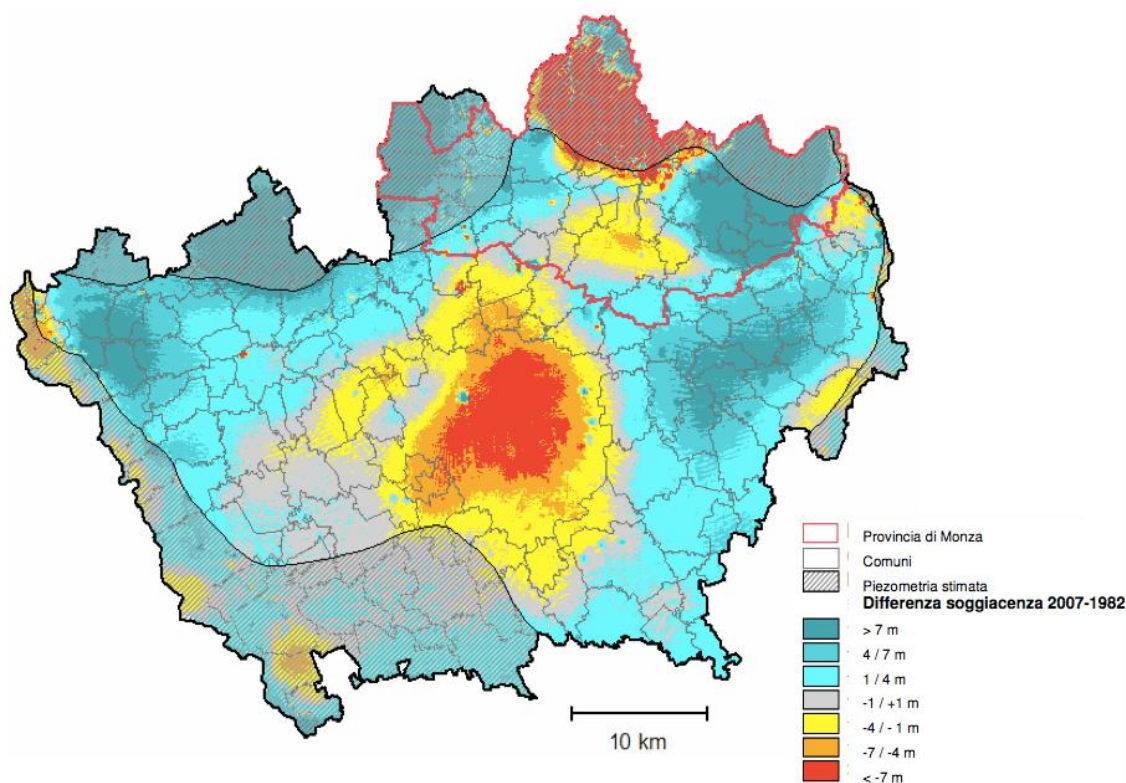


Figura 38 Confronto tra la soggiacenza del 1982 e quella del 2007

## VARIAZIONE ANNUA DELLA SOGGIACENZA (1982-2007)

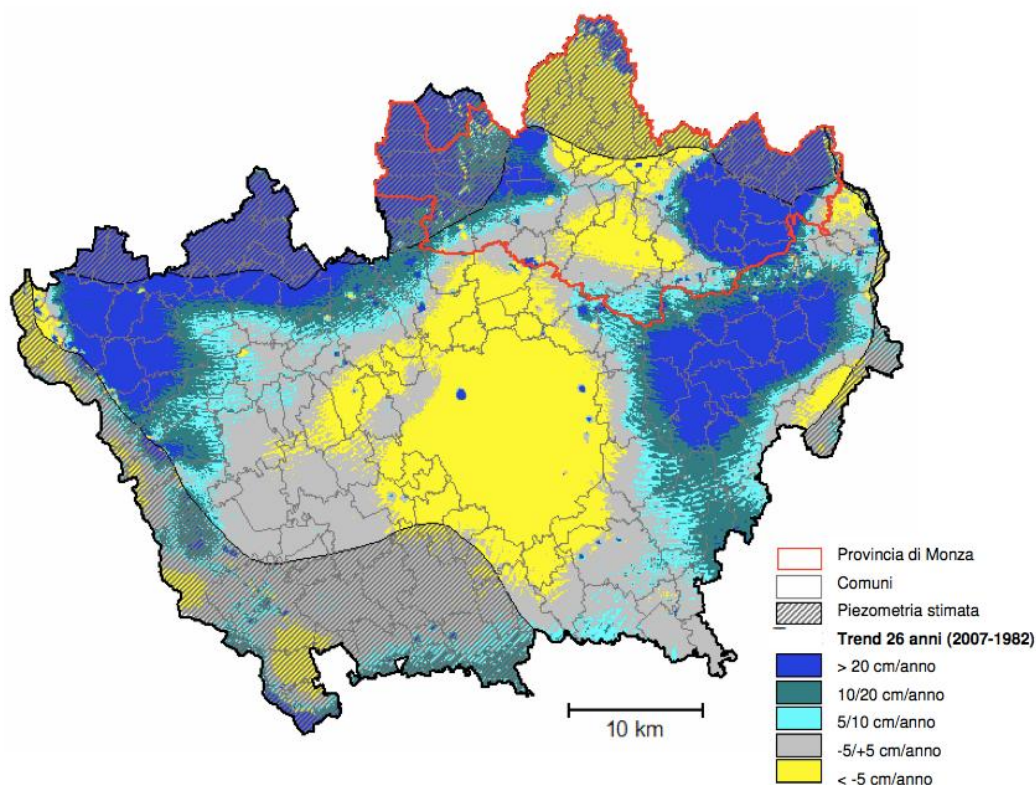


Figura 39 Variazione della soggiacenza dal 1982 al 2007

Le variazioni del livello della falda nel territorio milanese è legato soprattutto ai prelievi industriali nell'area di Milano. Fino agli anni 50' la falda presentava un andamento quasi costante senza evidenti variazioni ad eccezione di un'inflessione tra il 1940 e il 1945.

A partire dalla metà del secolo scorso invece, tutti i pozzi iniziano a segnalare un costante abbassamento dei livelli, ciò è causato dai forti emungimenti delle industrie. Dalla fine degli anni Settanta si registra una risalita che si mantiene circa costante fino al 1980 presentando un massimo negli anni 1977-78, il forte innalzamento che si registra nel 1980 invece è legato strettamente al regime pluviometrico. Nel decennio successivo si registra invece un abbassamento della falda di qualche metro.

E' a partire dai primi anni Novanta che si assiste ad un costante ed ingente innalzamento del livello di falda, questa tendenza è la causa di gravi disagi a causa dell'interferenza con le strutture in sotterraneo (parcheggi, linee metropolitane, sottopassi, scantinati, ecc...) che sono soggette ad allagamenti periodici o costanti che ne determinano l'inutilizzo totale o parziale.

### **3. Innalzamento della falda, fenomeno a livello globale**

Il seguente capitolo è il risultato di una seconda fase di ricerca bibliografica nella quale si è cercato di contestualizzare il caso di Milano a livello globale. Si è andati ad indagare se il fenomeno dell'innalzamento della falda sia un caso isolato ricollegabile solo alla città meneghina o può essere considerato il minimo comune denominatore di quelle che sono state le grandi città industriali del Vecchio Continente.

Ciò che si è riscontrato è che il fenomeno dell'innalzamento della falda della città di Milano non è da considerare un caso isolato, infatti il capoluogo lombardo è una tra le tante città, europee e non, in cui il fenomeno della deindustrializzazione ha portato come conseguenza all'innalzamento del livello della falda. Nel seguente elaborato di tesi si farà riferimento alle città di Londra e Parigi, che con Milano non solo hanno in comune la problematica dell'innalzamento della falda, ma anche la conformazione geologica. Possiamo supporre quindi che in queste tre metropoli europee ci si sia scontrati con gli stessi problemi con l'avvento della deindustrializzazione ed in effetti vedremo che è proprio così. Si analizzeranno nel seguito i casi delle due capitali europee in modo distinto per poter focalizzare meglio quali sono le problematiche comuni a Milano e in quale modo le autorità governative di queste città hanno deciso di agire per evitare l'insorgere di eventi dannosi per le infrastrutture e di disservizi per la popolazione locale.

#### **3.1 Il caso di Londra**

##### **3.1.1 Breve inquadramento geologico ed idrogeologico**

La storia geologica di Londra è diversa da quella di Milano nonostante, come si vedrà in seguito, ci sono alcuni elementi comuni nel sottosuolo delle due città. Il sottosuolo della capitale britannica è caratterizzato dalla presenza di depositi appartenenti all'era Terziaria la cui formazione viene fatta risalire al Paleogene e al Cretaceo Figura 40 e Figura 41

A livello stratigrafico il sottosuolo londinese può essere suddiviso dal basso verso l'alto negli strati seguenti:

- Gesso (Chalk) unica formazione attribuibile al Cretaceo.

I depositi di Gesso sono alla base delle formazioni più recenti, attribuibili al Paleogene, che possono essere schematizzate, sempre in ordine stratigrafico dal basso verso l'alto, come segue:

- Sabbie di Thanet (Thanet sands): composto da sabbie fini;
- Gruppo di Lambeth: composto dalle formazioni di Woolwich e di Upnor e si contraddistingue per la presenza di sabbie, limi ed argille;
- Gruppo del Tamigi: composto dalle formazioni di Harwich, argilla di Londra, formazione di Bagshot. La formazione di Harwich è caratterizzata da sabbie e ghiaie, mentre l'argilla di Londra è di colore blu grigiastro ed è densa e fessurata.

Le formazioni sopra esposte formano la sinclinale del bacino di Londra il quale ha un andamento asimmetrico, al suo interno l'argilla di Londra si presenta con uno spessore che spesso supera gli ottanta metri e confina il Chalk Aquifer nella gran parte del territorio. Il bacino di Londra, nella zona Sud, è caratterizzato dalla presenza di due faglie, quella di Wimbledon e quella di Greenwich.

<b>Era</b>	<b>Group</b>	<b>Formation</b>	<b>Thickness (m)</b>
Palaeogene	Thames	Bagshot Formation	10 – 25
		Claygate Member	30-90
		London Clay	
		Harwich Formation	0-10
	Lambeth	Woolwich and Reading Beds	10-20
		Upnor Formation	5-7
	Thanet Sands	0-30	
Cretaceous	Chalk	180-245	

Figura 40 Inquadramento geologico della città di Londra

Da quanto esposto in precedenza si può riscontrare che a livello geologico le città di Londra e Milano sono simili in quanto in entrambe si rileva la presenza di uno strato di argilla che confina la falda acquifera e di un terreno caratterizzato prevalentemente da sabbie e ghiaie con la presenza di lenti di limo ed argilla.

All'interno del bacino di Londra, l'acquifero di Chalk costituisce l'acquifero di dimensioni maggiori, esso è ubicato nei depositi del Terziario e ciò significa che la sua fonte di ricarica maggiore è costituita dalle acque provenienti dagli affioramenti del Chilterns a Nord e da quelli del North Downs a Sud. Il Chalk è un acquifero caratterizzato da un basso potere di immagazzinamento, ha alta trasmissività e doppia porosità, il flusso e l'immagazzinamento infatti avvengono sia nella matrice che nelle fratture.

Nella parte sud ovest del bacino di Londra, il Chalk ha una trasmissività minore, mentre sotto le valli dei fiumi dei fiumi Tamigi e Lee sono presenti dei corridoi ad alta trasmissività. Le acque sotterranee scorrono verso il centro del bacino di Londra dalle aree di ricarica che sono poste nelle zone Nord-Ovest e Sud-Ovest.

Come risultato degli emungimenti attuali e di quelli passati, il flusso delle acque sotterranee dall'ovest non fluisce verso il centro di Londra e le acque che fluiscono da Est sono attratte verso il centro di Londra, mentre le acque che provengono dalle zone sud est interagiscono col Tamigi.

Il London Clay, caratterizzato da bassa permeabilità, impedisce alla superficie freatica di raggiungere la superficie causando un aumento della pressione al di sotto delle lenti di argilla, se la pressione sotterranea aumenta l'argilla, anche se molto lentamente, aumenta il suo grado di saturazione. Come già accennato in precedenza, il London Clay è caratterizzato dall'essere estensivamente fessurato localmente, questa sua caratteristica permette un rapido ingresso delle acque sotterranee. Queste caratteristiche portano ad una risaturazione che potrebbe intaccare la stabilità delle fondazioni e potrebbe causare infiltrazioni nelle gallerie che si trovano nel London Clay.

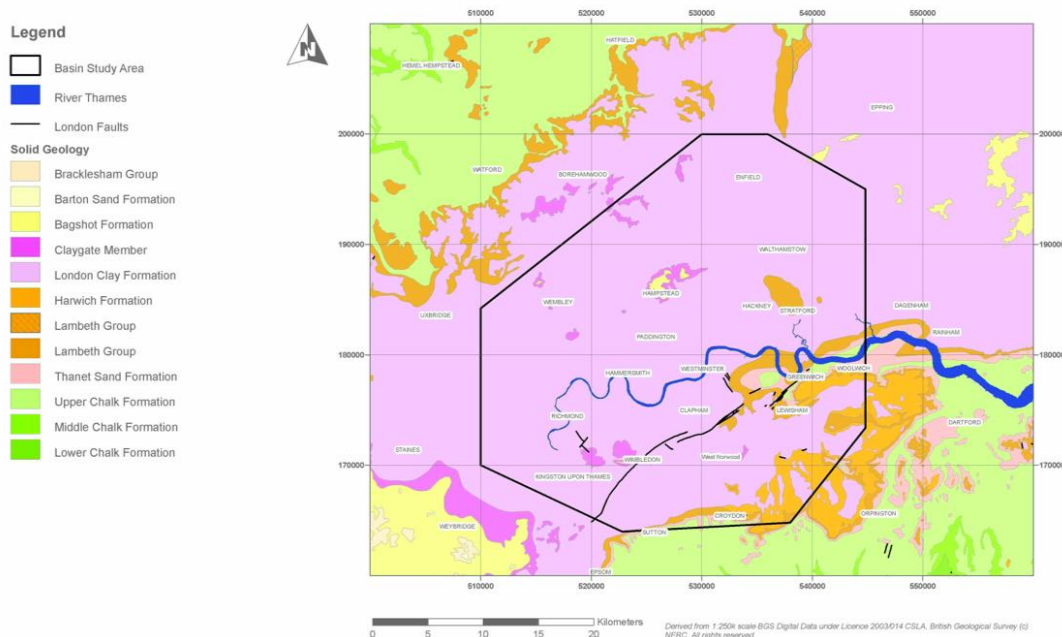


Figura 41 Inquadramento geologico della città di Londra

### 3.1.2 Strutture sotterranee che interagiscono con la falda

Le strutture in sottoterraneo presenti sul territorio londinese vennero costruite per ragioni tecniche ed economiche sopra la falda, è nel XIX secolo che vengono costruite le prime strutture che interagiscono con la falda, tra questi ricordiamo il Thames Tunnel, costruito tra il 1825 e il 1843, opera ingegneristica all'avanguardia che sottopassa l'alveo del Tamigi. In seguito vennero costruite numerose strutture ubicate nella falda tra cui le gallerie delle linee metropolitane, le fondazioni di alcuni grattacieli e altre strutture che verranno elencate in seguito.

- Linee metropolitane e London Overground Railway

Nel 1863 venne inaugurata a Londra la prima linea metropolitana a livello mondiale, il suo sviluppo nel corso dei secoli è stato notevole e ad oggi è costituita da 11 linee, 270 stazioni ed un tracciato di 402 Km di cui 180 in galleria. Il diametro medio delle gallerie varia dai 5 ai 7 m. La profondità è molto variabile a seconda del periodo in cui la linea è stata costruita, le linee più antiche sono costruite a profondità minore mentre le linee più recenti hanno profondità maggiori, la linea più profonda è la Northern Line che nella stazione di Hampstead raggiunge la profondità massima di 68,5 m.

La London Overground Railway, è la linea ferroviaria suburbana che collega la città di Londra con Hertfordshire, è costituita da nove linee e il tracciato nell'area urbana di Londra è stato realizzato in galleria e in alcuni tratti è situata ad una profondità maggiore rispetto ai tunnel delle linee metropolitane (Whitechapel station, Watford Junction-Euston route, Kenton-South Kenton, Northwick Park-Preston Road) e oltrepassa il Tamigi utilizzando il Thames Tunnel, è la galleria più antica di Londra inaugurata nel 1843 e adibita all'uso ferroviario nel 1865, ha diametro di 6 m e è ad una profondità di 23 m.



Le gallerie delle linee metropolitane e quelle della rete ferroviaria suburbana interferiscono con il Chalk Aquifer laddove si hanno profondità compatibili con quelle della falda, le linee più antiche della metropolitana sono interamente costruite al di sopra della falda mentre quelle più recenti sono costruite nel Chalk Aquifer.

- Strutture sotterranee

La storia degli edifici alti a Londra inizia negli anni Venti con la costruzione del grattacielo situato al 55 di Broadway, in seguito alla costruzione di questo edificio i grattacieli che delineano lo skyline londinese si moltiplicarono. Tra questi si vogliono ricordare quelli che hanno le fondazioni che intersecano il Chalk Aquifer e che sono ubicate nel London Clay, degni di nota sono il Moor House che ha una fondazione su pali che si trova a 57 m di profondità e il complesso al 22 di Bishopgate che vanta una fondazione su pali 65,5 m al di sotto del piano campagna.

### **3.1.3 Provvedimenti istituzionali**

Il sovra sfruttamento del Chalk Aquifer avvenuto durante il corso del XIX secolo e della prima parte del XX secolo, come risultato di una crescente industrializzazione che era strettamente legata allo sfruttamento delle risorse idriche sotterranee causò, alla fine degli anni Cinquanta, la formazione di un cono di depressione nella zona centrale della città. A partire dalla seconda metà degli anni 60' le industrie presenti nella zona centrale di Londra vennero dislocate in provincia e gli stabilimenti vennero chiusi o adibiti ad altre funzioni, come diretta conseguenza si ebbe una riduzione delle captazioni e la superficie freatica cominciò a risalire con innalzamenti che, durante i primi anni dello smantellamento degli stabilimenti, raggiunsero livelli di crescita annuali anche di 3 metri. Nel 1992 a causa della minaccia che l'innalzamento del livello di falda costituiva per le infrastrutture e le strutture presenti nel bacino di Londra, tra cui le fondazioni degli edifici alti e le gallerie delle linee metropolitane, venne istituito il GARDIT (General Aquifer Research Development and Investigation Team). L'obiettivo di questo organo è quello di controllare il livello delle acque sotterranee della falda nella zona centrale della città di Londra in modo da mantenere l'integrità delle strutture e delle fondazioni presenti nel London Clay.

La strategia adottata per mantenere circa costante il livello della falda è quello di realizzare delle captazioni regolamentate, attraverso queste captazioni è possibile controllare il livello delle acque sotterranee ed evitare l'insorgere di fenomeni dannosi per le e per i cittadini.

La regolazione del livello delle acque per mezzo di emungimenti offre il vantaggio di non avere effetti negativi sull'ambiente e permette inoltre di evitare l'infiltrazione di acque saline nell'acquifero nel caso in cui il livello di falda sia inferiore a quello del Tamigi.

La soggiacenza del Chalk non è uniforme su tutto il territorio londinese e come conseguenza è necessario utilizzare diverse politiche a seconda dei differenti livelli della falda. La quantità d'acqua da prelevare deve essere sostenibile ma è difficile da determinare con certezza perché il livello di falda ha dei tempi di risposta molto lenti rispetto ai prelievi. Il regime di captazioni è in continuo cambiamento e il livello delle acque sotterranee non si è ancora stabilizzato Figura 42.

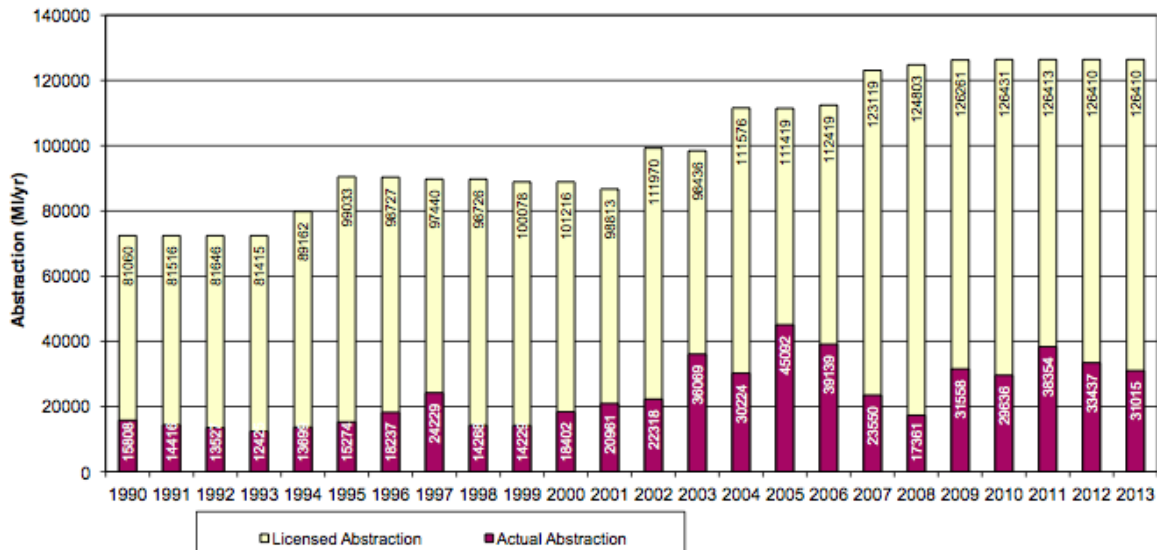


Figura 42 Volume di acqua che viene prelevata in modo regolato dalla falda

A partire dal 1999 c'è stato un incremento del volume di acqua prelevata mentre dal 2006 in alcune aree si sono limitate le captazioni perché si era superato il volume sostenibile Figura 43. Le restrizioni sulle licenze di prelievo sono basate sulla stima dell'altezza del pelo libero delle acque sotterranee al di sopra della parte superiore del Chalk.

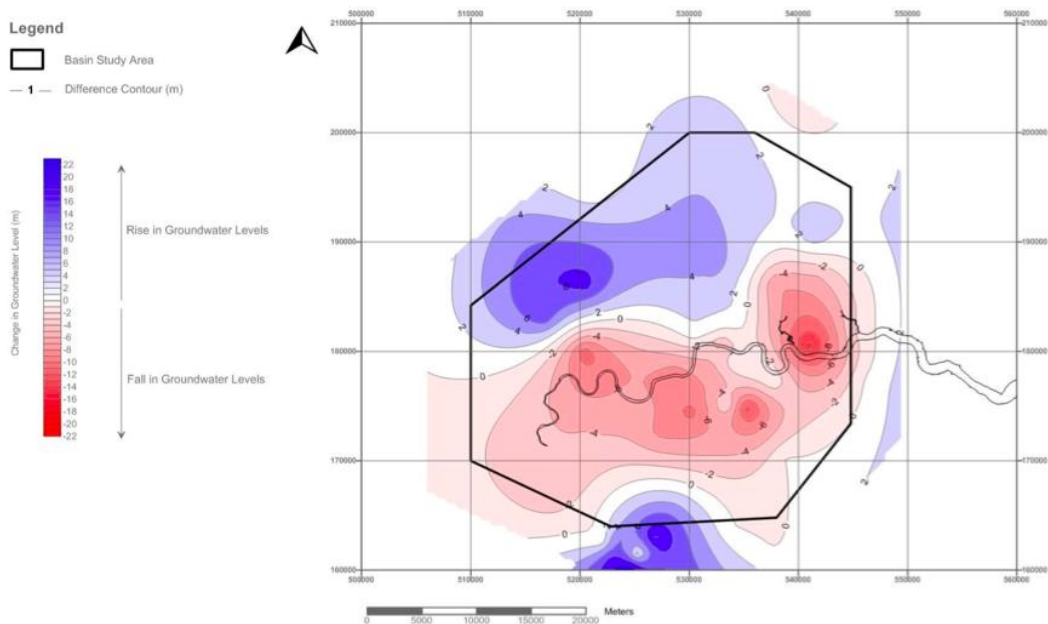


Figura 43 Differenza del livello delle acque sotterranee dal 2000 al 2014

## 3.2 Il caso di Parigi

### 3.2.1 Breve inquadramento geologico e idrogeologico

La storia geologica della città di Parigi ha origine durante l'era Terziaria e termina nel Quaternario. La superficie è stata modellata dai movimenti tettonici e dalle differenti fasi di erosione che hanno portato alla formazione delle differenti unità litologiche che compongono il sottosuolo parigino, dai gessi ai depositi del Quaternario Figura 44.

I due assi principali sono l'anticlinale di Meudon a sud (terreni antichi che risalirono in altezza) e la sinclinale di Saint Denis a nord (sprofondamento di tutti gli orizzonti). Tutti gli strati del terreno hanno una pendenza molto leggera verso nord del 6 ‰. La maggior parte della struttura geologica presenta una serie di colline e conche che non si sovrappongono necessariamente in ragione della presenza di piccole pieghe secondarie. Il risultato è una piattaforma di Calcare di Grossier (Luteziano) a sud e una piattaforma di calcare di Saint Ouen (Bretoniano) a nord avente due collinette (Montmartre e Belleville).

Gli orizzonti hanno uno spessore che aumenta da sud verso nord, dall'anticlinale alla sinclinale.

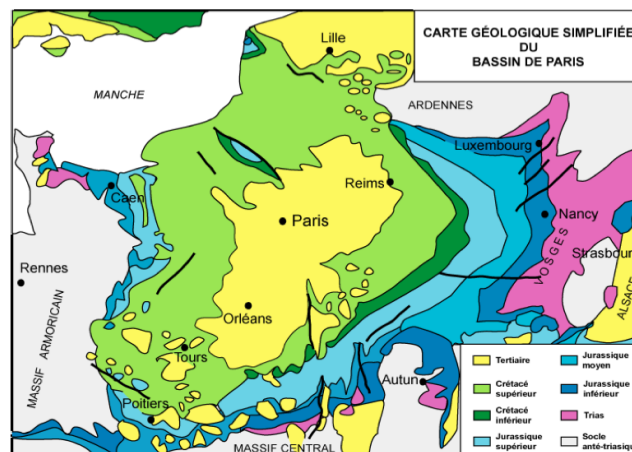


Figura 44 Inquadramento geologico della città di Parigi

La successione geologica che ha portato alla formazione della stratigrafia del bacino di Parigi è illustrata in seguito:

- Cretaceo inferiore: l'apertura del nord Atlantico mette fine alle tensioni crostali derivanti dalla subsidenza del bacino marino intercontinentale che si ritrova ad emergere nella parte settentrionale ed è invece sommerso nella parte meridionale. Al tardo Cretaceo è da attribuire il deposito degli spessi strati di gesso (gesso di Meudon) formato da accumuli calcarei di fitoplancton (coccolitoforidi) intercalati a banchi di selce.
- Paleocene: sotto la pressione dell'orogenesi alpina, tutta la crosta continentale europea aumenta. La zona meridionale del bacino di Parigi emerge, mentre la sua parte orientale si risollewa piegando gli strati sedimentari e rialzando i bordi della conca. Il mare viene spinto a nord-ovest favorendo la formazione del calcare di conchiglie. Con il ritiro del mare viene dato spazio alle lagune che creano dei depositi di marna. Al termine del Paleocene, il mare ricopre i depositi di sabbia e creta, poi si ritira lasciando spazio ai laghi e alla sedimentazione del calcare.



- All'inizio dell'Eocene, periodo di trasgressioni e regressioni marine, da nord-ovest viene invasa ancora una volta la zona centrale del bacino. Ciò comporta il deposito di sabbia, argilla e calcare, tra cui le sabbie di Beauchamps e i calcari di Saint-Ouen.
- Miocene: inizia a costituirsi il sistema idrico della città di Parigi, viene delineato il percorso della Senna che scorreva però su un tracciato diverso da quello attuale.
- Pliocene: durante questo periodo la regione si solleva. La Senna si trova esposta ad una pendenza maggiore che porta ad un'accelerazione dell'erosione degli strati sedimentari sottostanti. Ha così inizio la formazione delle colline della Senna che portano alla luce i gessi del Cretaceo.
- Nelle ultime glaciazioni del Pleistocene il livello del mare si abbassa e a causa dell'erosione esercitata dalla Senna si ha la formazione di depositi alluvionali nell'antico letto del fiume e la formazione di alte terrazze.
- Olocene: segna la fine delle glaciazioni. La portata della Senna risulta essere molto ridotta rispetto a prima e favorisce la formazione di depositi alluvionali aventi granulometria sempre più sottile fino ad ottenere il letto attuale formato da depositi alluvionali moderni.

La natura eterogenea delle formazioni geologiche di Parigi rende molto complessa l'idrogeologia del territorio.

A Parigi solo due formazioni, Argille plastiche e Argilla verde, possono essere considerate impermeabili, mentre le altre formazioni possono essere considerate tutte unità adatte ad ospitare un acquifero. L'acquifero parigino è un acquifero multistrato composto da cinque falde principali: falda Bartonien, Luténien, Ypresien superiore, Ypresien inferiore e Craie, che interseca la falda formata dalle alluvioni recenti Figura 45.

Alcuni livelli di falda delle acque sotterranee hanno proprietà ben distinte anche se localmente i livelli si confondono. Questo esprime tutta la complessità del sistema acquifero multistrato presente nel sottosuolo parigino.

Le unità idrogeologiche che formano gli acquiferi parigini vengono suddivisi in base alla loro permeabilità.

I livelli che costituiscono gli strati dell'acquifero di Parigi apparentemente risultano essere ben isolati anche se localmente si riscontrano delle connessioni. Gli unici acquiferi che possono essere considerati isolati idraulicamente sono quelli inseriti nella sabbia di Fontainebleau e nel Travertino di Brie, tra queste due formazioni infatti, si trova un banco di marne di spessore consistente. Ogni strato reagisce in modo differente ai fenomeni esterni e questo comportamento può essere ricollegato alle proprietà idrogeologiche della falda acquifera. I prelievi intensivi, avvenuti tra la fine dell'Ottocento e la metà del Novecento, hanno portato allo sfruttamento dell'acquifero più superficiale, ovvero quello presente nelle alluvioni antiche. In alcuni casi però queste captazioni

portarono al prosciugamento della falda più superficiale e per sopperire al bisogno di acqua si andarono ad effettuare prelievi dagli acquiferi più profondi. Questo causò che per alcuni anni la Senna, anziché esercitare un'azione drenante sulla falda, fungesse da ricarica.

Formations aquifères	Formations géologiques
Remblais	Aquifères perchés locaux
NAPPE DES ALLUVIONS	Alluvions anciennes
NAPPES DES SABLES DE FONTAINEBLEAU	Sables de Fontainebleau
NAPPE DU TRAVERTIN DE BRIE	Travertin de Brie
NAPPE DU BARTONNIEN (EOCENE SUPERIEUR)	Sables Verts Calcaire de Saint-Ouen Sables de Beauchamp supérieurs
NAPPE DU LUTETIEN	Sables de Beauchamp inférieurs Marnes et Caillasses Calcaire grossier
NAPPE DE L'YPRÉSIEEN SUPÉRIEURE	Sables Supérieurs Sables de Cuise
NAPPE DE L'YPRÉSIEEN INFÉRIEUR	Sables d'Auteuil
NAPPE DE LA CRAIE	Craie Blanche de Meudon

Figura 45 Schematizzazione dell'acquifero multistrato e caratteristiche geologiche

### 3.2.2 Strutture sotterranee che interagiscono con la falda

La maggior parte delle strutture in sotterraneo parigine sono state costruite per ragioni tecniche ed economiche sopra la falda. Le prime strutture che interagiscono con la falda vennero costruite in seguito allo sviluppo dei diaframmi e delle iniezioni di malta cementizia all'inizio del XX secolo, tra queste si ricordano le gallerie delle linee metropolitane e della ferrovia regionale, le fondazioni di alcuni edifici alti e altre strutture che verranno elencate nel seguito.

- Linee metropolitane e rete ferroviaria Regionale Espressa (RER)

Le prime linee della metropolitana di Parigi entrarono in funzione in occasione dell'esposizione universale del 1900 e la rete è in continua evoluzione per permettere di raggiungere i sobborghi periferici della città. La rete metropolitana, ad oggi, è composta da 14 linee che si estendono per 213 Km di cui 197 costruiti in sotterraneo e 37 in falda. Le gallerie della metropolitana hanno un diametro di 5 m e sono situate mediamente a 10 m di profondità.

La linea 14, l'ultima costruita ed inaugurata nel 1998, è costituita da gallerie aventi un diametro di 8,6 m e si trova ad una profondità media di 25 m, questa linea interseca la falda di Luténien.

Le linee ferroviarie Regionali Espresses (RER) possiedono cinque linee che servono la zona di Parigi. Le linee RER su 66 Km di tracciato ne hanno 24 che interferiscono con la falda, i tunnel hanno un diametro di 9 m e raggiungono una profondità massima di 35 m. A Parigi esistono 337 stazioni ferroviarie sotterranee (tenendo conto anche delle stazioni abbandonate) di cui 76 interferiscono con la falda. Certe stazioni hanno un'influenza maggiore sul flusso della falda, per esempio la stazione di Hausmann-Saint-Lazare della RER, che si trova ad una profondità di una trentina di metri e interseca sia la falda di Lutetién che di Ypresien superiore ad una quota di circa 20 m.

Le opere ferroviarie che interferiscono maggiormente con la falda sono localizzate nel centro di Parigi sulla riva destra della Senna all'interno della formazione delle alluvioni antiche.

- Strutture sotterranee

A Parigi gli edifici che hanno strutture sotterranee che interferiscono con la falda iniziano la loro storia nel 1927. Il primo edificio costruito all'interno della falda è la Banca di Francia che scende ad una profondità di 27 m e interseca la falda di Lutétien ad una profondità di circa 10 m, da quel momento le strutture sotterranee immerse in falda si sono moltiplicate.

Il sottosuolo parigino è fortemente urbanizzato, basti pensare che nel 2008 un censimento ha riscontrato la presenza di 20021 strutture sotterranee. Oltre alle strutture menzionate precedentemente si possono aggiungere le fortificazioni antiche, le ex cave di gesso, i gasdotti, gli oleodotti, gli edifici sotterranei ad uso militare (bunker, edifici per la difesa, ...), le fogne e altre infrastrutture.

Delle strutture sotterranee parigine, ad oggi, il 14% della loro superficie è bagnata dall'acqua di falda, nel caso invece in cui la falda dovesse tornare al suo livello naturale, com'era nella carta piezometrica del 1858, sarebbe circa il 28% delle strutture sotterranee ad interagire con la falda.

### **3.2.3 Ruolo della falda a Parigi**

Nel corso del XIX secolo le industrie e la nuova economia basata sulle fabbriche intrapresero un percorso di sfruttamento della falda profonda attraverso emungimenti di grandi volumi di acqua. A causa del sovra sfruttamento della falda il livello delle acque sotterranee si abbassò fino a 15 m al di sotto del livello della Senna.

A partire dal 1970 numerosi pompaggi vennero abbandonati e il livello della falda iniziò a risalire, ma fu solo nel 1975 che gli effetti della risalita della falda manifestarono il loro effetto sulle grandi opere come il complesso d'Opéra, gli Halles, e la stazione ferroviaria Gare du Nord. I primi incidenti causati dall'innalzamento della falda furono le inondazioni dei parcheggi sotterranei sull'ex viale Coq 9ème, i cedimenti e la perdita di portanza da parte delle fondazioni, e si presentarono i primi segnali della dissoluzione dei gessi.

### **3.2.4 Provvedimenti istituzionali**

Durante gli anni Sessanta ci furono degli studi legati al rischio dello scioglimento del gesso che costituisce il sottosuolo della città di Parigi, che fu definita zona a rischio a partire dai dati statistici e dai sondaggi utilizzati nell'ambito di queste ricerche. Nel 1977 venne emanato un decreto prefettizio con l'intento di regolamentare e sottomettere all'opinione delle istituzioni tutti i permessi di costruire della zona. Nell'ambito di suddetto decreto venne istituito l'Inspection Générale des Carrieres (IGC) con l'obiettivo di assoggettare all'opinione dell' IGC tutti i permessi di costruire delle zone considerate a rischio, l'IGC, potrà prescrivere o raccomandare la realizzazione di sondaggi e il trattamento dei vuoti individuati perché sarà necessario tenerne conto durante le fasi di costruzione. Dalla fine degli anni 80 un grande numero di studi e sondaggi

sono stati realizzati per l'IGC portando ad una conoscenza più approfondita del fenomeno di dissoluzione del gesso. Nel 1999, questi studi e l'apparizione di un certo numero di incidenti al di fuori della zona definita a rischio nel 1977 hanno portato l'IGC ad apportare un'estensione e ogni qualvolta l'IGC rinviene una nuova zona a rischio informa le istituzioni che aggiornano il Piano Locale dell'Urbanistica (PLU).

Le ricerche condotte sul territorio confermano che la variazione del livello della falda è un elemento essenziale nello studio della dissoluzione del gesso. A partire dagli anni Ottanta la città di Parigi ha avuto a che fare con incidenti di entità maggiore rispetto agli allagamenti e l'IGC ha previsto l'installazione di 330 piezometri disseminati sul territorio per monitorare il livello della falda e prevenire eventuali fenomeni di dissoluzione del gesso.

Nell'ultimo decennio si è giunti ad una nuova concezione di utilizzo della falda acquifera a Parigi, si sta pensando di permettere l'infiltrazione di acqua piovana e lo sviluppo di pompaggi ad uso geotermico. Nell'interesse dello sviluppo sostenibile si sta valutando la possibilità di permettere lo scarico delle acque piovane direttamente nel sottosuolo attraverso l'infiltrazione. L'infiltrazione potrà essere effettuata in due modi: per spargimento (infiltrazione su una vasta area) o per punti filtranti o per mezzo di pozzetti (infiltrazione puntuale). L'infiltrazione di acqua piovana può avere importanti conseguenze per il sottosuolo, infatti non è possibile reimmettere acqua piovana sopra gli orizzonti di gesso senza causarne la dissoluzione, con conseguente sviluppo di incidenti a breve e a lungo termine. Tuttavia le infiltrazioni d'acqua non regolamentate e il rischio di scioglimento del gesso vengono generalmente ignorate. L'IGC ha studiato e stabilito delle aree in cui è possibile far filtrare le acque piovane direttamente nel sottosuolo o attraverso il metodo a diffusione o attraverso il metodo puntuale. Per la stesura di questa mappa non solo si è preso in considerazione il rischio legato allo scioglimento del gesso, ma anche i rischi legati alla presenza di terrapieni o di vecchie cave sotterranee di calcare.

### **3.3 Strutture danneggiate dall'innalzamento delle acque sotterranee**

I danni che può subire una struttura sotterranea durante la sua vita di esercizio a causa della presenza dell'acqua possono essere classificati in tre tipologie principali:

- Tipologia A (effetti esterni): non interessano la struttura stessa ma si rilevano danni nell'area circostante;
- Tipologia B (effetti strutturali): interessano l'adeguatezza strutturale della struttura;
- Tipologia C (effetti funzionali): interessano l'adeguatezza funzionale della struttura.

(Report on the damaging effects of water on tunnels during their working life, 1991)

La maggior parte dei casi rilevati rientrano a far parte della tipologia B e C.

#### **3.3.1 Parigi**

Il terreno che costituisce la regione parigina, a causa della sua natura, venne usato come materiale da costruzione a partire dall'epoca gallo romana, e lo sviluppo delle cave per l'estrazione del calcare si moltiplicarono nel corso dei secoli.

I rischi connessi al sottosuolo parigino sono quindi connessi a due fattori differenti:

- Naturale: stabilità dei versanti aventi formazioni con pendenze eterogenee, carsismo del gesso o degli orizzonti che gli giacciono sopra;
- Antropica: cave a cielo aperto e sotterranee.
- Danni provocati dall'innalzamento della falda su strutture ed edifici

Come già detto precedentemente, l'equilibrio falda parigina è stato fortemente perturbato a causa dell'urbanizzazione intensa della città.

Queste perturbazioni hanno portato ai risultati seguenti:

1. Una forte impermeabilizzazione del suolo che diminuisce le zone di ricarica della falda;
2. I prelievi d'acqua sono difficilmente quantificabili e importanti per la formazione dell'acquifero, questi modificano localmente il flusso della falda e favoriscono un'alimentazione da parte della Senna;
3. Le infrastrutture sotterranee di grande ampiezza che agiscono con effetto barriera. La circolazione della falda è fortemente perturbata.

Tutte queste perturbazioni, che modificano i livelli piezometrici e il regime di circolazione sotterranea della falda, hanno avuto delle ripercussioni importanti sugli edifici. Queste si possono tradurre in una diminuzione della portata del terreno, una modifica delle caratteristiche geotecniche delle fondazioni degli edifici e inondazioni.

- Dissoluzione del gesso Ante Luteziano

Negli orizzonti di gesso, le modifiche del livello piezometrico, l'inversione del senso di circolazione e un aumento della temperatura possono causare una dissoluzione del gesso. Questo può causare la formazione di una cavità che può condurre ad un cedimento lento o, nelle peggiori delle ipotesi, ad un affondamento brutale. A Parigi il gesso è presente nelle formazioni Luteziane (forma anidra) ed Ante Luteziane.

La dissoluzione del gesso Ante Luteziano è nota fin dai tempi antichi, ma ci sono degli eventi recenti che possono essere osservati dall'occhio umano. Le formazioni di gesso Ante Luteziano interessate dai fenomeni di dissoluzione sono:

1. Le marne e le Caillasses dove il gesso si trova sotto forma di banchi;
2. Le sabbie di Beauchamp all'interno delle quali troviamo il gesso sotto forma di lenti;
3. I calcari di Saint-Ouen all'interno del quale il gesso si trova sotto forma di lenti.

La dissoluzione del gesso provoca la liberazione di ioni di calcio e di solfati. Le modifiche artificiali del regime idrogeologico della falda favorisce l'accelerazione della dissoluzione del gesso Ante Luteziano e deteriora la stabilità del terreno. E' stato stimato che nel 1972 a causa dei prelievi ingenti di acqua nella falda si sono sciolti circa 17000 m<sup>3</sup> di gesso.

- Riduzione della capacità portante delle fondazioni

Questa minaccia nasce dall'avvicinamento del livello della superficie piezometrica a quello piezometrico, nel caso estremo il livello di falda raggiunge il livello della sede e la fondazione, in questo caso, perde quasi metà della sua capacità portante. Nel caso in cui il terreno in cui si trova la fondazione è di tipo argilloso, a causa dell'aumento del contenuto d'acqua si ha una perdita di caratteristiche meccaniche molto rapida e la perdita di capacità portante può essere quasi completa. Tutti i tipi di fondazione sono interessati: pali, plinti, solette. Questa influenza inizia non appena il livello piezometrico si trova ad una distanza inferiore a due volte la larghezza del plinto o una volta quella della soletta. Per quanto riguarda i pali il fenomeno è più complesso perché dipende dalla distanza e dal modo in cui sono installati e dal modo in cui interagiscono col terreno. Infine è opportuno ricordare che a causa dell'aumento del contenuto d'acqua nei terreni argillosi si possono sviluppare, sotto le fondazioni, pressioni e gonfiore le cui conseguenze sono sollevamenti differenziali molto delicati da trattare. Se il livello della falda supera il livello del primo piano o della soletta dell'edificio, la riduzione di capacità portante della fondazione è accompagnata da sottopressioni che tendono a sollevare l'edificio e che portano a stati di sforzo significativi nelle strutture sotterranee.

- Liquefazione del terreno di fondazione

Le fondazioni delle macchine vibranti sono soggette a vibrazioni significative e sono molto sensibili alle risalite della falda: se il terreno è saturo nell'area di propagazione delle vibrazioni, si creano delle pressioni interstiziali che possono assumere anche valori maggiori della pressione del terreno stesso. La risalita della falda in un terreno gessoso attiva i fenomeni di dissoluzione che possono portare rapidamente alla formazione di cavità libere o diffuse al di sotto delle fondazioni. Il rischio di rottura (subsidenza) diventa molto critica, contemporaneamente le acque che hanno filtrato attraverso questi livelli diventano ricche in solfati trasformandosi in acque aggressive per i calcestruzzi ordinari. Questi attacchi sono difficili da evitare per le opere già esistenti e soprattutto per i pali che sono il tipo di fondazione che più risente di questo tipo di attacco.

- Attacchi solfatici

Le analisi chimiche, realizzate sulle acque della falda di Parigi, indicano un alto tenore di solfati  $H_2S$  altamente dannosi per i calcestruzzi ordinari, si è riscontrata una concentrazione tra i 10 e i 1650 mg/L e eccezionalmente arriva a valori di 2000 mg/L. Dato l'alto tenore di solfati presenti nelle acque della falda si possono verificare dei fenomeni dannosi nei confronti del calcestruzzo. La durata del calcestruzzo è infatti strettamente legata a fattori esterni come la temperatura, la composizione chimica e il pH. Fino alla fine degli anni Settanta i cementi utilizzati erano ricchi di alluminato di calcio che reagendo con le acque della falda di Parigi, ricche di solfati, formano l'ettringite secondaria. Quando l'ettringite viene prodotta in grande quantità porta ad un gonfiore del calcestruzzo e alla sua fessurazione con perdita di portata e alterazione della superficie. Se ad un'infrastruttura interessata da questo tipo di danno non viene applicato nessun trattamento di

cura, il calcestruzzo può perdere completamente le sue caratteristiche meccaniche e rilasciare idrogeno solfato  $H_2S$ . Questo non è un fenomeno isolato e la maggior parte parcheggi sotterranei parigini costruiti prima del 1980 sono affetti da questo problema.

#### Il caso della stazione Gare du Nord di Parigi

Lo scioglimento del gesso è fortemente influenzato dai prelievi d'acqua, questi favoriscono l'abbassamento della falda, diminuiscono il livello piezometrico e modificando la portata aumentano localmente la velocità di flusso. Nel 1975, dopo un secolo di pompaggi per alimentare le locomotive a vapore, alla Gare du Nord venne scoperto un inghiottitoio con un diametro di 23 m, altezza di 40 m a otto metri di profondità dai binari ferroviari. La dissoluzione del gesso Ante Luteziano che componeva il sottosuolo della stazione ferroviaria ha avuto inizio al livello delle marne e della ghiaia che hanno causato il crollo delle sabbie di Beauchamps e del calcare di Saint-Ouen. L'inghiottitoio, dopo essere stato scoperto, è stato riempito con 7300 m<sup>3</sup> di calcestruzzo e malta Figura 46.



Figura 46 Inghiottitoio rilevato sotto i binari della Gare du Nord a Parigi

#### L'edificio di rue du Papillon

Nel 1990 durante gli scavi della galleria della linea E della RER (progetto Eole), le vibrazioni a cui è stato sottoposto il terreno durante le operazioni di scavo della TBM provocarono la risalita di un inghiottitoio sul quale giacevano delle abitazioni. La formazione dell'inghiottitoio è imputabile agli

ingenti prelievi d'acqua , proprio i prelievi avrebbero causato lo scioglimento del gesso Ante Luteziano su cui giaceva l'edificio. L'edificio ha riportato ingenti danni strutturali Figura 47 e l'apertura dell'inghiottito è avvenuta nonostante fossero state effettuate indagini approfondite sul territorio.



Figura 47 Danni all'edificio Rue du Papillon a seguito dell'apertura di una dolina

### Grand Palais

Il Grand Palais, edificio costruito per l'Esposizione Universale del 1900, tra il 2001 e il 2007 venne chiuso per permettere dei lavori di consolidamento sulle fondazioni. Le cause che hanno portato ad eseguire questi lavori sono principalmente due:

- L'area su cui sorge il Grand Palais non favorisce la costruzioni di fondazioni in pietra perché il terreno è molto eterogeneo (alluvioni antiche, alluvioni moderne, terrapieni) e presenta caratteristiche geotecniche scadenti;
- Il livello dell'acquifero alluvionale che si trova al di sotto del Grand Palais nell'ultimo secolo ha subito notevoli variazioni a causa del sovra sfruttamento dell'acquifero. Sono presenti anche inondazioni causate dalla Senna. Entrambi i fattori hanno influito sull'esposizione all'aria delle teste dei pali di sostegno realizzati in legno, ciò ha causato un decadimento degli elementi di sostegno con conseguente destabilizzazione dell'edificio. E' probabile che, come il Grand Palais, anche altri edifici parigini costruiti su pali di legno siano sottoposti allo stesso tipo di decadimento.

–

### **3.3.2 Londra**

#### Galleria Northern Lines



Nella città di Londra l'unico caso riportato in letteratura di struttura danneggiata dalle acque sotterranee è il caso della galleria della linea metropolitana della Northern Line nel tratto tra le stazioni di Old Street e di Moorgate. Questo tratto di galleria è stato costruito tra il 1899 e il 1901 ed è stato ampliato tra il 1922 e il 1924. Il tunnel è ubicato tra l'alveo del fiume Woolwich e quello del fiume Reading, caratterizzati da argilla e sabbie, la falda si trova sospesa negli strati di sabbia superiori sia dell'alveo del Woolwich che del Reading e immerge la metà superiore della galleria, a livello strutturale questo tunnel è costituito da una struttura di anelli in ghisa con giunti bullonati. A causa della variazione del livello di falda la galleria è stata sottoposta a infiltrazioni e attacchi solfatici, questi ultimi sono il risultato della reazione chimica indotta dal contatto tra le acque sotterranee, l'ossigeno e i solfati presenti nello strato di sabbia che circonda il tunnel. I danni riscontrati sono stati la corrosione del rivestimento, occasionalmente si è verificata una penetrazione completa della copertura, la deformazione del rivestimento con formazione di vuoti nella volta della galleria guidata dalla reazione chimica che forma l'acido solforico, portando a una redistribuzione delle pressioni nel sottosuolo.

In seguito al danneggiamento ad opera dell'innalzamento del livello di falda questo tratto di galleria è stato "curato". Nel breve periodo sono stati attuati quei provvedimenti che hanno permesso di ristabilire la sicurezza strutturale dell'opera quasi nell'immediato come l'isolamento dei giunti presenti tra i segmenti che compongono il tunnel, il montaggio di rondelle che aumentano la tenuta dei bulloni che serrano i giunti, il rafforzamento dei singoli elementi attraverso l'aggiunta di materiale bullonato, il riempimento dei vuoti presenti nella volta con malta resistente agli acidi. Nel lungo periodo invece è stata progettata la completa sostituzione degli elementi molto danneggiati mentre si sono riabilitati gli elementi poco danneggiati attraverso una stuccatura chimica.

## **4 Breve descrizione della rete di trasporto sotterraneo a Milano**

### **4.1 Le linee metropolitane**

La storia della metropolitana milanese, a differenza di altre grandi città europee, è una storia recente e per questo è tutt'oggi in continua evoluzione. E' solo l'1 novembre 1964, infatti, che venne inaugurato il primo tratto della linea metropolitana milanese, la M1 che collega Sesto Marelli a Lotto. Di seguito verrà data una breve descrizione sulla storia e sulle caratteristiche delle linee metropolitane milanesi.

In Figura 48 uno schema delle linee metropolitane milanesi.

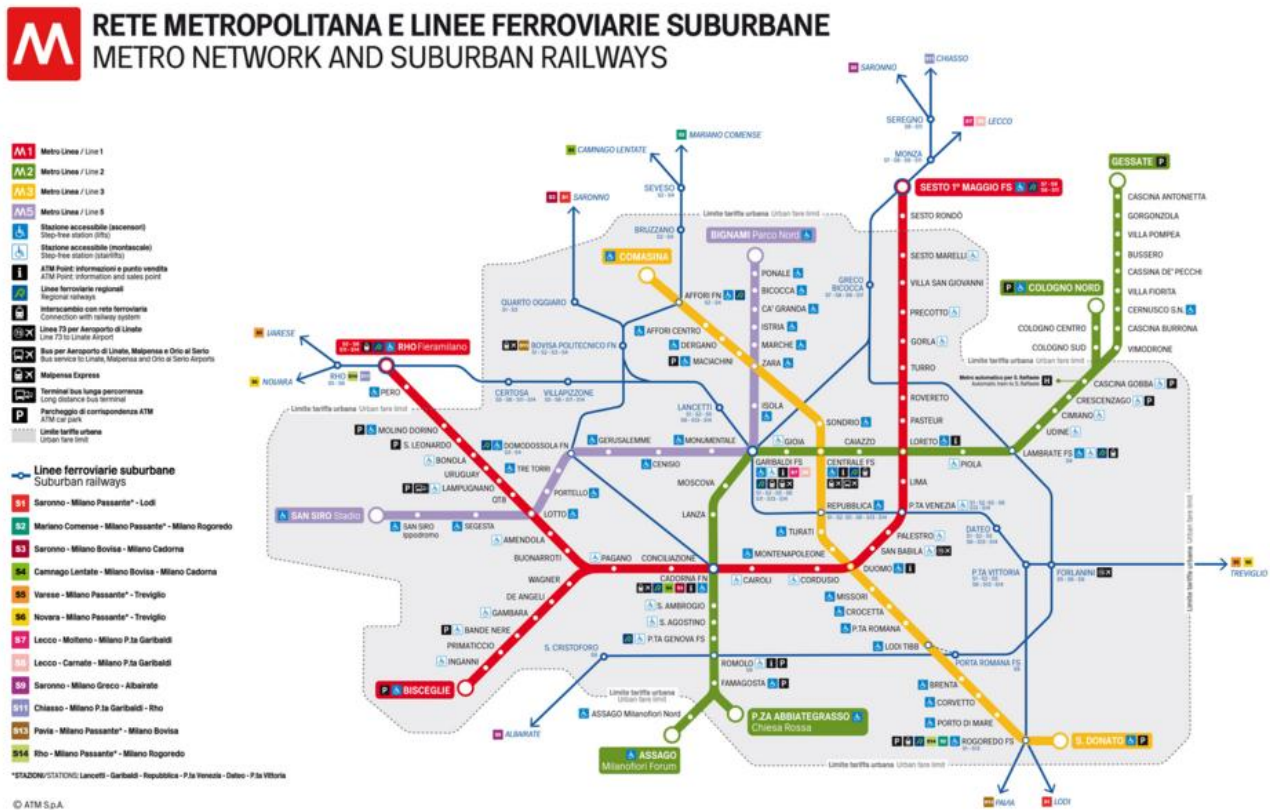


Figura 48 Schema della rete metropolitana milanese

#### 4.1.1 La linea Rossa (M1)

La M1, come già detto, è la prima delle linee che negli anni andrà a costituire la metropolitana milanese, inaugurata nel novembre del 1964 collegava Sesto Marelli a Lotto con un percorso di 11,8 km e un totale di 21 fermate. In seguito agli ampliamenti che si sono susseguiti dagli anni 60' fino al 2005 si ottiene il tracciato attuale della M1 che con un totale di 27 km e 38 stazioni collega la città da Nord-Est, capolinea Sesto FS, a Ovest diramandosi a partire dalla stazione di Pagano in due differenti direzioni, il ramo Nord-Ovest con capolinea Rho-Fiera Milano e il ramo Sud-Ovest che termina il suo tracciato nella stazione di Bisceglie. Le stazioni di interscambio presenti sulla M1 sono Loreto e Cadorna FN, stazioni di interscambio con la linea M2, Duomo, stazione di interscambio con la M3, Porta Venezia, stazione di interscambio col Passante ferroviario.

Dal punto di vista geometrico la galleria ha diametro costante di 6,25 m e l'intera linea ha un profilo altimetrico che si trova al di sopra del livello di falda.

E' in costruzione un ampliamento della linea in direzione Nord che con l'aggiunta di 2 stazioni e 1,9 km di percorso collegherà Sesto FS a Cinisello Balsamo, è invece ancora in fase di progettazione un

prolungamento del ramo in direzione Sud-Ovest che con l'aggiunta di 3 fermate e 3 km di percorso collegherebbe Bisceglie con Baggio.

#### **4.1.2 La linea Verde (M2)**

La M2 venne inaugurata nel 1969 nel tratto che collegava Caiazzo e Cascina Gobba, già l'anno successivo venne aperto il tratto che ampliava la linea fino a Centrale FS.

La M2 col suo percorso di 40,4 km e le sue 35 stazioni di cui 16 fuori terra, attraversa la città da Nord-Est a Sud-Ovest collegando i comuni della periferia a Est di Milano, Gessate, Vimodrone, Cologno Monzese ecc..., con la periferia Sud-Ovest in ambito urbano, Abbiategrasso, extraurbano Assago.

Nel 1985 terminano i lavori di ampliamento in direzione Nord con l'inaugurazione della tratta Cascina Gobba-Cologno Nord, nel 2005 finiscono i lavori di ampliamento in ambito urbano con l'inaugurazione della tratta Famagosta-Abbiategrasso, mentre bisognerà aspettare il 2011 per avere l'ultimo ampliamento in direzione Sud con l'inaugurazione della tratta Famagosta-Assago Milanofiori Forum.

La Verde è la linea che collega le stazioni ferroviarie del territorio milanese caratterizzate dal maggior flusso di persone giornaliero, incrociando da Nord a Sud, Lambrate FS, Centrale FS, P.ta Garibaldi FS, Cadorna FNM, P.ta Genova FS. Le stazioni di interscambio con le altre linee che costituiscono la rete metropolitana milanese sono Loreto e Cadorna FNM con la M1, Centrale FS con la M3, Garibaldi FS con la M5 e il passante ferroviario.

A differenza della M1 il tracciato altimetrico della M2, inizialmente progettato fuori falda, ha subito un processo di sommersamento a causa dell'innalzamento del livello di falda dell'ultimo ventennio, per contrastare i fenomeni di infiltrazione nelle gallerie sono in azione pompe idrovore e si sta procedendo a lavori di impermeabilizzazione per abbassare il livello della falda in prossimità della galleria.

E' in progetto un ampliamento di 9,7 km in direzione Nord che con l'aggiunta di 5 stazioni collegherebbe Cologno Nord a Vimercate.

#### **4.1.3 La linea Gialla (M3)**

La M3 venne inaugurata nel 1990 con una tratta che collegava Centrale FS al Duomo, a seguito dei lavori di ampliamento della linea si arriva al percorso attuale nel 2011 con l'inaugurazione della tratta che collega Maciachini a Comasina. Il percorso della M3 che con le sue 21 stazioni e i suoi 16,6 km di percorso collega la città di Milano da Nord, Comasina, a Sud, San Donato. Le stazioni di interscambio con le stazioni ferroviarie del Passante e della rete ferroviaria FS e FNM sono da Nord a Sud: Affori FNM con la ferrovia FNM, Zara, stazione di interscambio con la M5, Centrale FS, stazione di interscambio sia con le linee ferroviarie che con la linea M2, Repubblica, stazione di interscambio col Passante, Duomo, stazione di interscambio con la M1, Rogoredo FS, stazione di interscambio con la ferrovia.

E' in progetto un prolungamento verso Sud-Est che collegherebbe con 14,8 km di linea e 6 stazioni San Donato con Paullo Est.

Il tracciato altimetrico della M3 è completamente sommerso nella falda ad eccezione della stazione di interscambio con la M2 a Centrale FS dove la canna della M3 si trova al di sopra del livello piezometrico. A differenza della M2, la M3, essendo di recente costruzione è stata progettata già in falda e la presenza di opere di impermeabilizzazione ha permesso una minore manutenzione rispetto alla M2 nel corso del suo funzionamento.

#### **4.1.4 La linea Lilla(M5)**

La M5 è la più recente delle linee metropolitane milanesi, la prima tratta venne inaugurata nel febbraio 2013 e con 7 stazioni collegava Bignami a Zara, in seguito ai prolungamenti avvenuti dal 2013 all'aprile 2015 la linea assume il suo tracciato attuale, attraversa la città da Nord, Bignami, a Nord-Ovest, San Siro Stadio con i suoi 12,9 km e le sue 19 stazioni con una limitazione nel numero di stazioni aperte lungo la tratta, è solo il 14 novembre scorso infatti che viene inaugurata l'ultima stazione della tratta, Tre Torri.

Le stazioni di interscambio presenti sulla M5 sono da Nord a Sud, Zara con la M3, P.ta Garibaldi con la M2 e la ferrovia, Domodossola FNM con la ferrovia e Lotto con la M1.

Per questa linea sono in progetto due tratte nelle due diverse direzioni degli attuali capolinea, il primo con 6,3 km di percorso e 5 stazioni collegherebbe Bignami a Monza, il secondo con 4,5 km di percorso e 4 stazioni collegherebbe San Siro stadio con Settimo milanese.

A causa della recente costruzione della linea metropolitana non è stato possibile entrare in possesso degli elaborati tecnici della stessa, nel seguente progetto di tesi la presenza della linea M5 non viene considerata, per una questione di completezza si è pensato di inserirla nella descrizione della rete metropolitana completa della città di Milano.

#### **4.1.5 La linea Blu (M4)**

A completare il quadro della rete metropolitana milanese c'è la linea M4, in costruzione dal 2012 e non ancora ultimata, collegherà con i suoi 15 km di percorso che si snoderà attraverso 21 stazioni San Cristoforo a Linate, nascerà così il primo collegamento su ferro tra la città di Milano e l'aeroporto di Linate. Il percorso attraverserà la città da Ovest ad Est attraversando i quartieri ad alta densità abitativa della città e grazie anche alle stazioni di interscambio con le altre linee della rete metropolitana e la rete ferroviaria andrà a migliorare complessivamente la rete di trasporto pubblico sia urbano che suburbano. Le stazioni di interscambio saranno San Cristoforo e Forlanini con la rete ferroviaria, S. Ambrogio con la M2, San Babila con la M3 e Dateo col Passante ferroviario.

Della M4, così come per la M5, non è stato possibile entrare in possesso degli elaborati tecnici e per questo motivo la descrizione della linea è stata inserita per completezza e non perché rientrerà nell'ambito della modellazione.

#### **4.1.6 Il Passante ferroviario**

Il Passante costituisce l'asse portante del servizio ferroviario suburbano milanese, i treni che lo percorrono servono l'area metropolitana intorno alla città e creano il collegamento tra le principali direttrici regionali. L'idea del Passante nasce negli anni Sessanta sul modello della RER francese e della S-Bahn tedesca, ma è solo nel 1983 che l'idea si concretizza con la stipula della Convenzione Generale tra Comune di Milano, Regione Lombardia, Ferrovie dello Stato e Ferrovie Nord Milano. La prima tratta inaugurata risale al 1997 con l'inaugurazione della tratta che collega Bovisa FNM a P.ta Venezia, ma è solo nel 2008, con l'inaugurazione del ramo Rogoredo, che il Passante entra in esercizio completamente.

Il Passante collega coi suoi 18 km, di cui la metà sotterranei, e le sue 10 stazioni, 6 sotterranee e 4 di superficie, per mezzo di una linea ferroviaria Nord-Ovest, Bovisa FNM e Villapizzone, con Sud-Est, Rogoredo Fs.

Le stazioni di interscambio con la rete metropolitana sono P.ta Garibaldi, stazione di interscambio con la M2 e la M5, Repubblica, stazione di interscambio con la M3, P.ta Venezia, stazione di interscambio con la M1, Dateo, futura stazione di interscambio con la M4.

Dai tracciati altimetrici del Passante si evince che il suo percorso si sviluppa interamente sommerso nella falda e per questo si andrà ad analizzare la sua influenza sul livello di falda stesso.

## **5 Ricostruzione della stratigrafia e della piezometria**

Prima di procedere alla realizzazione del modello tridimensionale è stato necessario svolgere uno studio preliminare sulla stratigrafia del terreno, sulla sua composizione di cui si parlerà in modo approfondito nel Capitolo 6, e sul livello della falda per il 2014, l'anno più recente di cui è stato possibile avere a disposizione i dati completi di un anno dei pozzi piezometrici.

## 5.1 Ricostruzione della stratigrafia

Al fine di ricostruire correttamente la stratigrafia delle differenti litologie presenti nel sottosuolo milanese sono state utilizzate le sezioni geologiche fornite da Regione Lombardia, in particolare sono state utilizzate le sezioni 3, 4, 5 con direzione Est-Ovest e le sezioni B, C, D, E, F con direzione Nord-Sud, una copia di tali sezioni è riportata nell'Appendice A4.

Interpolando le informazioni fornite dalle sezioni geologiche e i dati forniti dai sondaggi in sito (regione lombardia carg e prove in sito nostre Appendice A1) attraverso l'utilizzo del software Surfer 9 è stato possibile ricostruire la superficie costituita dalle isoipse per quanto riguarda il profilo altimetrico del piano campagna, la superficie costituita dalle isopieze della base dell'acquifero A e dell'acquifero tradizionale (A+B) e lo spessore dell'acquitard.

Il risultato ottenuto è quello delle superfici riportate nelle figure .Figura 49, Figura 51, Figura 50 e Figura 52, per quanto riguarda lo strato impermeabile di separazione tra l'acquifero A e l'acquifero B bisogna precisare che non sempre esso è presente e che nella Figura 51 in azzurro viene indicato uno strato continuo, in rosso strato discontinuo ed in bianco la sua assenza.

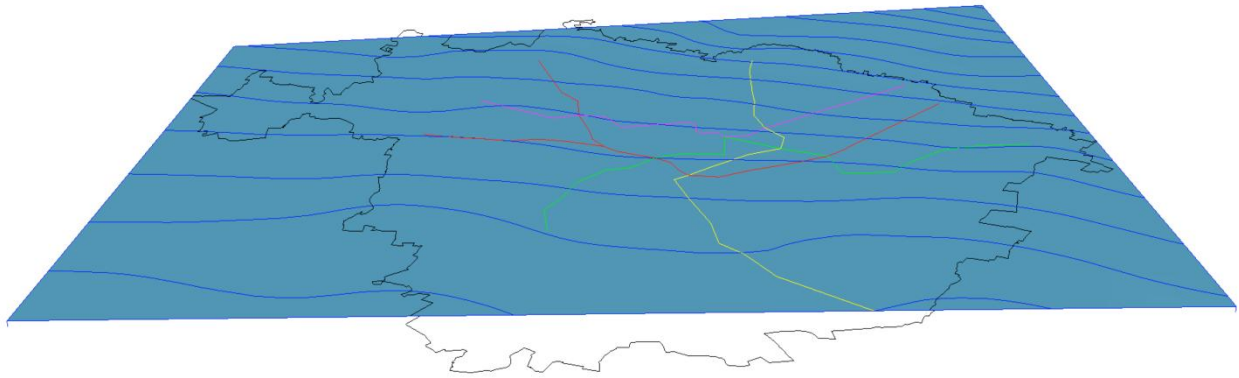


Figura 49 Carta delle isoipse (Piano Campagna)

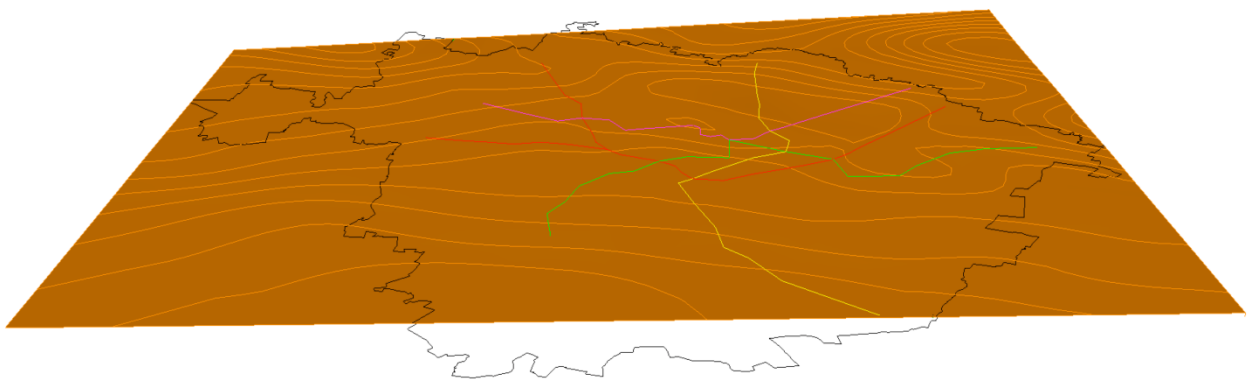


Figura 50 Carta delle isopieze (base Acquifero A)

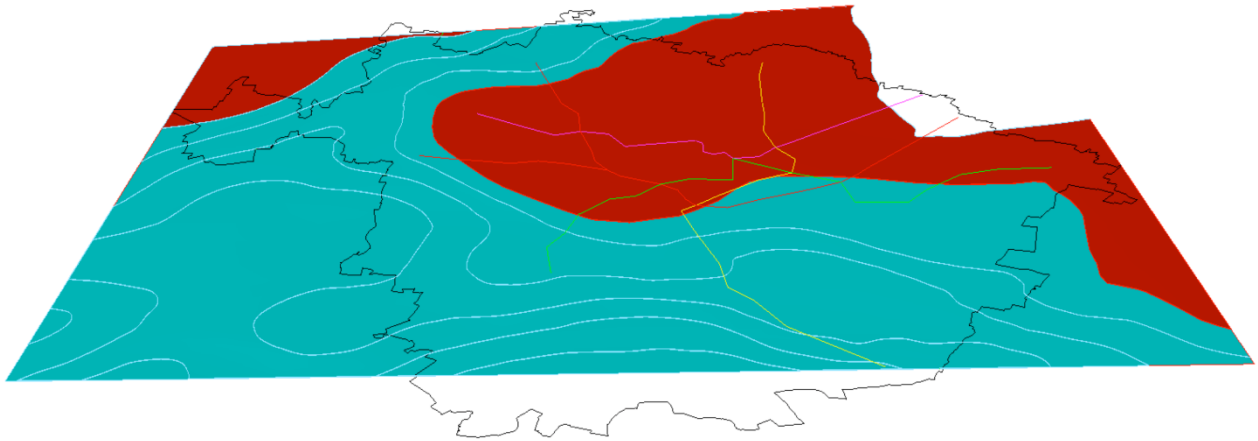


Figura 51 Carta dello spessore dell'aquitard, in azzurro acquitard, in rosso acquitard discontinuo)

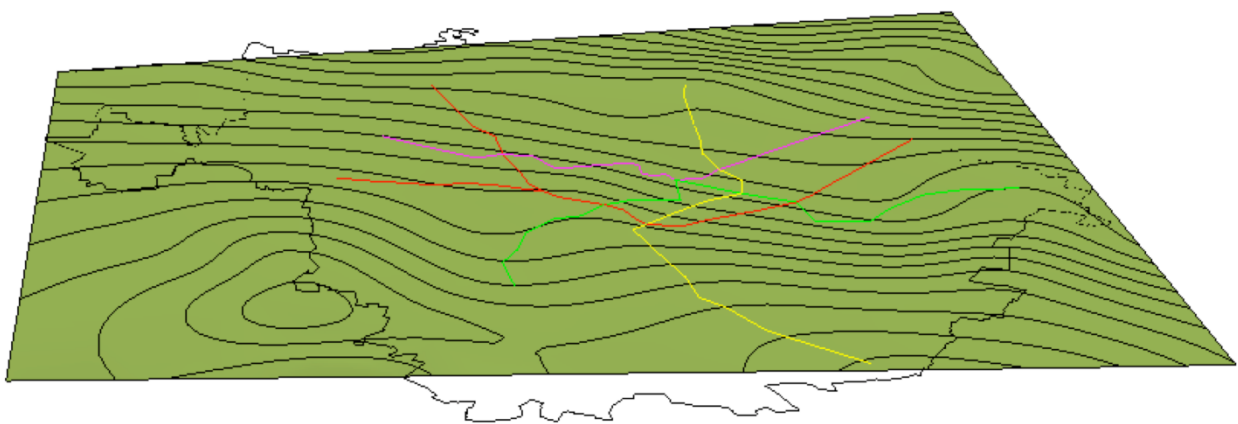


Figura 52 Carta delle isopieze (Base acquifero tradizionale)

## 5.2 Ricostruzione del livello di falda per l'anno 2014

Dopo aver ricostruito le superfici che costituiscono le differenti stratificazioni del sottosuolo milanese si è proceduto nella ricostruzione della superficie piezometrica per l'anno 2014. Si è deciso di effettuare le analisi, e di conseguenza la ricostruzione della piezometria, sul 2014 perché questo anno risulta essere il più recente per il quale è possibile avere la serie completa dei dati forniti dai pozzi piezometrici dislocati sul territorio milanese e per quelli dell'hinterland.

I dati utilizzati per la ricostruzione della falda sono riportati nell'Appendice A6 .

Dopo aver estrapolato i dati relativi ai mesi di marzo e di settembre dal sito della provincia di Milano all'indirizzo <http://ambiente.provincia.milano.it/sia>, essi sono stati inseriti nel software Surfer per poter ricreare la carta della piezometria e della soggiacenza. Uno schema della dislocazione dei pozzi si trova in Figura 53.



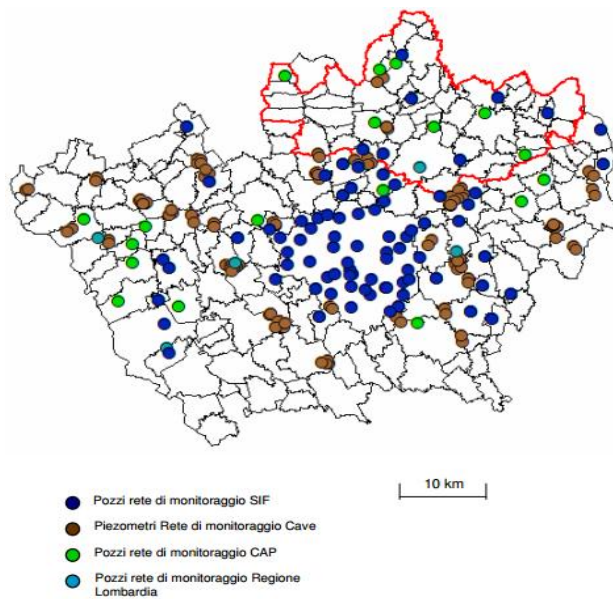


Figura 53 Dislocazione dei piezometri in provincia di Milano

Nella scelta dei dati da utilizzare per una corretta ricostruzione della carta della piezometria e della soggiacenza è stato necessario capire se il dato relativo al livello di falda fosse relativo all'acquifero A o fosse captato nell'acquifero più profondo. In questa operazione sono stata aiutata dall'Ing. Colombo.

Dall'interpolazione con Surfer dei dati relativi al primo acquifero è stato possibile ottenere la carta della piezometria e della soggiacenza. In questo modo è stato possibile ottenere la superficie piezometrica relativa al mese di marzo che sarà quella di riferimento utilizzata nel modello tridimensionale.

Le carte di piezometria e soggiacenza sono riportate in Figura 54, Figura 55.

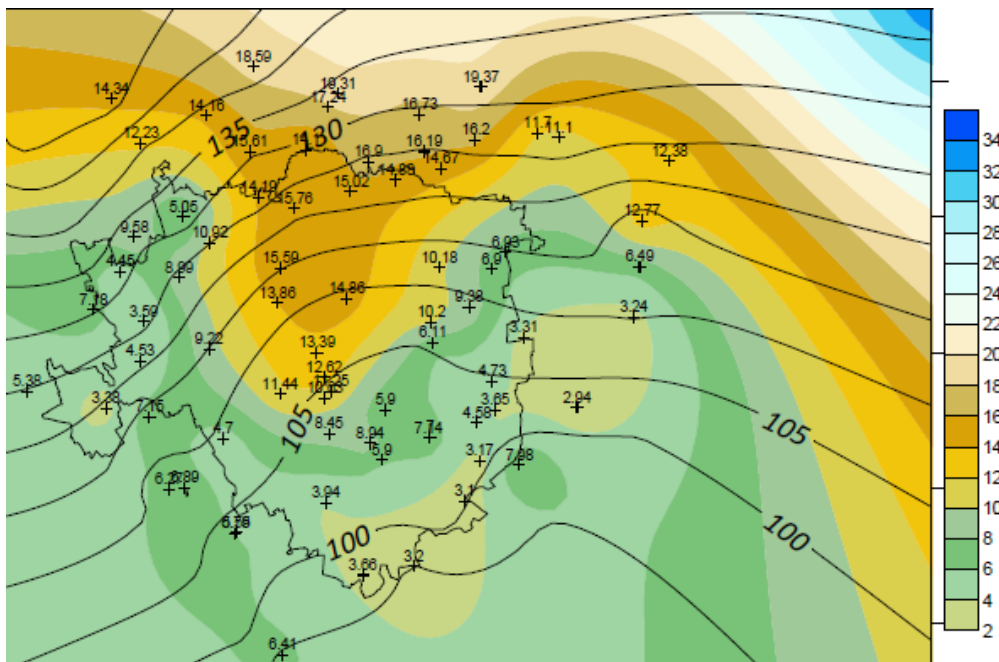


Figura 54 Carta di piezometria e soggiacenza marzo 2014

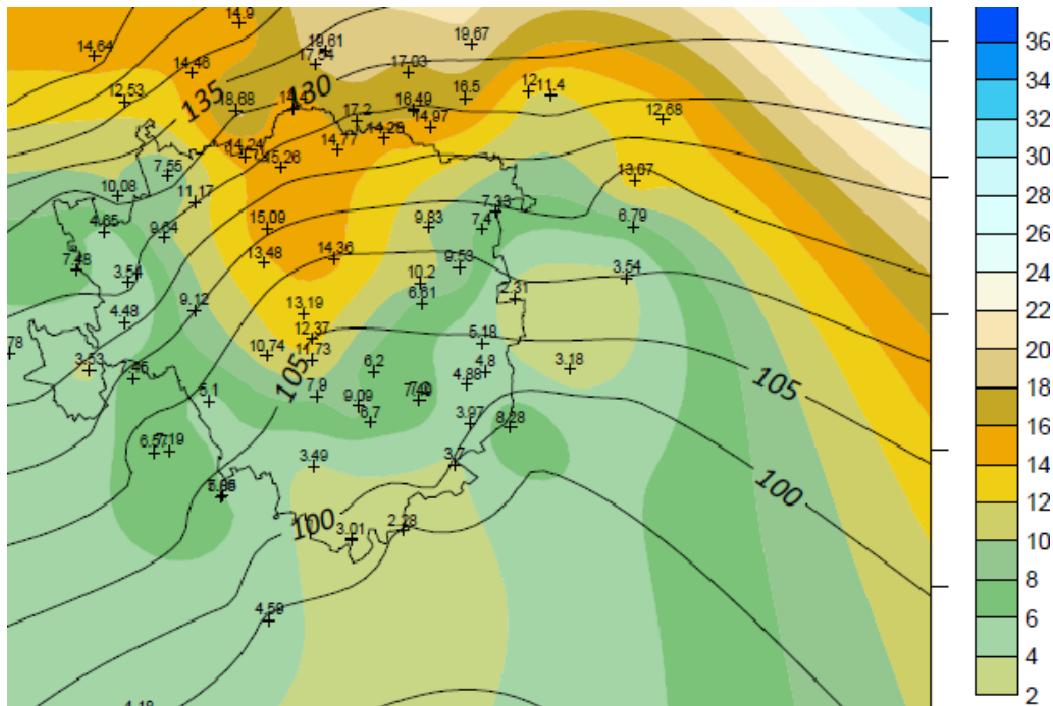


Figura 55 Carta di piezometria e soggiacenza settembre 2014

Terminata la ricostruzione delle superfici in cui sono suddivisi gli strati del modello è possibile definire a livello geometrico il modello tridimensionale che verrà utilizzato per le analisi nel capitolo 8.

## 6.1 materiali

Dopo aver determinato la suddivisione stratigrafica del terreno e dopo aver ricostruito la superficie piezometrica per il territorio milanese è necessario svolgere delle indagini per determinare le caratteristiche fisiche e geomeccaniche dei vari litotipi che compongono il terreno, in particolare si vuole conoscere il valore del coefficiente di permeabilità di ogni acquifero.

Stimare un valore corretto del coefficiente di permeabilità nelle varie formazioni consente di modellare in maniera corretta il flusso idrico circolante nei corpi acquiferi. La ricerca del valore più attendibile del coefficiente di permeabilità da assegnare alle varie frazioni granulometriche in primo luogo è stato effettuato basandosi su dati di letteratura, in seguito sono stati utilizzati i risultati ottenuti da prove granulometriche effettuate su campioni estratti in sito.

Partendo dall'analisi delle diverse stratigrafie che compongono l'area di studio emerge che nonostante la presenza di notevoli eterogeneità locali è possibile individuare la presenza delle frazioni granulometriche seguenti:

- Ghiaie e ghiaie sabbiose;

- Ghiaie cementate e conglomerato;
- Sabbie;
- Limi e argille.

Per ogni campione analizzato si è ricostruito il profilo stratigrafico come nell'esempio di Figura 56

COMUNE: MILANO IDE: B6B249815057

QUOTA (m s.l.m.): 119 PROFONDITA'(m): 27 NUMERO STRATI: 7

Strato	Da	A	Spessore	descrizione	sigla
1	0	1,8	1,8	Preforo	ZZ
2	1,8	3,5	1,7	Riporto: ghiaia, ghiaietto ciottoli, mattoni e sabbia limosa marrone	ZR
3	3,5	12,5	9	(Stratigrafia ricavata dai campioni prelevati) Ghiaia ghiaietto e sabbia grossolana e media limosa marrone	G GG S2 L
4	12,5	12,9	0,4	Sabbia media e grossa	S3 S2
5	12,9	18,6	5,7	Sabbia limosa grigia con abbondanti elementi di ghiaia e ghiaietto, alla base rari ciottoli	S L G GG
6	18,6	24,1	5,5	(Stratigrafia ricavata dai campioni prelevati) Ghiaia ghiaietto con sabbia limosa nocciola e ciottoli, talora rari	G GG S L
7	24,1	27	2,9	Sabbia molto limosa nocciola con ghiaia e ghiaietto	S L G GG

Figura 56 Esempio ricostruzione stratigrafia terreno da carota

Partendo dai dati presenti in letteratura Figura 57, è possibile attribuire ad ogni frazione granulometrica i seguenti intervalli di permeabilità:

- Ghiaie e ghiaie sabbiose:  $K=10^{-2}-10^{-3}$  m/s;
- Ghiaie cementate e conglomerato:  $K=10^{-5}-10^{-6}$  m/s;
- Sabbie:  $K=10^{-4}-10^{-5}$  m/s;
- Limi e argille:  $K=10^{-6}-10^{-9}$  m/s.

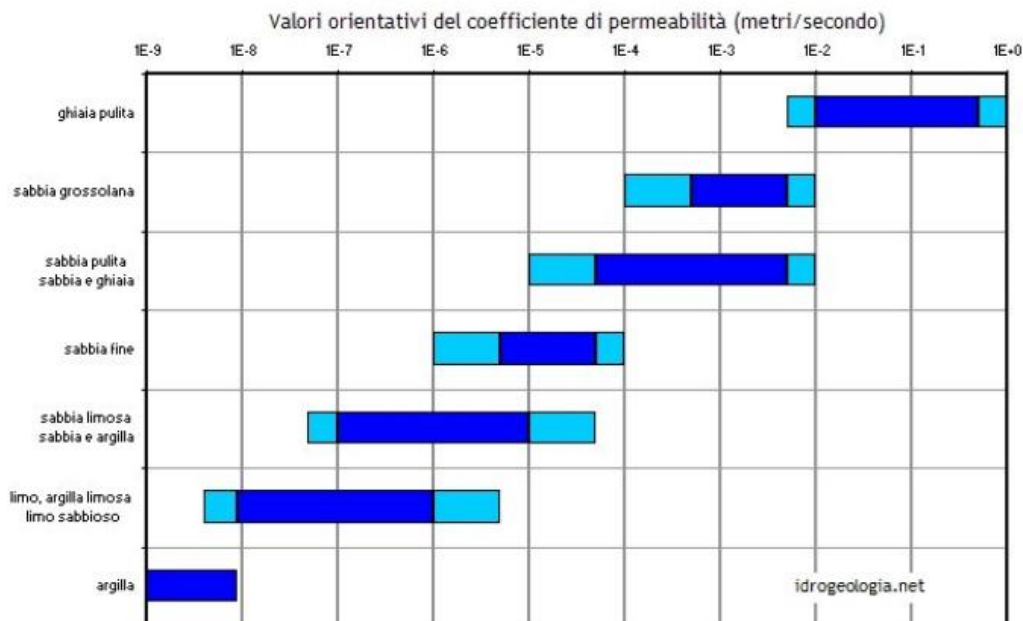


Figura 57 Valori orientativi permeabilità per terreni sciolti [m/s]

Partendo dai valori di permeabilità attribuiti in letteratura si è affinato il valore del coefficiente con l'utilizzo dei risultati delle prove granulometriche riportati in Appendice A1 e che tramite formule

empiriche permettono di ottenere la distribuzione di probabilità dei valori di permeabilità delle varie formazioni dalle quali è possibile ricavare il valore medio ed il relativo grado di incertezza. Effettuare un'analisi di questo tipo risulta essere necessario per ottenere un coefficiente di permeabilità affidabile per le differenti litologie che compongono il sottosuolo milanese. Le prove granulometriche essendo effettuate su campioni prelevati in sito esprimono le reali caratteristiche della matrice porosa e non sono affette dal grado di aleatorietà insito nella duplice capacità dell'operatore di individuare una determinata litologia noto soltanto il profilo stratigrafico del terreno e di assegnare ad esso un particolare valore di permeabilità partendo dai dati trovati in letteratura.

In letteratura la relazione empirica più nota per stimare la permeabilità delle formazioni partendo da un'analisi granulometrica sul campione è quella di Hazen (1911):

$$k = CD_{10}^2$$

Dove  $D_{10}$  [m] rappresenta la larghezza della maglia del setaccio che permette il passaggio del 10% in peso del campione del materiale granulare e  $C$  [ $m^{-1}s^{-1}$ ] è un coefficiente di proporzionalità pari a 0,01.

Si può osservare come nel grafico di Figura 58 il valore di permeabilità diminuisce sensibilmente nel caso in cui sia presente anche in quantità minime del materiale fine come limo o argilla.

I campioni sono stati selezionati raggruppandoli in gruppi omogenei di campioni caratterizzati dalla prevalenza di una frazione granulometrica piuttosto che un'altra, i campioni caratterizzati da una presenza di ghiaie/ciottoli superiore al 50% sono stati classificati appartenenti al gruppo ghiaie/ciottoli, quelli in cui si ha una presenza superiore al 50% di limi/argille nel gruppo dei limi/argille e quelli in cui è la sabbia ad essere superiore al 50% al gruppo delle sabbie.

Dopo aver calcolato il valore di permeabilità per ogni campione è stato possibile ottenere un grafico con la distribuzione di probabilità dei valori di permeabilità riferiti ad ogni frazione granulometrica.

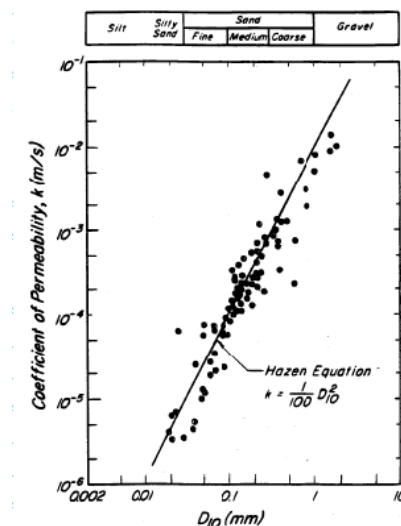


Figura 58 Legame tra  $D_{10}$  e permeabilità secondo la relazione di Hazen

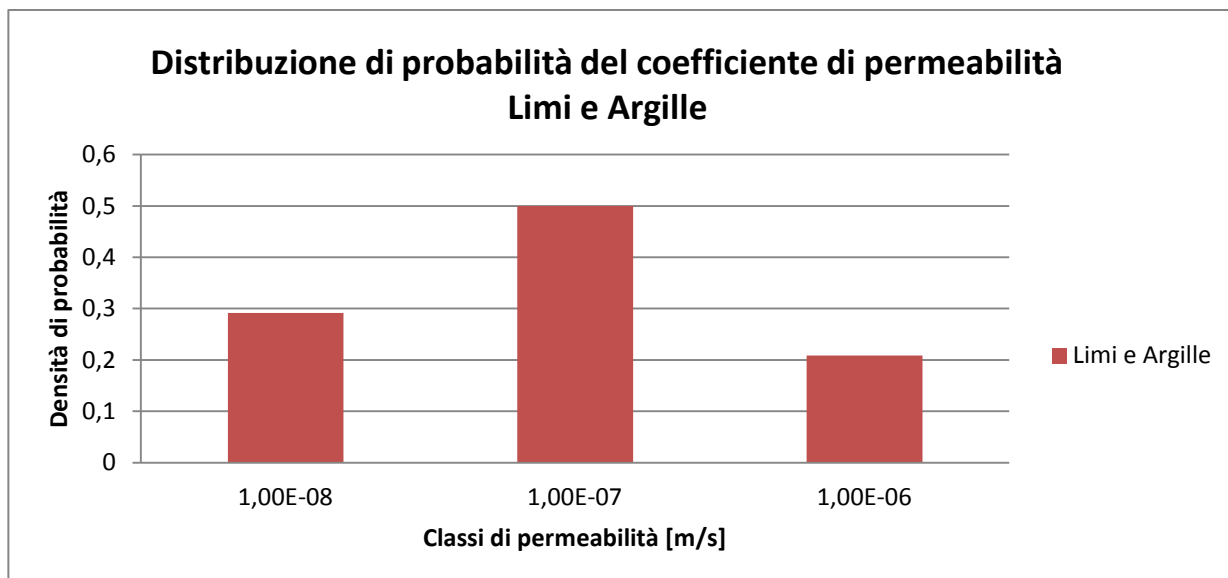


Figura 59 Distribuzione di probabilità del coefficiente di permeabilità di Limi e argille

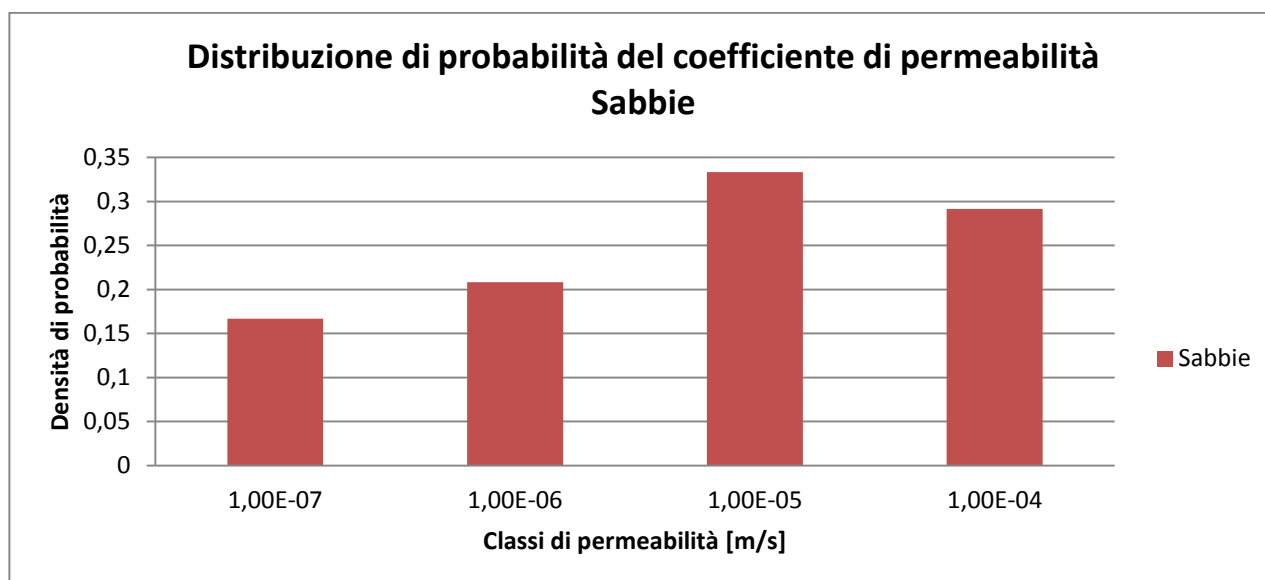


Figura 60 Distribuzione del coefficiente di permeabilità delle sabbie

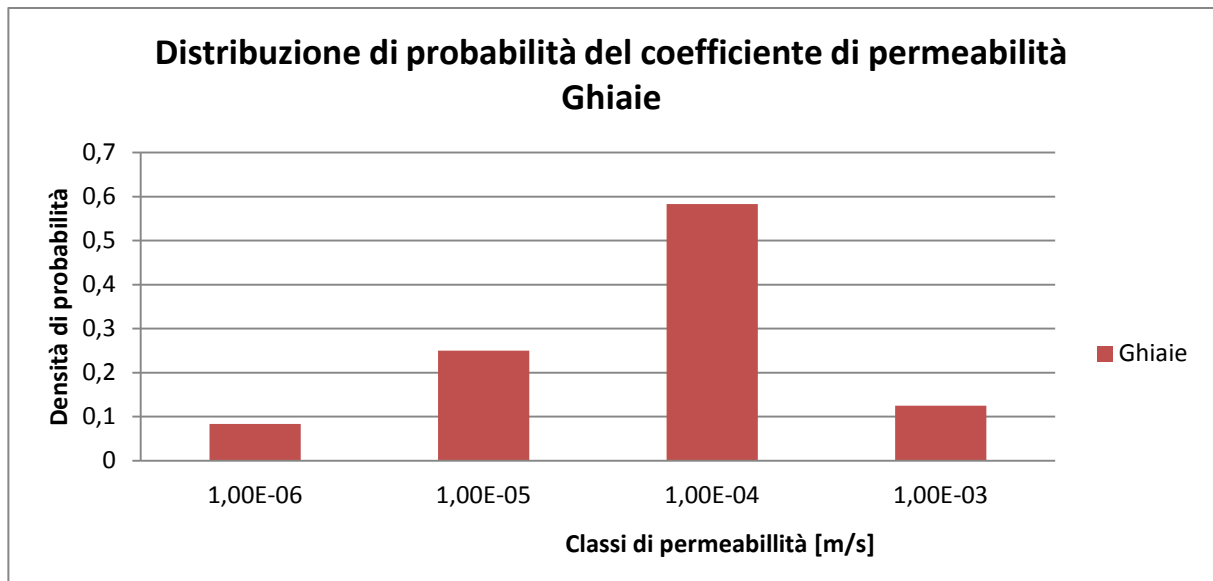


Figura 61 Distribuzione del coefficiente di permeabilità delle ghiaie

Osservando le figure Figura 59, Figura 60 e Figura 61 si nota che le distribuzioni di probabilità hanno, come ci si aspettava, un andamento di tipo Gaussiano, infatti ogni frazione granulometrica mantiene un valore proprio del coefficiente di permeabilità che può variare in funzione della differente presenza di materiale fine. La presenza di una distribuzione normale ci permette di utilizzare la media come valore rappresentativo dell'intera distribuzione, ma dato che la permeabilità non è una grandezza sommabile media e sqm devono essere calcolati sui logaritmi della probabilità. I valori di permeabilità medi e dello sqm per ogni frazione granulometrica sono riportati in Figura 62.

	media LogK	media [m/s]	sqm LogK
Ghiaia	3,62	2,39E-04	0,87
Sabbia	5,07	8,51E-06	1
Limo/Argilla	6,92	1,20E-07	0,64

Figura 62 Valori di permeabilità di ghiaia sabbia e limo/argilla

Analizzando la composizione percentuale degli strati che costituiscono l'acquifero è lecito considerare un valore di permeabilità media per ogni strato dell'acquifero pari a:

- Acquifero A:  $K=10^{-3}$  m/s, composto prevalentemente da ghiaia e ghiaia sabbiosa;
- Acquifero B:  $K=10^{-4}$  m/s, composto prevalentemente da sabbia e sabbia ghiaiosa,
- Aquitard:  $K=10^{-9}$  m/s, composto da limi e argille.

Avendo determinato le caratteristiche geomeccaniche dei litotipi degli strati che compongono il modello si può procedere a definire le caratteristiche delle gallerie.

Nel modello utilizzato nel seguente elaborato di tesi le gallerie metropolitane e del passante ferroviario sono state modellate soltanto dal punto di vista della dimensione del diametro e del profilo altimetrico, non sono state modellate con gli elementi strutturali che caratterizzano la

sezione stessa, poiché lo scopo della tesi non era un'analisi dell'interazione terreno struttura ma bensì studiare l'effetto delle gallerie metropolitane come corpi impermeabili immersi nella falda. Le gallerie sono state modellate correttamente dal punto di vista geometrico ma non da quello strutturale perciò il materiale con cui si è deciso di modellare le gallerie è l'argilla con permeabilità pari a  $10^{-9}$ .

In prima approssimazione alle gallerie è stato assegnato un valore di permeabilità pari a  $10^{-9}$ , nel paragrafo 89 si tratterà della sensibilità del modello rispetto alla permeabilità della galleria, in questo modo sarà possibile ottenere il minimo valore di permeabilità oltre il quale diminuendo ulteriormente tale valore non si ottiene una variazione significativa del livello di falda.

In Figura 63 Distribuzione della permeabilità nel modello viene mostrata la distribuzione della permeabilità nei differenti strati di terreno per la sezione 2 della linea M2.

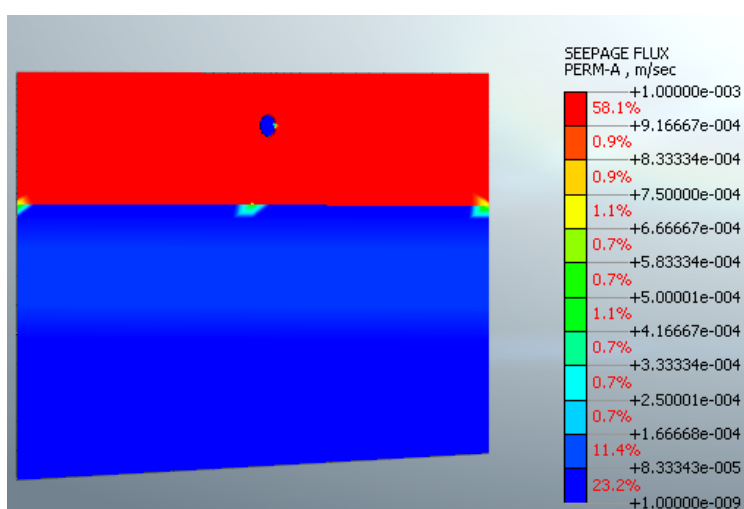


Figura 63 Distribuzione della permeabilità nel modello

## 7. Modello tridimensionale

La complessità e l'ampiezza del problema richiedono un approccio che permetta di conoscere nel dettaglio, o con un'approssimazione che possa essere ritenuta ingegneristicamente accettabile, la situazione del livello di falda lungo il percorso delle linee metropolitane.

Concettualmente il percorso seguito è composto dai passaggi seguenti:

- Realizzazione del modello tridimensionale;
- Inserimento del livello piezometrico;
- Individuazione delle zone influenzate dalla presenza della galleria in presenza di una singola linea;
- Individuazione delle zone influenzate dalla presenza delle gallerie in presenza di tutte le linee metropolitane e del passante ferroviario;
- Analisi dell'influenza del diametro della galleria sull'innalzamento del livello piezometrico.

Per poter discretizzare il modello e per poter effettuare le analisi sopracitate è necessario l'utilizzo di un software che permetta di realizzare analisi agli elementi finiti. Il software utilizzato nel seguente elaborato di tesi è GTS-Nx della Midas.



Brevemente si riportano le motivazioni che hanno spinto a scegliere GTS-Nx come software per effettuare le analisi FEM sul modello.

Nel seguente elaborato di tesi, come già detto, si vuole studiare l'effetto dell'innalzamento della falda causato dalla presenza delle linee metropolitane, per fare ciò è necessario utilizzare un software che permetta di effettuare analisi di filtrazione, preveda l'interazione terreno struttura, terreno falda e permetta di ricreare correttamente le condizioni di contatto tra materiali con caratteristiche geomeccaniche differenti.

Analizzando lo scenario dei software presenti sul mercato GTS-Nx è risultato il software più aggiornato, possiede tutte le caratteristiche necessarie al fine di ricavare risultati attendibili per la tesi e ottimizza il costo computazionale grazie ad un solver rinnovato che diminuisce notevolmente il tempo di analisi.

Il software Midas GTS-NX, sviluppato da Midas Information Technology Co.Ltd, è un potente software che permette di effettuare studi su analisi FEM agli elementi finiti ed opera sia in ambito 2D che 3D. Grazie alle sue caratteristiche è adatto per effettuare analisi in ogni settore dell'ingegneria geotecnica, attraverso questo software è possibile infatti effettuare differenti tipi di analisi come:

- Analisi meccanica dei terreni;
- Analisi degli sforzi 3D durante le fasi di costruzione;
- Analisi dell'interazione tra terreno e struttura;
- Analisi degli scavi;
- Analisi della stabilità dei pendii;
- Analisi dinamiche e sismiche;
- Analisi dei moti di filtrazione sia allo stato stazionario che durante il transitorio;
- Analisi dei consolidamenti e dei cedimenti.

Il campo di applicazione di GTS-Nx comprende qualunque tipo di opera che preveda l'interazione terreno-struttura, si spazia quindi da dighe e opere fluviali, a strutture di fondazione e di sostegno del terreno, a tunnel e gallerie delle metropolitane.

Il software è stato sviluppato in collaborazione con TNO-DIANA, società di R&D del gruppo TNO di Delft, questa collaborazione è strettamente legata all'università TU di Delft, il cui contributo è risultato essenziale nell'ambito della validazione dei modelli e dei solutori.

Nel seguente elaborato di tesi Midas GTS-Nx è stato utilizzato per la modellazione 3D della stratigrafia dell'acquifero milanese e dei tunnel delle linee metropolitane e del passante ferroviario.

## **7.1 Costruzione del modello**

I dati topografici e i dati relativi alla composizione dell'acquifero sono stati forniti dalla Carta Tecnica Regionale della Regione Lombardia e dalla P.ssa Gattinoni.

Grazie ad essi è stato possibile ottenere un disegno tridimensionale computerizzato del territorio di Milano realizzato attraverso il software vettoriale Autodesk Autocad e Midas Gts-Nx.

I punti su cui ci si è maggiormente focalizzati da un punto di vista del disegno sono:

- Il profilo topografico;
- I diversi livelli in cui è suddiviso l'acquifero;
- Il profilo altimetrico e longitudinale delle gallerie metropolitane e del passante ferroviario.

I paragrafi che seguono andranno a focalizzarsi sulla descrizione del lavoro svolto.

### **7.1.1 I livelli dell'acquifero**

L'acquifero tradizionale milanese è stato descritto utilizzando il classico "modello a torta" è composto da quattro strati, due permeabili (acquiferi) e due non (aquitard).

Dopo aver ottenuto una rappresentazione 2D delle superfici piezometriche attraverso le isopieze in un file Autocad dwg bidimensionale, è stato possibile importarla in Midas GTS-Nx attraverso il comando Terrain Geometry Maker.

Questo comando ha permesso di ricreare un modello della superficie topografica cosiddetta 2D e mezzo con una frequenza di campionamento di 25 punti per pixel quadrato.

In particolare sono state modellate le superfici di:

- Acquifero A, costituito da sabbia e ghiaia, ha un livello variabile tra i 100 e i 130 m s.l.m. con una soggiacenza che varia tra i 13 m delle periferie collocate a Nord e i 2 m delle periferie collocate a Sud;
- Aquitard tra l'acquifero A e l'acquifero B, costituito da uno strato di argilla impermeabile, crea lo strato di separazione tra i due acquiferi, ha uno spessore medio di 5 m e non è presente in tutto il sottosuolo dell'area di studio, come si può osservare in figura Fig. l'aquitard è assente nella zona Nord-Est del territorio milanese.
- Acquifero B, costituito da sabbia e ghiaia.
- Aquitard tra l'acquifero tradizionale (A+B) e gli acquiferi profondi, è stato modellato come uno strato impermeabile di argilla di spessore 30 m e costituisce la base del modello, lo spessore dello strato non è significativo perché non si sono voluti indagare gli acquiferi profondi ma solo quello tradizionale.

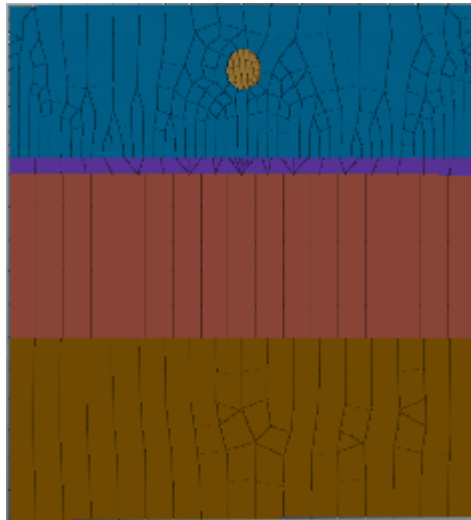


Figura 64 Suddivisione stratigrafica del terreno

In Figura 64 viene riportata la suddivisione stratigrafica di una sezione del modello. Partendo dal basso si trovano la base dell'acquifero tradizionale, l'acquifero B, l'aquitard e l'acquifero A.

### 7.1.2 Profilo topografico

Dopo aver ottenuto una rappresentazione 2D della superficie topografica di Milano dalla Carta Tecnica Regionale della Lombardia per mezzo delle isoipse in un file Autocad dwg bidimensionale, è stato possibile importarla in Midas GTS-Nx attraverso il comando Terrain Geometry Maker. Questo comando ha permesso di ricreare un modello della superficie topografica cosiddetta 2D e mezzo con una frequenza di campionamento di 25 punti per pixel quadrato.

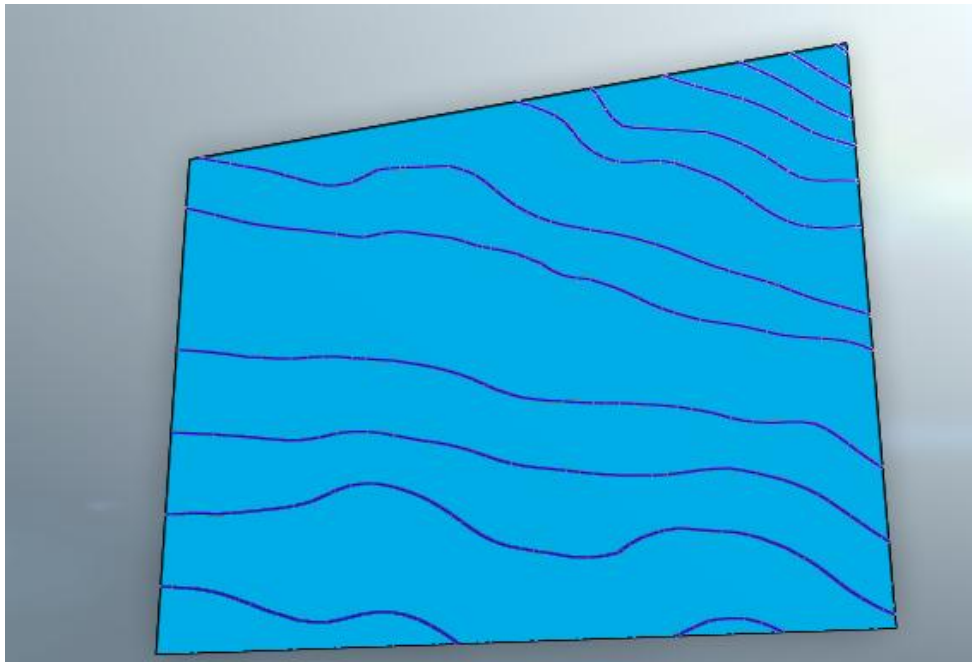


Figura 65 Carta delle isoipse importata nel modello per la costruzione della superficie topografica

A partire dalla superficie topografica è stato estruso il modello per una profondità di 200 m, nel seguito il solido è stato sezionato attraverso le superfici dell'acquifero A, dell'aquitard e della base tradizionale.

### 7.1.3 Le linee metropolitane e il passante ferroviario

Il territorio milanese è caratterizzato dalla presenza di quattro linee metropolitane sotterranee e da una galleria ferroviaria che attraversa la città da Sud-Est a Nord-Ovest. I tracciati planimetrico e altimetrico delle linee metropolitane e del passante ferroviario (Appendice A3) sono stati forniti da MM Metropolitana Milanese, il tracciato planimetrico è stato proiettato sulla superficie topografica e da questo si è partiti a tracciare il tracciato altimetrico, noto il tracciato altimetrico e i diametri delle gallerie è stato possibile estrarre il solido che funge da galleria Figura 66.

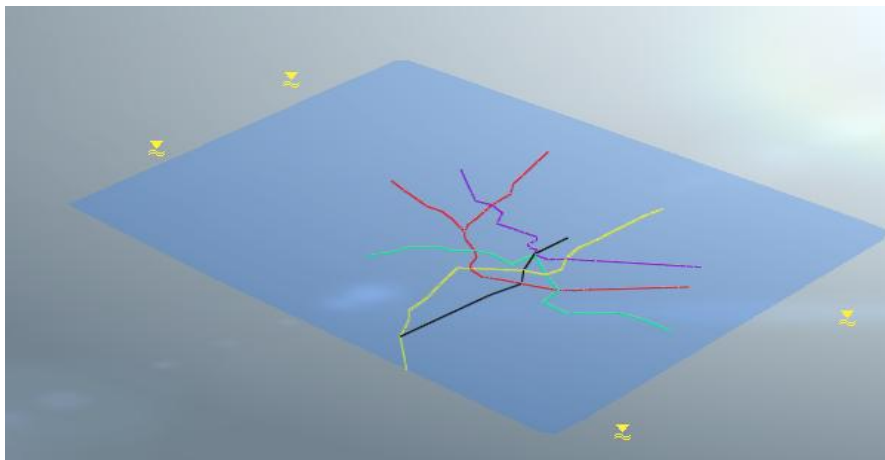


Figura 66 Tracciato planimetrico delle linee metropolitana e modellazione falda

### 7.1.4 Metodo degli elementi finiti

L'approccio che si è deciso di seguire per conoscere la variazione del livello della falda in un intorno delle gallerie è quello del metodo degli elementi finiti, di cui si vogliono riassumere alcuni aspetti fondamentali, senza alcuna pretesa di darne una descrizione completa.

Gli elementi essenziali di tale metodo sono:

- descrivere il modo di deformarsi del continuo in esame tramite un modello per gli spostamenti di un numero finito di parametri (o gradi di libertà);
- suddividere il continuo in tante parti chiamate Elementi Finiti, opportunamente assemblate.

Le ipotesi di piccoli spostamenti e deformazioni così come l'assenza di effetti dinamici sono considerate sempre valide.

Il metodo viene suddiviso in differenti fasi:

1. Idealizzazione, i solidi da analizzare devono essere semplificati in modo opportuno;
2. Discretizzazione, o suddivisione del continuo in Elementi Finiti, attraverso la costruzione delle mesh (reticolo) maggiormente fitta dove interessa conoscere con dettaglio maggiore gli effetti;

3. Modellazione, ovvero scelta del modello per il campo di spostamenti su ciascun elemento finito, riducendo in questa maniera il modo di deformarsi che il sistema avrebbe rispetto alle possibilità a priori statiche nel rispetto della congruenza; si descrive quindi il campo di spostamenti all'interno dell'elemento  $i$ -esimo  $s_i$  in funzione delle componenti di spostamento degli  $n$  nodi raccolti nel vettore spostamento  $U_i^L$  (equazione ...,  $N$  matrice delle funzioni di forma), ottenendo inoltre deformazioni elastiche
4. trasformazione di coordinate, nei casi in cui il sistema di riferimento locale, introdotto per la descrizione dei modelli di spostamento, sforzi e deformazioni all'interno dell'EF, sia diverso da quello globale;
5. assemblaggio, al fine di ricostruire l'unità del continuo a partire dal comportamento dei singoli EF descritto in base al modello cinematico, individuando i gradi di libertà spostamenti nodali comuni agli elementi finiti mutuamente connessi;
6. scrittura del principio degli spostamenti virtuali in forma discreta, imponendo un equilibrio staticamente ammissibile;
7. Soluzione del sistema lineare o non lineare, in base al legame costitutivo scelto, imponendo i vincoli esterni;
8. Ricostruzione dell'intera soluzione, calcolando spostamenti, deformazioni e sforzi all'interno di ogni singolo EF.

Risulta evidente come la dimensione degli EF influenzi direttamente il risultato, in particolare la sua precisione e la possibilità di leggere o meno determinati effetti che con una dimensione non adeguata di EF potrebbero risultare non presenti. Aumentare la precisione dei risultati ha anche un riscontro negativo perchè causa un notevole incremento del costo computazionale del modello, sarà necessario trovare il giusto compromesso tra accuratezza dei risultati e costo computazionale.

Il primo modello prevede elementi di lato medio 4 m per le gallerie e 500 m per il terreno, il sistema in automatico affina la mesh in prossimità di pilastri e spigoli come visibile in figura Fig. (>): Il box giallo rappresenta l'area di studio, composto e discretizzato come se fosse formato da un solo materiale.

## 7.2 Aggiornamento del modello

Il modello appena descritto presenta due difetti intrinseci:

- Non considera la stratigrafia del terreno;
- Utilizza elementi finiti di dimensioni notevoli.

Per ovviare a questi problemi e riprodurre nel modo quanto più fedele possibile la realtà si è deciso di sviluppare un nuovo modello con il quale si otterranno risultati di accuratezza migliore.

Nello sviluppo del nuovo modello si è proceduto secondo il seguente schema concettuale:

1. Si è ricostruito il profilo topografico con un dettaglio maggiore;
2. si è ridotta la dimensione degli elementi finiti;
3. si è ricostruito il profilo stratigrafico.

### 7.2.1 Ricostruzione del profilo topografico

Le isoipse del paragrafo 5.1.2 sono state campionate con una frequenza pari a 8000 punti per pixel quadrato, permettendo la ricostruzione del profilo visibile in **figura 5.**

Il modello considera anche la presenza della falda acquifera il cui livello è visibile in azzurro in **figura 5.**

### 7.2.2 Infittimento della mesh

Dopo aver modellato il volume della galleria col modello B e la stratigrafia del sottosuolo milanese è stato possibile procedere alla discretizzazione che, come è possibile vedere da figura 5. , è stata realizzata in modo composto:

- Le gallerie hanno elementi con una dimensione media pari a 2 metri;
- Lo strato dell'aquitard ha una dimensione media degli elementi pari a 100 m;
- L'acquifero B ha una dimensione media degli elementi pari a 200 m;
- La base del modello (aquitard tra acquifero tradizionale e acquifero profondo) ha una dimensione media degli elementi di 500 m
- L'acquifero A, in cui sono immerse le linee metropolitane, è discretizzato in tre modi differenti: il primo è quello nell'intorno della galleria che ha una dimensione media degli elementi di 8 m, la seconda fascia è quella compresa tra le diverse linee metropolitane e ha una dimensione media degli elementi di 20 m, la terza ed ultima fascia è quella posta nella periferia Ovest, area non interessata dalla presenza delle linee metropolitane in cui gli elementi hanno una dimensione media di 100 m.

Nelle aree di confluenza di differenti discretizzazioni, oltre che negli spigoli, il software provvede automaticamente a degradare la dimensione degli elementi finiti per ottenere dei raccordi congruenti.

### 7.2.3 Ulteriore aggiornamento del modello

Il diametro delle gallerie metropolitane come si può notare dalla Tab. 2 non è costante lungo tutto il percorso ma nel caso delle linee M2 ed M3 presenta un diametro variabile. Per questo motivo si è deciso di sviluppare un ulteriore modello in cui si tenga in considerazione della variabilità del diametro lungo lo sviluppo del tracciato.

Il diametro delle gallerie è variabile in un numero limitato di sezioni per cui sulla maggior parte del tracciato è possibile considerare validi i risultati ottenuti col modello precedente.

Considerare una variazione del diametro permette di analizzare il legame che sussiste tra il diametro e l'oscillazione piezometrica.

## **8 Analisi tridimensionale**

Dopo aver definito le caratteristiche geometriche e idrogeologiche della pianura alluvionale milanese il lavoro di tesi si conclude proponendo l'analisi dell'effetto che la presenza di opere sotterranee impermeabili, come le gallerie metropolitane, hanno sulla falda acquifera. Si andranno a studiare gli innalzamenti indotti dalla presenza dei corpi impermeabili in falda in funzione delle loro caratteristiche geometriche e del coefficiente di permeabilità.

Per determinare gli effetti sopra citati si è ricorsi all'uso di un software di progettazione geotecnica agli elementi finiti ed in particolare la scelta è ricaduta su GTS-Nx della casa MIDAS.

Per una descrizione completa del funzionamento del software e sulle equazioni che vengono implementate dall'algoritmo di risoluzione si rimanda all'Appendice A2.

La prima analisi che viene effettuata è un'analisi del moto di filtrazione nella stratigrafia del terreno in assenza delle gallerie metropolitane, questa analisi preliminare viene effettuata per verificare che il modello riproduca in modo corretto il livello di falda, Figura 67.

Viene effettuata una seconda analisi preliminare in cui viene inserito il tunnel della metropolitana al quale viene assegnata la permeabilità dell'acquifero per verificare che il modello legga la permeabilità del terreno e che anche in presenza di un corpo costituito da elementi di dimensione differenti venga riprodotto correttamente il livello di falda. Fig.



Per le analisi preliminari viene utilizzato il primo modello discretizzato (fig. ) e considerando l'acquifero A costituito da ghiaia e sabbia caratterizzati dalle seguenti caratteristiche:

- $E=90000 \text{ KN/m}^2$
- $\nu=0,3$
- $\gamma_d=18 \text{ KN/m}^3$
- $\gamma_{sat}=19 \text{ KN/m}^3$
- $k=10^{-3} \text{ m/s}$ .

Viene imposta la condizione di contatto tra il tunnel e l'acquifero A, per inserire il livello di falda viene imposta come condizione iniziale, non vengono applicati carichi in sommità e viene messa in pressione la falda. Viene condotta un'analisi del tipo Seepage in transitorio per poter tener conto del livello di falda.

Nelle immagini seguenti vengono mostrati i risultati ottenuti in assenza di galleria, con galleria con permeabilità pari a quello dell'acquifero A.

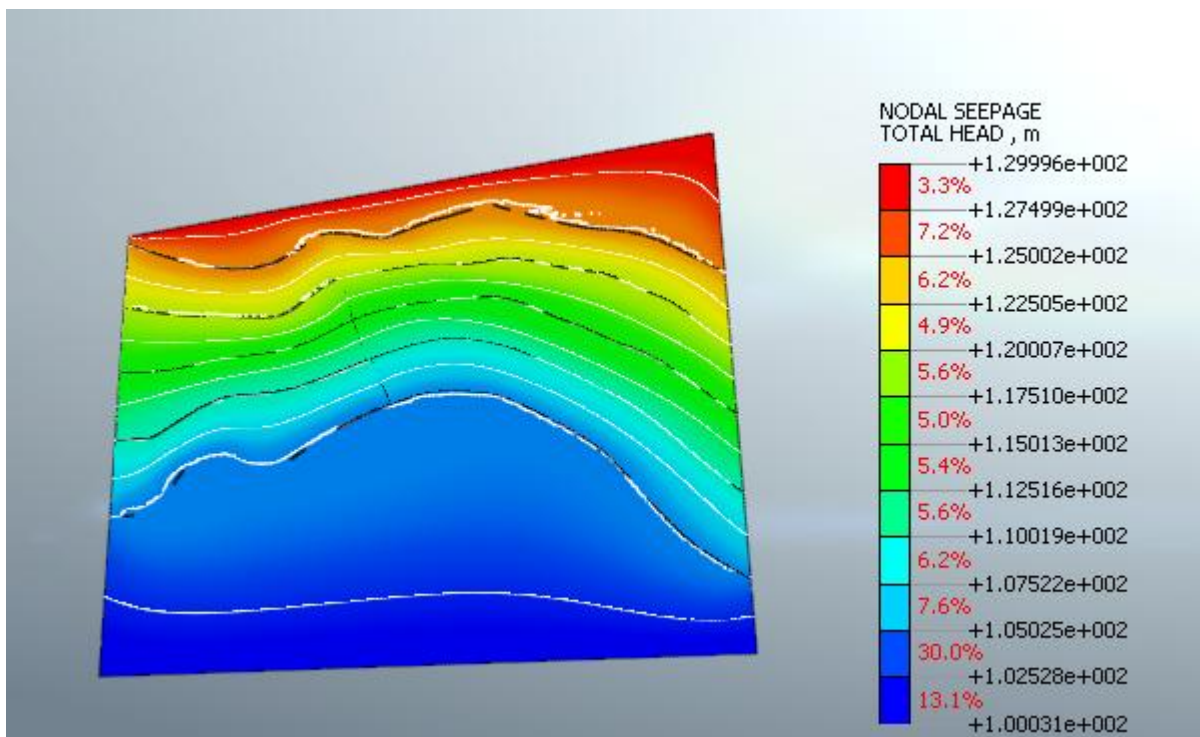


Figura 67 Livello piezometrico in assenza delle gallerie

### 8.1.1. Confronto col modello matematico

Per verificare che il modello riproduca correttamente la piezometria si effettua un confronto tra i valori ottenuti con il modello matematico e quelli della piezometria ricostruita col software Surfer. Prendendo dei nodi campione in Gts-Nx e conoscendone le coordinate è stato possibile effettuare un confronto tra i valori della piezometria riprodotta dal modello e la carta piezometrica ricostruita coi dati rilevati dai piezometri.

Nodo	Livello piezometrico Gts-Nx	Livello piezometrico Surfer	$\Delta$ livello piezometrico
7139862	104,902	104,901	0,001
7141528	104,934	104,932	0,002
7132185	105,586	105,587	-0,001
7132677	108,597	108,59	0,007
7144173	115,312	115,298	0,014
7148260	122,433	112,43	10,003
7150539	125,551	125,555	-0,004
7149197	129,366	129,362	0,004
7146828	124,447	124,455	-0,008
7151499	116,616	116,614	0,002
7146193	106,322	106,322	0
7139646	103,487	103,492	-0,005
7134197	111,259	111,256	0,003
7148218	121,500	121,508	-0,008
7149477	129,481	129,477	0,004

Tab.1 Confronto tra il livello piezometrico riprodotto da Midas e quello della carta piezometrica del 2014

Come si può osservare dai dati presenti in Tab.1, il modello riproduce correttamente il livello piezometrico, poiché lo scarto tra i valori riprodotti da Surfer e quelli riprodotti da Midas è dell'ordine di qualche millimetro che può essere considerata una variazione trascurabile.

### 8.1.2 Analisi del moto di filtrazione

Dopo aver verificato che il modello riproduce correttamente la piezometria si vuole determinare il valore di permeabilità da assegnare alla galleria, ovvero si vuole ricercare per qual è il valore massimo di permeabilità grazie al quale il modello legge la galleria come corpo impermeabile.

In primo luogo si è assegnata al materiale con cui è stata modellata la galleria una permeabilità  $k$  pari a  $k=10^{-9}$  che corrisponde alla permeabilità dell'argilla con cui si è modellato l'aquitard, si è poi aumentato il valore di permeabilità di un ordine di grandezza fino a  $k=10^{-3}$  che corrisponde come già detto precedentemente alla permeabilità media dell'acquifero A.

In seguito all'analisi di filtrazione svolta sul modello sono state scelte quattro sezioni in cui rilevare il livello di falda per ogni linea metropolitana e come si evince dai grafici delle figure Figura 68, Figura 69, Figura 70 e Figura 71 si nota che il valore di permeabilità per il quale un'ulteriore diminuzione di permeabilità non risulta significativa sul modello è  $k=10^{-8}$ , diminuendo ulteriormente tale valore infatti non si riscontrano variazioni significative nel livello di falda.

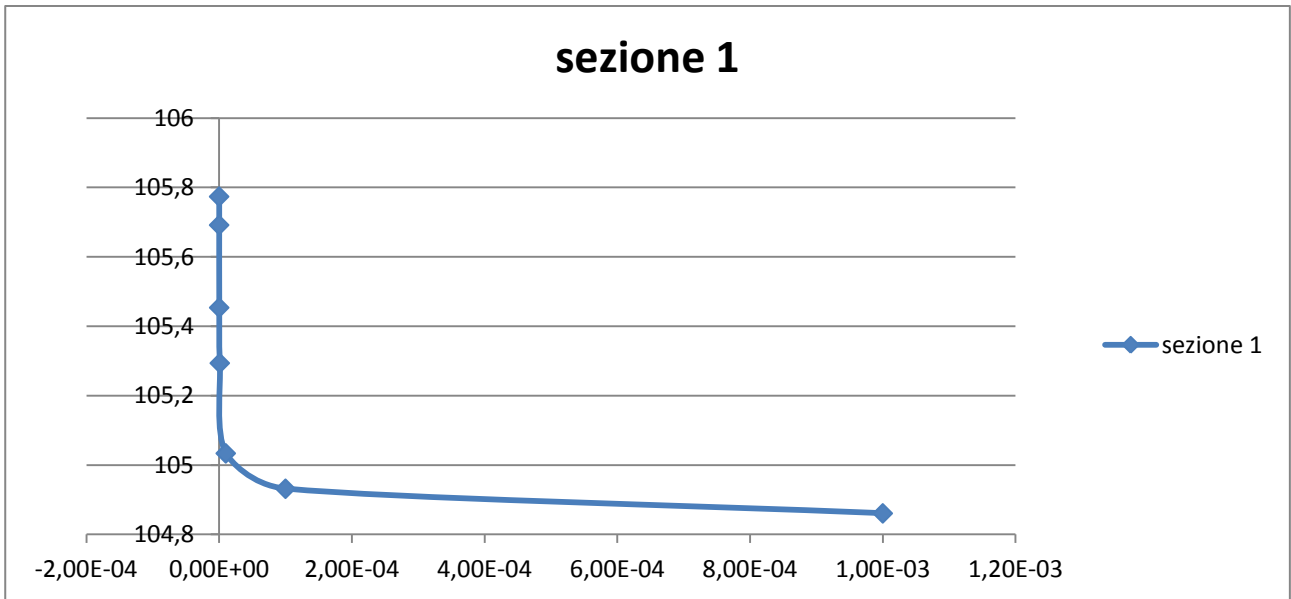


Figura 68 Confronto tra i valori piezometrici e il coefficiente di permeabilità della galleria nella sezione 1

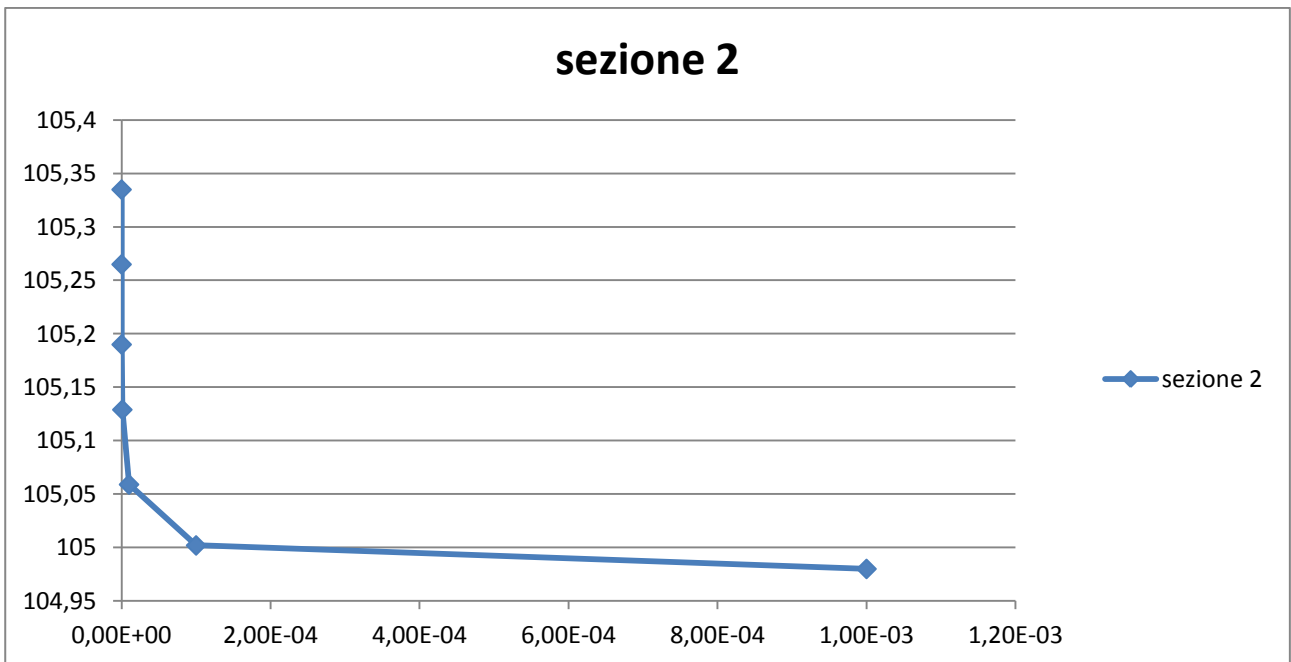


Figura 69 Confronto tra i valori piezometrici e il coefficiente di permeabilità della galleria nella sezione 2

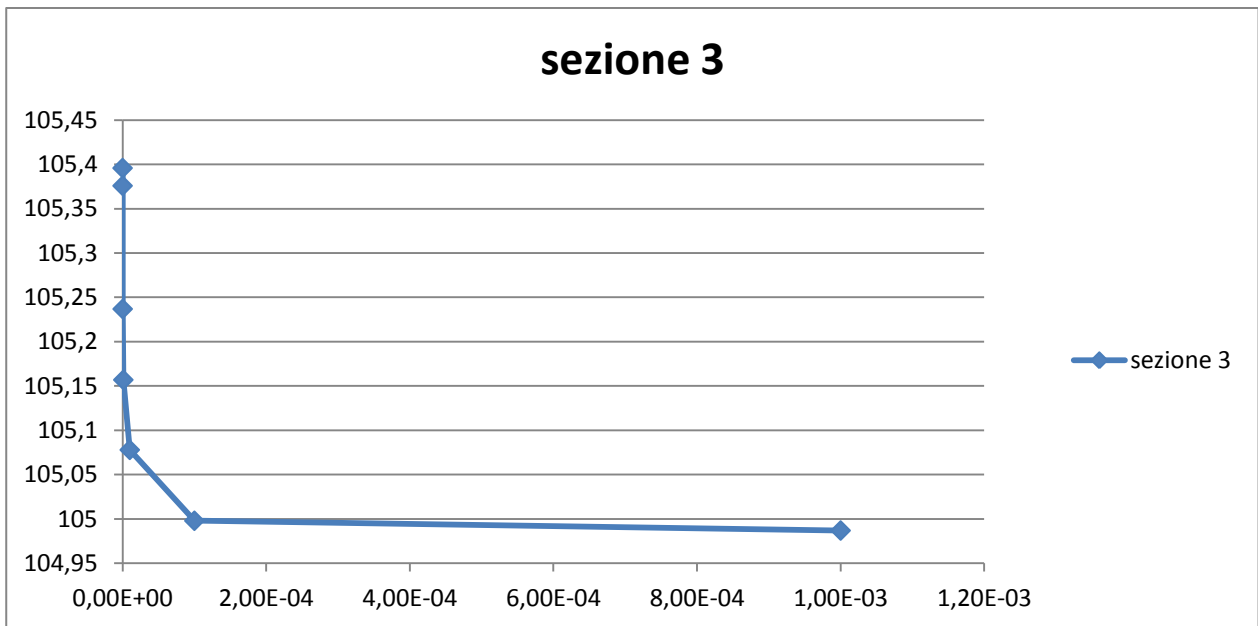


Figura 70 Confronto tra i valori piezometrici al variare del coefficiente di permeabilità della galleria

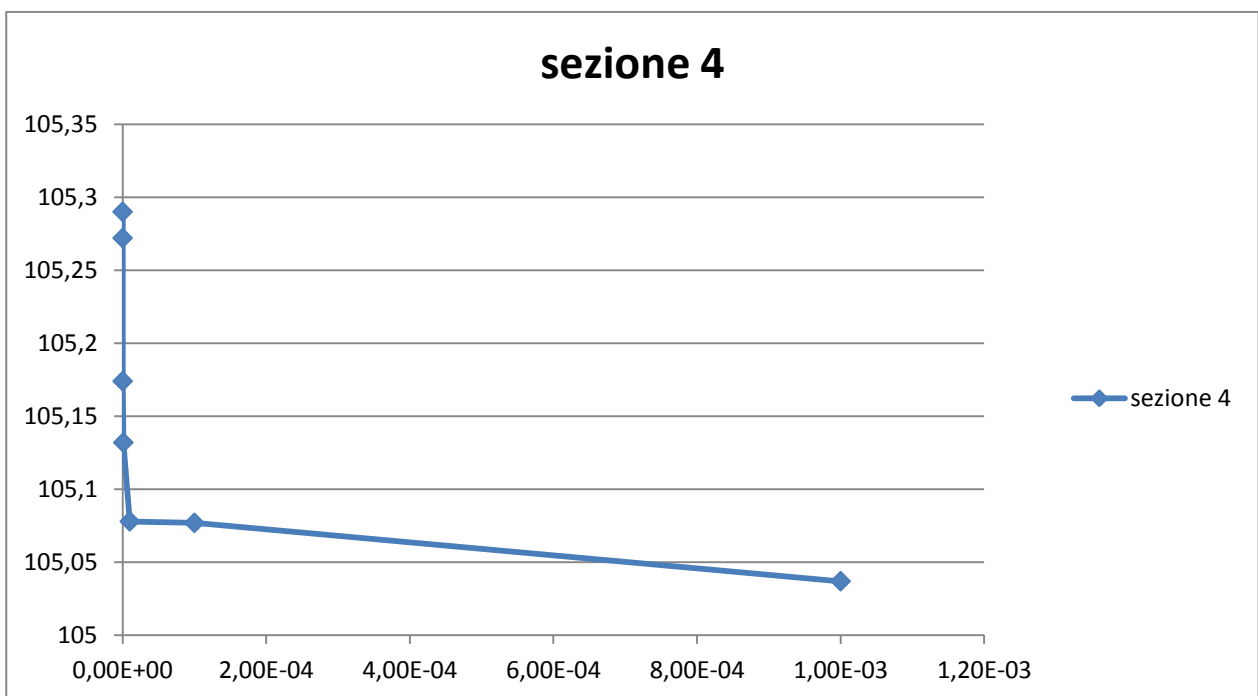


Figura 71 Confronto tra i valori piezometrici al variare del coefficiente di permeabilità nella sezione 4.

Dopo aver determinato il valore di permeabilità da assegnare alla galleria è stata effettuata l'analisi sul modello per trovare i valori di innalzamento della piezometria in presenza della galleria.

L'analisi è stata effettuata sul modello in cui le gallerie sono state modellate tutte con lo stesso diametro, di seguito si analizzerà l'effetto del fattore di forma sulla galleria, ovvero si prenderà in considerazione che il diametro della galleria sia variabile lungo il profilo piano altimetrico.

Per visualizzare meglio i risultati ottenuti sono state utilizzate ancora le sezioni del modello così come erano state utilizzate precedentemente per la calibrazione della permeabilità della galleria.

- M1

La linea M1 è costruita con un profilo altimetrico tale da non essere mai immersa nella falda, per questo motivo è stata trattata separatamente nel corso delle analisi effettuate e non si è ritenuto necessario sezionare la linea proprio per questo motivo.

Di seguito si riporta un'immagine Figura 72 della falda in cui si è modellata l'interazione tra falda e linea metropolitana, confrontandola con l'immagine della falda indisturbata non si notano variazioni e analizzando i livelli piezometrici in corrispondenza del tracciato altimetrico della linea metropolitana si evince che la linea metropolitana è sopra la falda.

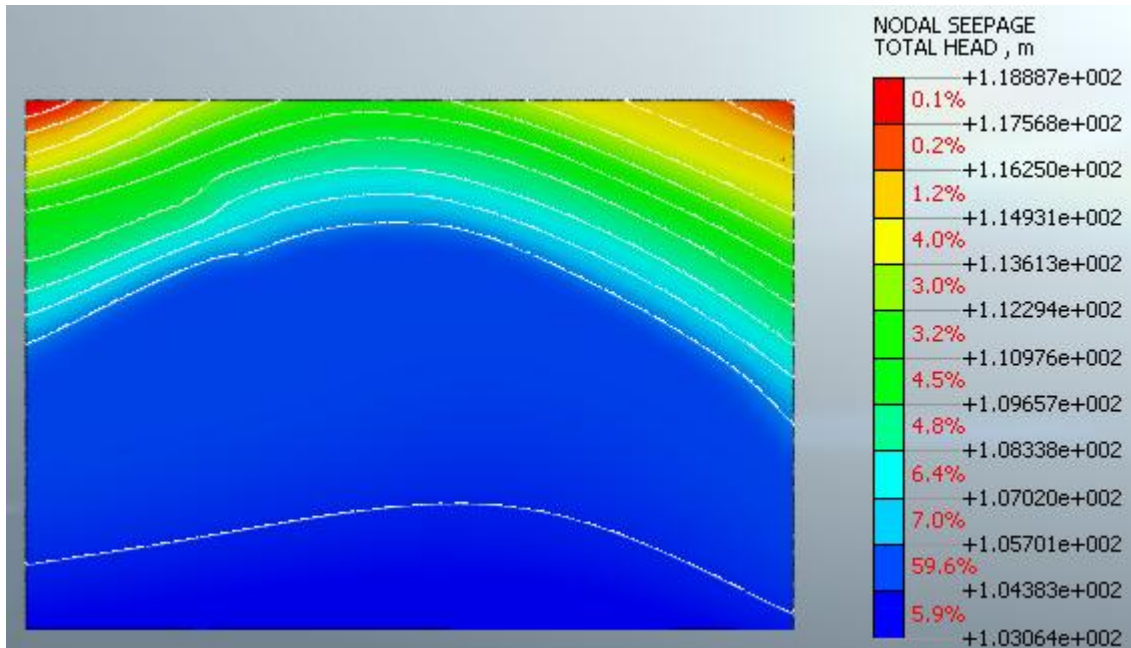


Figura 72 Livello piezometrico in presenza della M1

- M2

A seguito delle analisi 3D FEM sul modello e a seguito dell'analisi 2D FEM sulle sezioni del modello 3D si sono ottenuti i valori di variazione del livello piezometrico riportati di seguito:

- Sezione 1

k	1,00E-09	105,774
livello piezometrico	1,00E-03	104,861
differenza di livello		0,913

- Sezione 2

k	1,00E-09	105,335
livello piezometrico	1,00E-03	104,98
differenza di livello		0,355

- Sezione 3

k	1,00E-09	105,396
livello piezometrico	1,00E-03	104,987
differenza di livello		0,409

- Sezione 4

k	1,00E-09	105,29
livello piezometrico	1,00E-03	105,037
differenza di livello		0,253

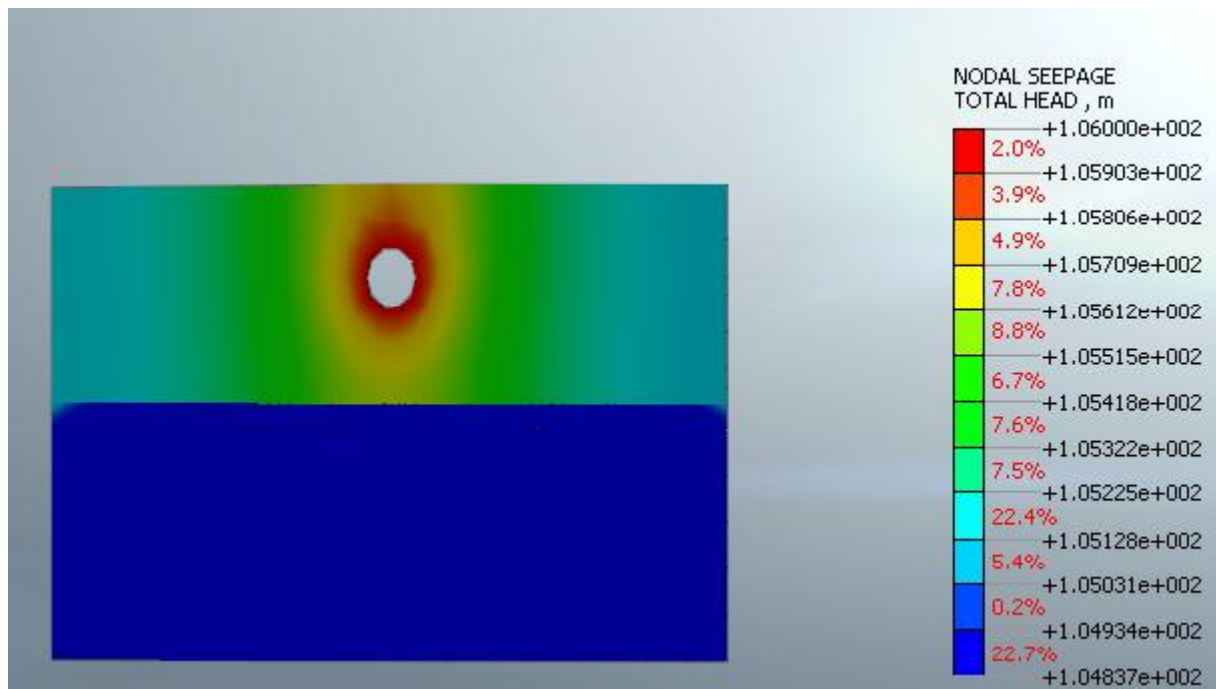


Figura 73 Distribuzione del carico piezometrico attorno alla sezione 1 della M2 nel caso di  $k=10^{-9}$



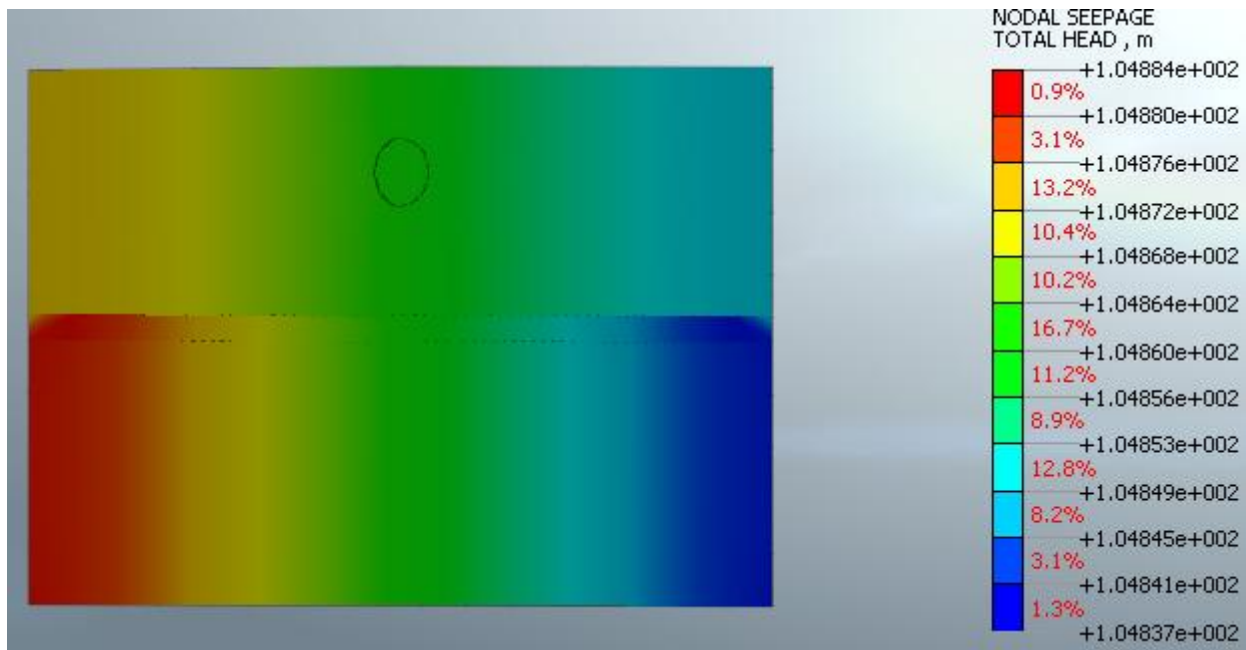


Figura 74 Distribuzione del carico piezometrico nella sezione 1 in assenza della galleria

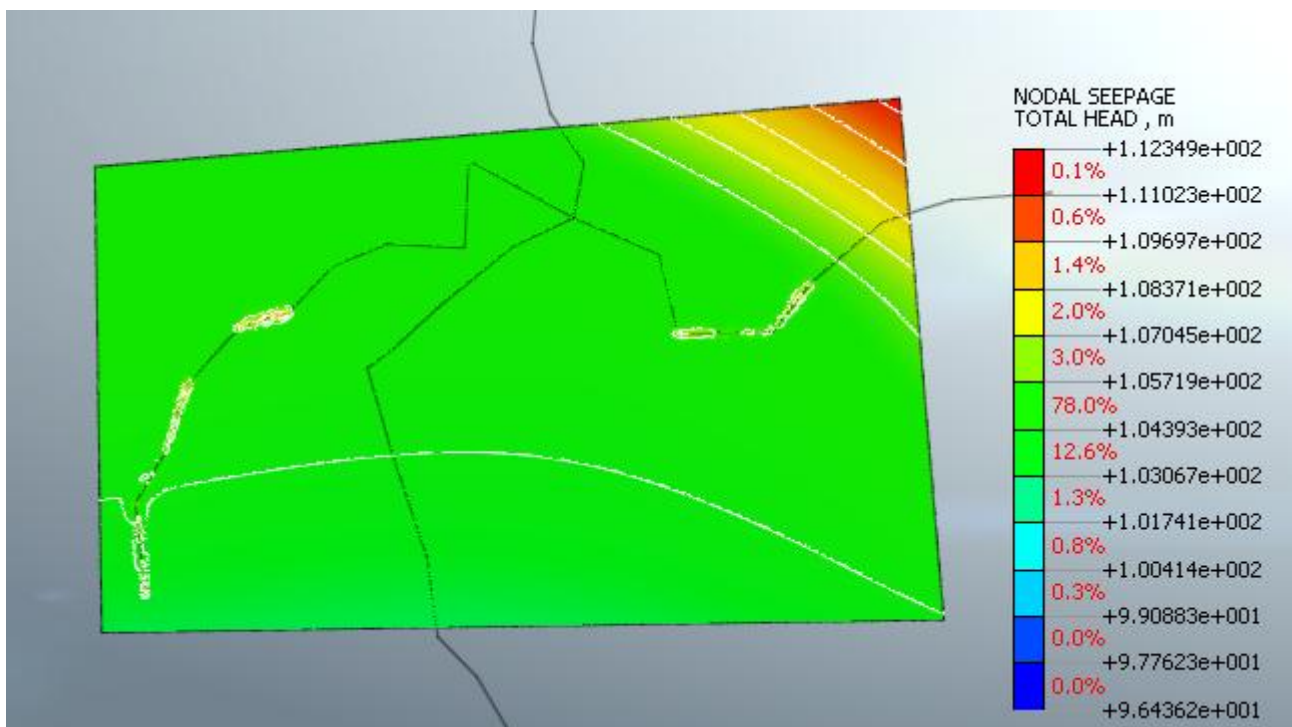


Figura 75 Area di influenza della metropolitana sulla falda

In Figura 75 si può osservare come la presenza della linea verde influenza la falda, si possono notare come le isopieze risultino deviate rispetto alla falda indisturbata.

Dalle figure Figura 73 e Figura 74 si evidenzia come la presenza di un corpo impermeabile influenzi la distribuzione di carico della falda nel suo intorno.

Nel caso della linea verde la differenza di livello piezometrico che si ottiene in presenza delle linee metropolitane rispetto alla falda indisturbata è una variazione media di 35 cm, questa variazione è può essere considerata accettabile.

- M3

A seguito delle analisi 3D FEM sul modello e a seguito dell'analisi 2D FEM sulle sezioni del modello 3D si sono ottenuti i valori di variazione del livello piezometrico riportati di seguito:

- Sezione 1

k	1,00E-09	100,478
livello piezometrico	1,00E-03	100,116
differenza di livello		0,362

- Sezione 2

k	1,00E-09	103,297
livello piezometrico	1,00E-03	102,981
differenza di livello		0,316

- Sezione 3

k	1,00E-09	105,33
livello piezometrico	1,00E-03	104,898
differenza di livello		0,432

- Sezione 4

k	1,00E-09	118,056
livello piezometrico	1,00E-03	117,271
differenza di livello		0,785

Come si può notare anche nel caso della M3 i valori di innalzamento ottenuti sono variano mediamente tra i 30 e i 40 cm, si raggiunge un picco di 78 cm nella Sezione 4 che si trova in corrispondenza della fermata Affori FN, tale valore potrebbe essere legato alla grande profondità della galleria in quel tratto.

- Passante ferroviario

A completare il lavoro sullo studio sull'effetto dell'interazione tra gallerie sotterranee e livello di falda rientra l'analisi sul Passante ferroviario. Come per lo studio delle linee metropolitane sono state prese in considerazione quattro sezioni dell'intero tracciato sul quale rilevare i valori numerici dell'influenza della galleria sulla falda. Le sezioni sono state prese in corrispondenza delle stazioni di Repubblica per la sezione 1, Porta Venezia per la sezione 2, Porta Garibaldi per la sezione 3.

- Sezione 1

k	1,00E-09	105,214
livello piezometrico	1,00E-03	104,977
differenza di livello		0,237

- Sezione 2

k	1,00E-09	105,297
livello piezometrico	1,00E-03	104,95
differenza di livello		0,347

- Sezione 3

k	1,00E-09	105,29
livello piezometrico	1,00E-03	104,993
differenza di livello		0,297

Nel caso del passante ferroviario le oscillazioni piezometriche si aggirano attorno ai 25 cm di media. Questo può essere legato alla profondità ma anche al fatto che è stato utilizzato il modello con diametro unico pari a 8 m. Di seguito verranno rianalizzate le stesse sezioni con diametro pari a 8,5 m lungo tutto il tracciato.

## 8.2 Analisi sulla galleria

Nel paragrafo seguente si è deciso di valutare come il fattore di forma, ovvero la dimensione del diametro della galleria, influenzi l'innalzamento del livello piezometrico.

### 8.2.1 Fattore di forma

Si vuole innanzitutto valutare come diametri differenti della galleria influiscano sul livello di falda sia a livello di innalzamento sia a livello di area di influenza.

Dagli elaborati tecnici forniti da MM Appendice A5 si evince che il diametro delle gallerie metropolitane variano secondo i valori riportati in Tab.2.

Linea	Tratta	Diametro galleria [m]
M1	Sesto Marelli-Molino Dorino	6,5
M1	Sesto Marelli-Bisceglie	6,5
M2	Cimiano-Sant'Ambrogio	7
M2	Sant'Ambrogio-P.ta Genova	12
M2	P.ta Genova-Abbiategrasso	7
M3	Comasina-Repubblica	8
M3	Repubblica-Crocetta	12,5
M3	Crocetta-San Donato	8
Passante	Rogoredo FS-Bovisa FN	8,5

Tab.2 Profilo dei diametri lungo il tracciato piano altimetrico

In Tab 3 Analisi di sensitività rispetto al diametro si trovano i risultati ottenuti variando il diametro del cavo della sezione 1 della metropolitana gialla. Come ci si poteva aspettare il livello piezometrico è influenzato dalla dimensione della galleria. E' stata eseguita la stessa analisi di sensitività per le sezioni illustrate precedentemente nell'ambito delle analisi sulla variazione del livello piezometrico.

diametro galleria	k=10-9	k=10-3	$\Delta$ carico
6,5	100,325	100,116	0,209
8	100,478	100,116	0,362
10	100,876	100,116	0,76
12	100,931	100,116	0,815

Tab 3 Analisi di sensitività rispetto al diametro

## 9. Conclusioni

Con questa tesi si è voluto indagare l'effetto che la presenza di opere impermeabili nel sottosuolo ha sul livello piezometrico. La prima parte del lavoro è consistito in un'ampia ricerca bibliografica indirizzata a definire dal punto di vista idrogeologico il sottosuolo milanese. Una seconda parte della ricerca bibliografica è consistita nella ricerca di altre città in cui in seguito alla deindustrializzazione il livello di falda si sia innalzato andando ad interagire con strutture già esistenti e non progettate per il contatto con l'acqua, in particolare si sono andati ad indagare i casi di Londra e Parigi, Parigi che ha una composizione litologica lontana da quella di Milano è sede di eventi catastrofici causati dall'innalzamento della falda, Londra invece ha una composizione del terreno simile a quella di Milano e non risulta essere sede di eventi dannosi per la società dovuti ad un innalzamento della falda.

A seguito della ricerca bibliografica si è svolto il lavoro di modellazione ed analisi numerica, per fare ciò ci si è avvalsi di due differenti software, Surfer per la ricostruzione della falda a partire dai dati dei piezometri e Midas GTS-Nx per la modellazione e l'analisi agli elementi finiti del modello. Nel modello sono state considerate impermeabili le gallerie, infatti per renderle impermeabili ed evitare infiltrazioni da parte delle acque della falda ed evitare quindi l'insorgere di fenomeni dannosi per l'infrastruttura MM sta provvedendo all'impermeabilizzazione di tutte le tratte delle linee ed ogni giorno ci sono in azione più di cento idrovore per evitare le infiltrazioni.

Dalle analisi numeriche si evince che l'innalzamento causato dalla presenza gallerie impermeabili nel sottosuolo ha un'entità stimabile nell'ordine dei 50 cm, questo valore risulta trascurabile per la parte Nord della città dove la soggiacenza della falda è di circa 13 m mentre assume un valore di riguardo per le zone poste nella parte Sud della città dove la soggiacenza media è di circa 2,5-3 m, in questo caso un innalzamento di 0,5 m potrebbe provocare allagamenti nei piani interrati e seminterrati e danni a strutture esistenti che non erano state progettate per interagire con l'acqua.

Non si nota invece una relazione tra la profondità della galleria e la variazione del livello di falda, la variazione del livello di falda risulta essere la stessa a prescindere dalla profondità, per quanto riguarda l'effetto sulla superficie piezometrica l'effetto essendo a maggior profondità si dissipa più in profondità rispetto ad una galleria superficiale.

Dalle analisi numeriche si riscontra inoltre che all'aumentare del diametro della galleria aumenta anche la variazione del livello di falda, a diametri maggiori corrispondono variazioni maggiori, la progettazione di linee metropolitane automatiche permette di realizzare infrastrutture che viaggiano a profondità maggiore con un minor impatto sul livello di falda.

# APPENDICE

## A1 Campioni materiali per calcolo permeabilità

- Limo e argilla

Num	Codice	Campione	Profondità	Ciottoli %	Ghiaia %	Sabbia %	Limi %	Argilla %	L+A [%]	D60	D30	D10	K [m/s]
1	SB6a266569675	I	24,6	0	0	3	89	8	97	0,03	0,01	0,002	4,00E-08
2	SB6a266089848	I	22,9	0	0	6	88	6	94	0,02	0,01	0,005	2,50E-07
3	SB6a266089848	A	2,5	0	15	41	38	6	44	0,5	0,02	0,005	2,50E-07
4	SB6a266569675	C	7,2	0	1	44	46	6	55	0,08	0,02	0,007	4,90E-07
5	SB6a268099348	D	8,9	0	9	23	64	4	68	0,05	0,02	0,006	3,60E-07
6	SB6a268889243	D	13,7	0	1	15	79	5	84	0,04	0,02	0,01	1,00E-06
7	SB6b151140348	A	3,5	0	6	43	42	9	51	0,11	0,022	0,0023	5,30E-08
9	SB6b216949463	D	15,5	0	4	53	39	4	43	0,2	0,03	0,009	8,10E-07
10	SB6b218029818	C	13	0	3	56	34	7	41	0,1	0,05	0,005	2,50E-07
11	SB6b218029818	D	16	0	2	58	36	4	40	0,3	0,05	0,01	1,00E-06
12	SB6b218829890	C	14,5	0	13	42	38	7	45	0,3	0,02	0,005	2,50E-07
13	SB6b231398034	F	27	0	3	5	0	0	92	0,03	0,015	0,005	2,50E-07
14	SB6b231398034	E	21,5	0	17	40	0	0	43	1	0,08	0,01	1,00E-06
15	SB6b233667995	E	19,5	0	5	45	0	0	50	0,15	0,6	0,015	2,30E-06
16	SB6b246178248	A	3,5	0	29	34	27	10	37	0,57	0,05	0,002	4,00E-08
17	SB6b249146706	A	1,9	0	15	27	49	9	58	0,08	0,02	0,005	2,50E-07
18	SB6b249696778	B	6,15	0	43	20	33	4	37	4	0,02	0,008	6,40E-07
19	SB6b249827164	N	18,15	0	23	39	33	5	38	0,5	0,05	0,008	6,40E-07
21	SB6b258299532	H	12,15	0	5	16	71	8	79	0,02	0,01	0,002	4,00E-08
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
117	SB6b323622463	A	2,7	0	0	7	82	11	93	0,03	0,008	0,002	4,00E-08
118	SB6b328663986	A	4,9	0	22	19	49	10	59	0,08	0,008	0,002	4,00E-08
119	SB6b330344114	F	16,3	0	0	9	82	9	91	0,02	0,008	0,002	4,00E-08
120	SB6b333634444	E	15,9	0	1	53	41	5	46	0,08	0,05	0,01	1,00E-06
121	SB6b342032214	D	7,9	0	8	23	63	6	69	0,05	0,03	0,008	6,40E-07

- Sabbia



Num	Codice	Campione	Profondità	Ciottoli %	Ghiaia %	Sabbia %	Limi %	Argilla %	L+A [%]	D60	D30	D10	K [m/s]
1	SB6a167620182	F	17,5	0	17	56	21	6	27	0,5	0,1	0,008	6,40E-07
2	SB6a168400497	A	3,1	0	29	67	4	0	4	0,5	0,2	0,1	1,00E-04
3	SB6a168400497	E	14,9	0	20	59	19	2	21	0,5	0,2	0,01	1,00E-06
4	SB6a168610750	D	12,5	0	15	79	6	0	6	0,05	0,02	0,005	2,50E-07
5	SB6a168610750	F	19,8	0	7	66	24	3	27	0,2	0,07	0,02	4,00E-06
6	SB6a168690924	D	12,5	0	20	51	25	4	29	0,7	0,07	0,007	4,90E-07
7	SB6a168690924	G	19,5	0	20	70	10	0	10	0,6	0,4	0,06	3,60E-05
8	SB6a168811300	F	17,4	0	35	51	13	1	14	0,8	0,2	0,05	2,50E-05
9	SB6a266089848	F	15,9	0	24	60	13	3	16	0,8	0,2	0,04	1,60E-05
10	SB6a266089848	G	17,9	0	3	79	15	3	18	0,2	0,1	0,02	4,00E-06
11	SB6a274769249	D	14	0	25	70	0	0	5	0,8	0,5	0,09	8,10E-05
12	SB6a275159162	C	9,9	0	65	30	0	0	5	5	1,5	0,1	1,00E-04
13	SB6b128831489	E	17,5	0	38	38	17	7	24	1,8	0,1	0,0039	1,50E-07
14	SB6b149880843	E	17,5	0	50	40	10	0	10	6	0,4	0,06	3,60E-05
15	SB6b150921221	D	14	0	10	74	12	4	16	0,47	0,15	0,01	1,00E-06
16	TB6b348194803	B	4,8	0	2,7	65,6	19,7	12	31,7	0,2	0,05	0,004	1,60E-07
17	SB6b440109876	H	17	0	3	97	0	0	0	0,55	0,25	0,12	1,40E-04
19	TB6b252345708	B	6,5	0	2,3	94,7	2	1	3	1	0,4	0,2	4,00E-04
20	SB6c210536970	C	17	0	3,74	92,98	0	0	3,28	0,79	0,35	0,16	2,60E-04
21	SB6c208117293	E	30	0	3,74	92,98	0	0	3,28	0,79	0,35	0,16	2,60E-04
22	SB6b343143776	F	16,7	0	2	92	6	0	6	0,3	0,2	0,09	8,10E-05
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
106	SB6c217196735	A	5,5	0	3,59	89,4	0	0	7,01	0,46	0,22	0,092	8,50E-05
107	SB6c208117293	C	17	0	3,59	89,4	0	0	7,01	0,46	0,22	0,092	8,50E-05
108	TB6b252515758	A	6,95	0	9,5	88,9	0,1	1,5	1,6	1	0,3	0,2	4,00E-04

- Ciottoli e ghiaia

Num	Codice	Campione	Profondità	Ciottoli %	Ghiaia %	Sabbia %	Limi %	Argilla %	L+A [%]	D60	D30	D10	K [m/s]
1	SB6a167620182	H	22,1	0	52	27	19	2	21	10	0,2	0,01	1,00E-06
2	SB6a168400497	C	9,9	0	56	36	8	0	8	8	0,8	0,08	6,40E-05
3	SB6a168610750	A	2,2	0	60	31	9	0	9	10	0,8	0,09	8,10E-05
4	SB6a168610750	B	6,8	0	47	36	16	1	17	5	0,2	0,02	4,00E-06
5	SB6a168610750	C	10,8	0	67	27	6	0	6	15	1	0,1	1,00E-04
6	SB6a266569675	A	2,65	0	69	25	6	0	6	10	2	0,6	3,60E-03
7	SB6a266629989	F	17,9	15	61	18	6	0	6	40	5	0,1	1,00E-04
8	SB6a267259484	A	3,9	0	63	28	9	0	9	8	2	0,1	1,00E-04
9	SB6a267259484	A	3,9	0	63	28	9	0	9	8	2	0,1	1,00E-04
10	SB6a274769249	F	18	0	62	31	0	0	7	8,6	0,8	0,09	8,10E-05
11	SB6a275619189	A	4	5	64	25	0	0	6	14	1,9	0,13	1,70E-04
12	SB6b128831489	C	10,5	0	51	33	13	3	16	7,8	0,3	0,038	1,40E-05
13	SB6b133430635	A	3,5	0	74	21	5	0	5	18	2	0,17	2,90E-04
14	SB6b135870145	E	17,5	0	66	28	6	0	6	13	1,2	0,12	1,40E-04
15	SB6b135870145	B	7	0	63	32	5	0	5	13	1,2	0,18	3,20E-04
16	SB6b135870145	A	3,5	0	62	32	6	0	6	11	0,7	0,14	2,00E-04
17	SB6b149880843	C	10,5	2	73	22	3	0	3	19	3	0,38	1,40E-03
18	SB6b149880843	B	7	0	67	29	4	0	4	9,5	1,5	0,29	8,40E-04
19	SB6b150730472	C	10,5	11	51	31	7	0	7	10	0,9	0,09	8,10E-05
20	SB6b150921221	A	3,5	0	74	21	5	0	5	18	4	0,31	9,60E-04
21	SB6b151011711	A	3,5	0	70	22	8	0	8	11	2	0,09	8,10E-05
22	SB6b151140348	E	17,5	3	72	18	7	0	7	27	5	0,17	2,90E-04
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
112	SB6b227588071	A	7,5	0	80	14	0	0	6	12,5	7	0,4	1,60E-03
113	SB6b227588071	B	11	0	77	17	0	0	6	11,7	6	0,12	1,40E-04
114	SB6b227588071	E	21,5	0	65	30	0	0	5	10	1	0,18	3,20E-04

## A2 Strumenti di modellazione idrogeologica: MIDAS GTS-Nx

Le gallerie delle linee metropolitane di Milano e del Passante ferroviario sono soggette a moti di filtrazione causati dalla presenza della falda.

Si è quindi ritenuto opportuno seguire l'approccio della modellazione matematica della filtrazione dell'acqua di falda nel terreno in presenza di un corpo impermeabile per poter quantificare l'ordine di grandezza dell'impatto che la presenza di un corpo impermeabile ha sul livello piezometrico.

Per effettuare la modellazione del fenomeno è stato utilizzato il software Midas GTS-NX, sviluppato da Midas Information Technology Co.Ltd, un potente software che permette di effettuare studi su analisi FEM agli elementi finiti ed opera sia in ambito 2D che 3D. Grazie alle sue caratteristiche è adatto per effettuare analisi in ogni settore dell'ingegneria geotecnica, attraverso questo software è possibile infatti effettuare differenti tipi di analisi come:

- Analisi meccanica dei terreni;
- Analisi degli sforzi 3D durante le fasi di costruzione;
- Analisi dell'interazione tra terreno e struttura;
- Analisi degli scavi;
- Analisi della stabilità dei pendii;
- Analisi dinamiche e sismiche;
- Analisi dei moti di filtrazione sia allo stato stazionario che durante il transitorio;
- Analisi dei consolidamenti e dei cedimenti.

Il campo di applicazione di GTS-Nx comprende qualunque tipo di opera che preveda l'interazione terreno-struttura, si spazia quindi da dighe e opere fluviali, a strutture di fondazione e di sostegno del terreno, a tunnel e gallerie delle metropolitane.

Il software è stato sviluppato in collaborazione con TNO-DIANA, società di R&D del gruppo TNO di Delft, questa collaborazione è strettamente legata all'università TU di Delft, il cui contributo è risultato essenziale nell'ambito della validazione dei modelli e dei solutori.

Nel seguente elaborato di tesi Midas GTS-Nx è stato utilizzato per la modellazione 3D dei tunnel delle linee della metropolitana nel territorio comunale di Milano e del volume di terreno considerato significativo per lo svolgimento delle analisi.

### **Motivazioni che hanno spinto all'utilizzo del software MIDAS GTS-Nx**

Uno dei vantaggi dell'utilizzo del software Midas Gts-Nx sta nella possibilità di effettuare analisi Seepage (filtrazione), attraverso le analisi di filtrazione è possibile simulare numericamente la presenza della falda nel terreno e l'effetto della sua interazione col terreno e con le strutture sotterranee in essa presenti.

Le analisi Seepage possono essere svolte sia allo stato stazionario che durante il transitorio, per poter considerare l'effetto del livello di falda in quanto funzione di superficie è necessario svolgere un'analisi nel transitorio utilizzando un intervallo di tempo di pochi secondi ed un solo passo, in

questo modo è possibile ovviare al problema e svolgere un'analisi di filtrazione allo stato stazionario fingendo di essere nel transitorio.

In questa appendice vengono trattate le caratteristiche degli strumenti di modellazione utilizzati all'interno dell'elaborato di tesi per analizzare criticamente la variazione del livello piezometrico indotta dalla presenza di corpi impermeabili al di sotto del livello di falda; si fornirà dapprima una breve introduzione circa le pratiche di modellazione idrogeologica comunemente utilizzate in ambito scientifico e di seguito verrà dato spazio all'illustrazione del codice di calcolo "MIDAS GTS-Nx" e "Surfer", gli strumenti di modellazione numerica utilizzati rispettivamente per modellare il flusso idrico e per ricostruire la piezometria dell'anno 2014 per i mesi di marzo e settembre.

### **A.1 Fondamenti di modellazione**

L'utilizzo di strumenti previsionali per la simulazione del flusso idrico e per la modellazione dell'interazione tra terreno e struttura è diventata una pratica sempre più diffusa nell'ultimo decennio.

La realizzazione di un modello idrogeologico affidabile non può essere eseguita senza una adeguata conoscenza geologica e idraulica del dominio analizzato.

Il primo passo nella modellazione idrogeologica è la costruzione di un modello concettuale del funzionamento del sistema acquifero, esso consiste nell'assunzione di certe ipotesi di lavoro (eterogeneità o isotropia, flusso idrico 2D, 3D,...) che riducono la complessità del sistema reale ad una versione semplificata che ne contenga le caratteristiche necessarie e sufficienti per gli obiettivi di modellazione. Per poter perseguire tale scopo è fondamentale una buona conoscenza dell'area in esame attraverso la consultazione della letteratura e l'esecuzione di indagini geognostiche ad hoc.

La fase di definizione del modello concettuale viene seguita dalla fase d'implementazione del modello idrogeologico vera e propria, la quale prevede l'individuazione dei limiti spaziali e temporali:

- Limiti spaziali:

- dominio: porzione di territorio che si intende rappresentare nel modello;

- condizioni al contorno: condizioni presenti lungo i bordi del dominio;

- Limiti temporali:

- Stazionario: i risultati delle simulazioni sono rappresentativi delle condizioni stazionarie, ovvero all'equilibrio, del sistema. La variabile temporale non gioca, quindi, alcun ruolo e gli scenari proposti possono essere considerati significativi di condizioni medie di equilibrio.

- Transitorio: i risultati delle simulazioni rappresentano l'evoluzione del sistema nel tempo. Risulta possibile seguire l'evoluzione del sistema durante il raggiungimento dell'equilibrio in seguito all'applicazione di una sollecitazione esterna.

Oltre a definire i limiti spaziali e temporali del dominio è necessario definire tutte le variabili interne al sistema idrogeologico come le proprietà idrauliche di ogni materiale che verrà utilizzato per la generazione delle mesh, caratterizzare la presenza di fiumi, laghi e corpi idrici che si trovano all'interno dell'area da modellizzare e definire i fenomeni causa di stress esterni al sistema come ad esempio drenaggi, emungimenti, ricariche ecc...

Infine si procede con la fase caratterizzante il processo modellistico, ovvero la scelta degli strumenti (metodi matematici, parametri di calcolo, procedure informatiche) da utilizzare per le simulazioni.

Attraverso la modellazione matematica è possibile simulare la distribuzione dei carichi piezometrici e del flusso idrico della falda attraverso la risoluzione di un sistema di equazioni in grado di rappresentare i processi fisici che avvengono nel sistema, descrivere i carichi o i flussi attraverso le condizioni ai limiti del modello e tenere conto della condizione iniziale se il problema dipende dal tempo.

La risoluzione di tale sistema avviene in termini numerici che prevedono la suddivisione del dominio di interesse in mesh per ogni elemento viene risolta in maniera iterativa l'equazione di flusso dalla quale si otterranno le soluzioni numeriche approssimate.

La risoluzione numerica delle equazioni di flusso è effettuata con l'aiuto di un calcolatore, in particolare l'insieme dei comandi utilizzati per risolvere un certo modello matematico costituiscono il programma o codice di calcolo.

In base alle caratteristiche che presenta il dominio oggetto di studio la risoluzione delle equazioni di flusso può avvenire con approcci differenti:

- 2D: presenza di una struttura idrogeologica semplice costituita da un solo acquifero;  
*(Soilworks non trattato nel seguente elaborato perché non utilizzato)*
- quasi 3D: presenza di una serie di acquiferi separati da strati con permeabilità di almeno due ordini di grandezza inferiore rispetto agli acquiferi. Gli strati impermeabili sono modellizzati attraverso un termine di infiltrazione verticale, in questo modo essi non rappresentano dei veri e propri strati nel dominio. Con questo tipo di approccio non viene considerata la componente orizzontale del flusso idrico all'interno del materiale impermeabile, tuttavia l'errore introdotto nel calcolo delle altezze piezometriche risulta di modesta entità.
- 3D: in presenza di una struttura idrogeologica complessa, non trattabile con approccio bidimensionale;

### **Formulazione agli elementi finiti**

Applicando le relazioni tra sforzi-deformazioni e deformazioni-sforzi dal principio dei lavori virtuali a causa della variazione di sforzo e usandolo come risultato di una condizione di vincolo nel principio di Hu-Washizu, che può essere espresso come:

$$\delta G_{ext} = \int_{\Omega} (\nabla \delta u)^T \sigma + \delta \varepsilon^T (\sigma(\varepsilon) - \sigma) + \delta \sigma^T (\nabla u - \varepsilon) d\Omega$$

$\delta G_{ext}$  : lavoro virtuale causato dalle forze esterne

$u$ : spostamento

$\sigma$ : sforzo

$\varepsilon$ : spostamento

$\sigma(\varepsilon)$ : sforzo calcolato dallo spostamento

$\nabla$ : operatore di relazione tra sforzo e spostamento

L'equazione illustrata sopra è la forma più generale che include le equazioni di equilibrio, le equazioni costitutive e le condizioni di compatibilità. Se la relazione tra sforzi e deformazioni si assume che siano soddisfatte dalle equazioni costitutive, questo risulta nel principio di Hellinger-Reissner come segue:

$$\delta G_{ext} = \int_{\Omega} (\nabla \delta u)^T \sigma + \delta \sigma^T (\nabla u - \varepsilon(\sigma)) d\Omega$$

Dove:

$\varepsilon(\sigma)$ : sono le deformazioni calcolate a partire dagli sforzi

Assumendo che la relazione tra  $\varepsilon$  e  $\nabla u$  è soddisfatta dalle condizioni aggiuntive, l'equazione diventa il principio generale dei lavori virtuali:

$$\delta G_{ext} = \int_{\Omega} (\nabla \delta u)^T \sigma(u) d\Omega$$

Limitiamo la regione di integrazione come un elemento singolo per applicare il principio dei lavori virtuali al metodo degli elementi finiti. Interpolando gli spostamenti  $u$  come funzione di forma con un singolo elemento ci da l'equazione seguente:

$$u^h = N d^e$$

Dove:

$N$ : è la funzione di forma

$d^e$ : grado di libertà del nodo dell'elemento

Usando la relazione sforzi-deformazioni  $\varepsilon^h = \nabla u^h = B d^e$ , il principio dei lavori virtuali per l'intero elemento può essere espresso come segue:

$$\delta G_{ext} = \delta d^T F = \delta d^T \left[ \sum \int_{\omega} B^T D B d\Omega \right] d = \delta d^T K d$$

Dove  $D$  è la matrice sforzi-deformazioni.

Nell'analisi lineare, la matrice di rigidezza totale  $K$  è indipendente dal grado di libertà totale del nodo  $d$ , e la rigidezza del singolo elemento  $K^e$  può essere espressa come segue:

$$\int_{\omega_e} B^T D B d\Omega$$

Questa equazione è utilizzabile per l'analisi di strutture elastiche in piccoli spostamenti, ma può essere anche applicato a analisi non lineari usando lo stesso principio. La formulazione agli elementi finiti per analisi di filtrazione e di consolidazione saranno spiegate in A.

## Elementi seepage

In GTS-Nx esistono diversi tipi di elementi seepage per analizzare la pressione dei pori in presenza di filtrazione sia in terreno saturo che insaturo. Questo paragrafo si focalizza sull'introduzione alle equazioni che governano il fenomeno basate sull'equazione di continuità, il processo di formulazione agli elementi finiti, i risultati ecc... sugli elementi seepage. L'equazione costitutiva e il modello idraulico per il terreno saturo sono spiegate al paragrafo modellazione matematica ().

### A.1.1 Equazione di governo

La concentrazione massica di acqua nel terreno è pari a  $\rho_w n S$ . Quando si considera l'equazione di continuità per la massa su un volume microscopico, la quantità di acqua che esce dal micro-volume corrisponde al cambio in concentrazione della massa.

$$\nabla^T (\rho_w \mathbf{q}) = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w n S)$$

Dove:

$n$ : è la porosità

$S$ : è il grado di saturazione

Il termine a destra dell'equazione sopra citata può essere scritto utilizzando la variazione nel tempo della densità dell'acqua, della saturazione e della porosità con il tempo.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_w n S) = n S \frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \rho_w n \frac{\partial S}{\partial t} + \rho_w S \frac{\partial n}{\partial t}$$

Poiché la variazione di porosità nel tempo non viene considerata nelle analisi seepage, questo termine può essere ignorato e si può applicare la legge di Darcy. La variazione di porosità viene tenuta in considerazione nella formulazione del processo di consolidamento degli elementi introdotta pocanzi.

La pressione dei pori viene considerata come una variabile da GTS-Nx nell'ambito delle analisi seepage e la legge di Darcy espressa in funzione della pressione dei pori può essere applicata per ottenere l'equazione di governo per le analisi di tipo seepage.

$$\frac{1}{\gamma_w} \nabla^T (\mathbf{k} \nabla p) - \nabla^T (\mathbf{k} \mathbf{n}_g) = \left( \frac{n S}{\rho_w} \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + n \frac{\partial S}{\partial p} \right) \frac{\partial p}{\partial t}$$

Dove:

$\mathbf{k}$ : è la matrice dei coefficienti di permeabilità

$\mathbf{n}_g$ : è il versore normale diretto come la gravità

Nelle analisi seepage stazionarie, la pressione nei pori non cambia col tempo e il termine in cui compare come derivata del tempo risulta essere nullo.

### A.1.2 Equazione agli elementi finiti

Applicando il metodo variazionale all'equazione di governo si ottiene l'espressione in forma integrale riportata di seguito:



$$\int_{\Omega} \frac{1}{\gamma_w} \nabla^T(\mathbf{k}\nabla p) d\Omega - \int_{\Omega} \nabla^T(\mathbf{k}\mathbf{n}_g) d\Omega + \int_{\partial q} q_{ext} dS = \int_{\Omega} \left( \frac{nS}{\rho_w} \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + n \frac{\partial S}{\partial p} \right) \frac{\partial p}{\partial t} d\Omega$$

In questo caso con  $q_{ext}$  viene indicata la velocità di flusso sulla superficie del modello. Interpolando la pressione nei pori usando la funzione di forma espressa come  $P = N_i(\mathbf{x})P_i$  che fornisce la seguente equazione non lineare per il tempo che include il termine differenziale della pressione nei pori.

$$\mathbf{C}(P_i)\mathbf{P} + \mathbf{K}(P_i)\mathbf{P} = \mathbf{R}(q_{ext}, \mathbf{n}_g)$$

Il termine integrale per la posizione del carico nell'equazione () è incluso come una forza interna.

### A.1.3 Tempo di integrazione

Il tempo di integrazione per il termine del tempo esistente nell'equazione consiste nell'approccio alle differenze finite e GTS-Nx applica il metodo delle differenze finite all'indietro. Il metodo delle differenze finite all'indietro è un metodo di integrazione implicito rispetto al tempo e permette di analizzare un lungo periodo di tempo e non occorrono oscillazioni della soluzione. L'equazione a cui è stato applicato il metodo delle differenze finite ha l'espressione seguente:

$$\frac{\mathbf{C}(P_i^{n+1}, P_i^n)}{\Delta t} (\mathbf{P}^{n+1} - \mathbf{P}^n) + \mathbf{K}(P_i^{n+1})\mathbf{P}^{n+1} - \mathbf{R}(q_{ext}, z) = 0$$

Nell'equazione qua sopra gli apici n e n+1 rappresentano i valori delle variabili al tempo  $t^{n+1}$ , con  $t^{n+1} = t^n + \Delta t$ . Per calcolare la soluzione al passo successivo per il tempo di integrazione applicando il metodo delle differenze all'indietro, necessita la soluzione al passo precedente. In ogni caso le condizioni iniziali sono necessarie per le analisi in transitorio e GTS-Nx usa la soluzione ottenuta nella condizione stazionaria come carico per il primo intervallo di tempo, o risulta necessario indicare il livello d'acqua come condizione iniziale per le analisi in transitorio.

Relazione con gli elementi strutturali

A differenza dei modelli di analisi strutturali, il carico di filtrazione e le condizioni al contorno di filtrazione necessitano di essere definite per il modello delle analisi seepage. A causa della somiglianza nel processo di modellazione tra le analisi di tipo strutturale e quelle di tipo seepage quando il carico di filtrazione può essere usato per far girare un'analisi di tipo seepage. La tabella seguente riporta una lista delle relazioni esistenti tra gli elementi strutturali e gli elementi seepage.

Tipologia di elemento seepage	Elemento strutturale
1D	Trave, travatura Sforzi piani,
2D	Deformazioni piane, Piastre, Solidi assialsimmetrici
3D	Solido

Ad eccezione delle connessioni rigide, gli altri elementi in tabella () simulano i legami di connessione con il grado di libertà della pressione nei pori. I collegamenti elastici agiscono come una molla per la differenza di pressione nei pori.

## Soluzione

Il software Midas GTS-NX lavora utilizzando un solutore di equazioni simultaneo per trovare la soluzione  $u$  del sistema lineare di equazioni che si presenta nella forma  $Ku = p$  il programma utilizza questo tipo di risolutore non solo per risolvere le analisi strutturali di tipo elastico lineare, ma anche per le analisi dinamiche, quelle non lineari ecc...

Il risolutore utilizza differenti modi di operare a seconda della tipologia: risolutore generico usa il metodo dell'eliminazione di Gauss, il risolutore diretto usa il metodo della decomposizione, e il risolutore iterativo, che converge ad una soluzione che minimizza il numero di iterazioni. Il risolutore diretto è utilizzato generalmente per le analisi strutturali perché non è affetto dalle proprietà numeriche delle matrici e può trovare la soluzione in di calcoli necessario per ottenere la convergenza potrebbe essere molto elevato. GTS NX ha una funzione che permette al software di capire se utilizzare il risolutore iterativo o quello diretto a seconda della dimensione del problema. Nel caso dei problemi da noi analizzati la dimensione del problema impone l'utilizzo del metodo iterativo.

Il risolutore iterativo è un metodo che riduce l'errore della soluzione approssimata attraverso calcoli iterativi e così, è molto importante ridurre l'errore di convergenza usando solo un piccolo numero di calcoli. Generalmente il numero di calcoli iterativi è determinato preconditionando il metodo. GTS NX usa il metodo SA (aggregazione lisciata) e AMG (multi griglia algebrica) che sono metodi per preconditionare che sono noti per essere stabili, indipendentemente dalla forma dell'elemento. Il numero di calcoli del metodo AMG non è influenzato dal numero di gradi di libertà perché usa una multi griglia, e questo metodo visualizza una convergenza stabile quando è usato sull'elemento che ha spostamenti e rotazioni nodali dei gradi di libertà come l'elemento a involucro. La multi griglia è composta automaticamente per il risolutore iterativo che usa il metodo AMG e è creato dai gradi di libertà rappresentativi del set di nodi adiacenti e da ogni set di nodi.

Quando la dimensione del problema aumenta, la capacità di memoria e di calcolo tende ad aumentare molto rapidamente. Da qui, il risolutore iterativo è raccomandato per problemi di dimensione elevata perché richiede relativamente meno capacità di memoria. Comunque per le analisi strutturali, il risolutore iterativo potrebbe non essere la soluzione voluta a causa delle proprietà numeriche delle matrici, e il numero iterativo

## A3 Profilo altimetrico linee metropolitane

### Linea rossa

STAZIONE	Profondità galleria
Sesto Marelli	10,38
Villa San Giovanni	9,73
Precotto	9,98
Gorla	10,37
Turro	10,09
Rovereto	10,3
Pasteur	10,63
Loreto	10,14
Lima	10,74
Porta Venezia	11,34
Palestro	10,16
San Babila	10,27
Duomo	12,47
Cordusio	10,91
Cairolì	10,13
Cadorna	10,31
Conciliazione	9,5
Pagano	9,63

STAZIONE	Profondità galleria
Buonarroti	9,5
Amendola	8,84
Lotto	10,96
QT8	13,86
Lampugnano	7,39
Uruguay	9,15
Bonola	7,37
San Leonardo	7,27
Molino Dorino	7,48

STAZIONE	Profondità galleria
Wagner	11,27
De Angeli	9,86
Gambara	10,1
Bande Nere	10,54
Primaticcio	10,4
Inganni	10,42
Bisceglie	10,65

## Linea Verde

STAZIONE	Profondità galleria
Cimiano	0
Udine	23,02
Lambrate	27,18
Piola	30,24
Loreto	31,28
Caiazzo	24,8
Centrale F.S.	25,6
Gioia	30,66
Garibaldi F.S.	25,32
Moscova	30,76
Lanza	28,4
Cadorna F.N	21
Sant'Ambrogio	25,54
Sant'Agostino	34,74
Porta Genova	26,32
Romolo	28,4
Famagosta	19,85
Abbiategrosso	14

## Passante Ferroviario

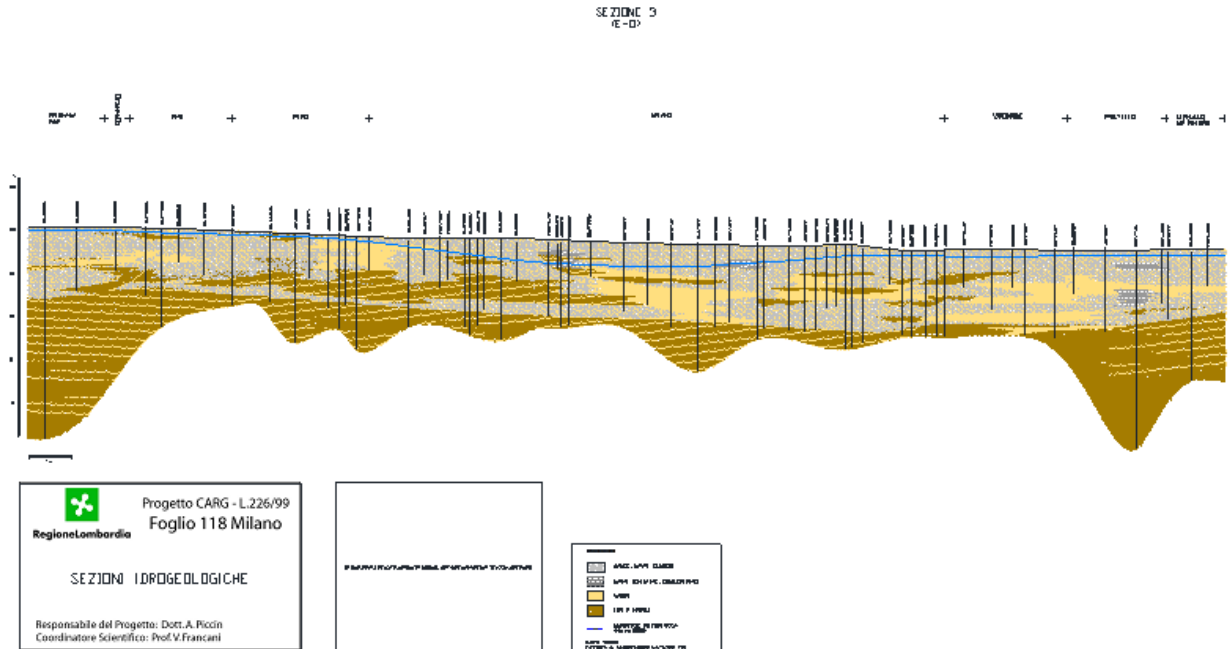
STAZIONE	Profondità galleria
CERTOSA	0
VILLAPIZZONE	0
LANCETTI	17,73
P.TA GARIBALDI	20,13
REPUBBLICA	19,69
P.TA VENEZIA	22,98
DATEO	19,61
P.TA VITTORIA	11,55
ROGOREDO	0

## Linea Gialla

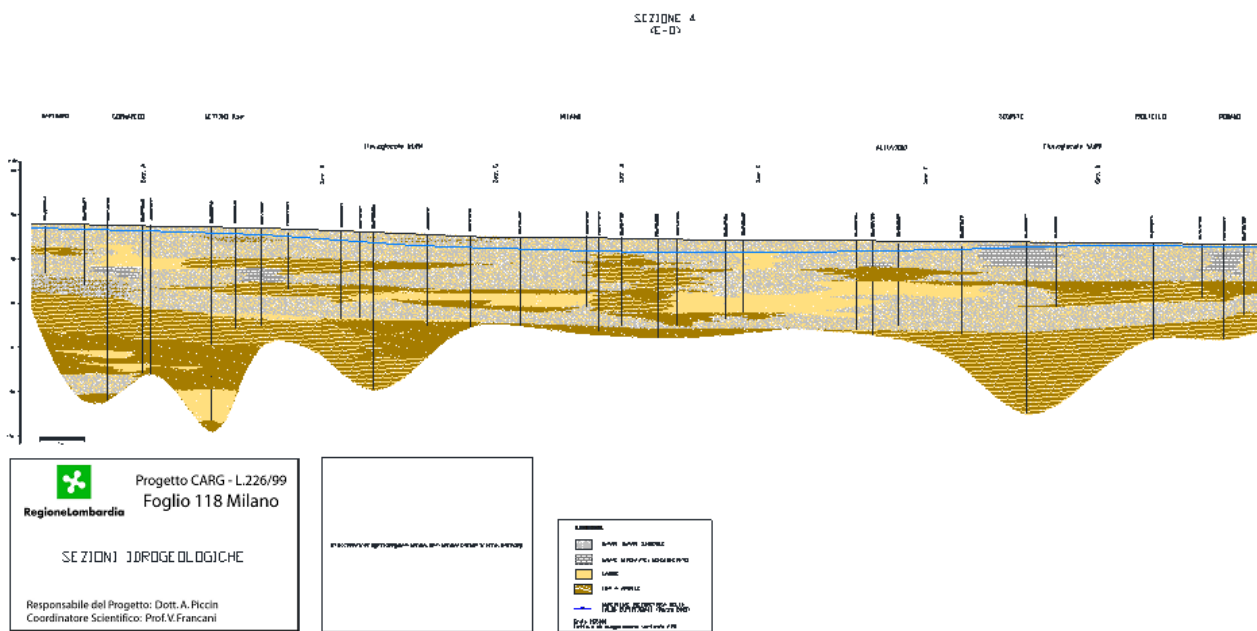
STAZIONE	Profondità galleria
Comasina	12,4
Affori F.N.	9,6
Affori Centro	16,8
Dergano	16,5
Maciachini	17
Zara	20,15
Sondrio	22,55
Centrale F.S	6,97
Repubblica	13,57
Turati	21,5
Montenapoleone	21,57
Duomo	25,05
Missori	21,89
Crocetta	22,4
Porta Romana	15,17
Lodi TIBB	16,93
Brenta	14,9
Corvetto	15,15
Porto di Mare	11,81
Rogoredo	10,49
San Donato	7,77

# A4 Sezioni Geologiche

- Sezione 3



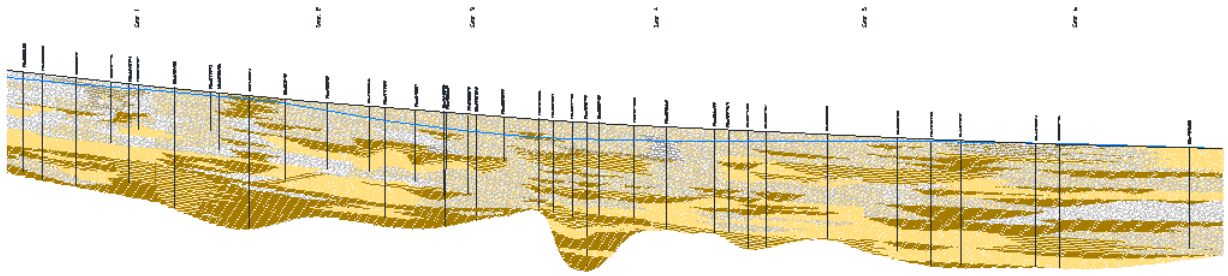
- Sezione 4







● Sezione C



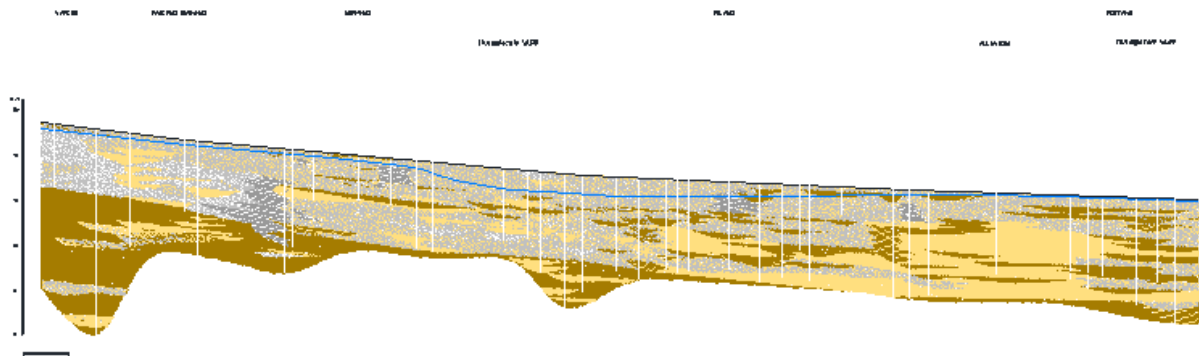

 Progetto CARG - L.226/99  
 Foglio 118 Milano


Responsabile del Progetto: Dott. A. Piccin  
 Coordinatore Scientifico: Prof. V. Francani



● Sezione D

SEZIONE D  
(N-S)




 Progetto CARG - L.226/99  
 Foglio 118 Milano  
 SEZIONI IDROGEOLOGICHE  
 Responsabile del Progetto: Dott. A. Piccin  
 Coordinatore Scientifico: Prof. V. Francani

a. Caratteristiche idrogeologiche per la zona di studio, in scala 1:50.000





## A6 Dati utilizzati per la costruzione delle carte della piezometria e della soggiacenza

### Piezometria marzo 2014

ID	x	y	valore
0150020005	1493700	5027237	112,72
0150090032	1506861	5042594	140,14
0150090035	1505759	5044226	151,66
0150110058	1510350	5028205	101,11
0150110059	1510375	5028240	102,35
0150140004	1536076	5047733	137,31
0150150001	1512870	5021817	92
0150150005	1512090	5023725	94,12
0150190001	1486563	5037866	139,88
0150240004	1507371	5020189	95,78
0150270001	1509260	5043610	138,05
0150270003	1510995	5045425	142,04
0150320001	1515240	5041885	123,6
0150360002	1508477	5029887	110,84
0150360006	1507897	5029842	104,89
0150700004	1526360	5041939	122,99
0150740007	1507180	5032490	112,9
0150770004	1517130	5043632	128,87
0150770022	1519395	5044677	131,3
0150810004	1521480	5042960	126,82
0150810069	1522264	5042813	127,43
0150980004	1513764	5043930	133,24
0150980028	1514126	5044416	133,12
0151461119	1513851,59	5033431,02	104,62
0151461120	1513610,37	5033962,67	105,12
0151461121	1513348,35	5034852,5	106,17
0151461161	1515881,71	5032742,35	107,05
0151461162	1513649,99	5033199,75	104,6
0151461288	1517571,22	5035994,69	106,57
0151461289	1517623,93	5035239,13	110,98
0151461312	1518960,77	5036549,61	108,7
0151461313	1519781,03	5037954,42	112,4
0151461353	1519822,14	5033800,43	104,41
0151461354	1519258,21	5032293,58	103,45
0151461374	1517469,95	5031721,33	102,63

0151461375	1519346,29	5030883,55	101,31
0151461376	1517524,42	5031740,5	102,67
0151461377	1515745,33	5030910,27	103,01
0151461378	1515314,08	5031525,74	102,97
0151461379	1518796,41	5029391,55	100,3
0151461417	1513793,68	5031879,27	103,98
0151461435	1509902,24	5031688,21	109,5
0151461463	1511991,39	5033353,17	105,95
0151461487	1506834,73	5034543,22	120,64
0151461488	1506962,84	5036027,37	126,07
0151461489	1505573,38	5032813,89	119,04
0151461495	1508272,01	5037642,89	123,71
0151461496	1506100	5037850	131,18
0151461534	1510139,11	5040214	126,8
0151461535	1509401,84	5038917,46	124,61
0151461536	1511891,28	5036706,24	111,64
0151461557	1514450	5036857	108,66
0151462382	1516272,11	5041236,72	122,42
0151462383	1514592,82	5040820,74	121,98
0151462384	1511200,94	5040602,23	126,81
0151462385	1512527,12	5040194,9	120,94
0151462386	1508425,47	5039875,67	131,75
0151462388	1504959,01	5038819,46	137,64
0151462389	1520300,03	5038569,05	114,37
0151462390	1512000,97	5037975,09	114,71
0151462391	1517863,07	5038009,92	111,42
0151462392	1520977,42	5035432,56	107,89
0151462393	1509374,4	5034985,9	114,58
0151462394	1519923,34	5032762,31	103,65
0151462396	1513682,54	5029342,17	102,36
0151462397	1517934,6	5028816,88	101,64
0151462399	1515042,02	5026669,48	98,24
0151570002	1510867	5042285	130,08
0151590004	1516913	5027004	94,4
0151660007	1514450	5046495	137,19
0151700005	1506621	5039129	130,94
0151710197	1522946	5032854	102,56
0151750006	1525252	5038044	113,01
0151750008	1525340	5039735	112,23
0151750289	1525039	5036171	109,9
0151790004	1499516	5042096	141,18
0151790005	1499516	5042096	142,27
015182003	1502403	5042708	151,14
0151920005	1520822	5030727	95,53
0152090014	1517917	5041639	122,35
0152090017	1517290	5042290	124,1
0152090021	1519200	5042715	126,34

CC	1516986	5034957	104,48
CC	1523770	5034057	104,7
CC	1523928	5036359	109,7
CC	1523531	5038423	114,7
CC	1525198	5031914	99,7
CC	1510911	5024373	99,7
CC	1509085	5026913	104,7
CC	1507736	5029374	99,7
CC	1505751	5030723	114,7
CC	1503608	5031835	119,7

**Piezometria settembre 2014**

ID	x	y	z
0150020005	1493700	5027237	112,42
0150090032	1506861	5042594	139,84
0150090035	1505759	5044226	151,36
0150110058	1510350	5028205	100,81
0150110059	1510375	5028240	102,05
0150140004	1536076	5047733	137,01
0150150001	1512870	5021817	91,7
0150150005	1512090	5023725	93,82
0150190001	1486563	5037866	139,58
0150240004	1507371	5020189	95,48
0150270001	1509260	5043610	137,75
0150270003	1510995	5045425	141,74
0150320001	1515240	5041885	123,3
0150360002	1508477	5029887	110,54
0150360006	1507897	5029842	104,59
0150700004	1526360	5041939	122,69
0150740007	1507180	5032490	112,6
0150770004	1517130	5043632	128,57
0150770022	1519395	5044677	131
0150810004	1521480	5042960	126,52
0150810069	1522264	5042813	127,13
0150980004	1513764	5043930	132,94
0150980028	1514126	5044416	132,82
0151461120	1513610,37	5033962,67	105,37
0151461121	1513348,35	5034852,5	105,07
0151461161	1515881,71	5032742,35	106,75
0151461162	1513649,99	5033199,75	114,1
0151461288	1517571,22	5035994,69	106,57
0151461289	1517623,93	5035239,13	110,48
0151461312	1518960,77	5036549,61	108,55
0151461313	1519781,03	5037954,42	111,9
0151461353	1519822,14	5033800,43	103,96
0151461354	1519258,21	5032293,58	103,15
0151461374	1517469,95	5031721,33	102,28

0151461375	1519346,29	5030883,55	100,51
0151461376	1517524,42	5031740,5	102,47
0151461377	1515745,33	5030910,27	102,21
0151461378	1515314,08	5031525,74	102,82
0151461379	1518796,41	5029391,55	99,7
0151461417	1513793,68	5031879,27	104,53
0151461435	1509902,24	5031688,21	109,1
0151461463	1511991,39	5033353,17	106,65
0151461487	1506834,73	5034543,22	120,69
0151461488	1506962,84	5036027,37	126,12
0151461489	1505573,38	5032813,89	118,89
0151461495	1508272,01	5037642,89	123,06
0151461496	1506100	5037850	130,98
0151461534	1510139,11	5040214	127
0151461535	1509401,84	5038917,46	104,53
0151461536	1511891,28	5036706,24	112,09
0151461557	1514450	5036857	109,16
0151462382	1516272,11	5041236,72	123,02
0151462383	1514592,82	5040820,74	122,23
0151462384	1511200,94	5040602,23	126,76
0151462385	1512527,12	5040194,9	121,44
0151462386	1508425,47	5039875,67	
0151462388	1504959,01	5038819,46	126,12
0151462389	1520300,03	5038569,05	113,97
0151462390	1512000,97	5037975,09	115,21
0151462391	1517863,07	5038009,92	111,77
0151462392	1520977,42	5035432,56	108,89
0151462393	1509374,4	5034985,9	114,68
0151462394	1519923,34	5032762,31	102,5
0151462396	1513682,54	5029342,17	103,96
0151462397	1517934,6	5028816,88	100,84
0151462399	1515042,02	5026669,48	98,89
0151570002	1510867	5042285	129,78
0151590004	1516913	5027004	94,1
0151660007	1514450	5046495	136,89
0151700005	1506621	5039129	130,64
0151710197	1522946	5032854	102,26
0151750006	1525252	5038044	112,71
0151750008	1525340	5039735	111,93
0151750289	1525039	5036171	109,6
0151790004	1499516	5042096	140,88
0151790005	1499516	5042096	141,97
015182003	1502403	5042708	150,84
0151920005	1520822	5030727	95,23
0152090014	1517917	5041639	122,05
0152090017	1517290	5042290	123,8
0152090021	1519200	5042715	126,04



CC	1503608	5031835	120
CC	1505751	5030723	115
CC	1507736	5029374	110
CC	1509085	5026913	105
CC	1510911	5024373	100
CC	1523531	5038423	115
CC	1523770	5034057	105
CC	1523928	5036359	110
CC	1525198	5031914	100

### Soggiacenza Marzo 2014

ID	x	y	z
0150090032	1506861	5042594	12,23
0150090035	1505759	5044226	14,34
0150110058	1510350	5028205	6,79
0150110059	1510375	5028240	5,55
0150140004	1536076	5047733	33,7
0150150005	1512090	5023725	6,41
0150190001	1486563	5037866	10,89
0150240004	1507371	5020189	3,88
0150270001	1509260	5043610	14,16
0150270003	1510995	5045425	18,59
0150320001	1515240	5041885	16,9
0150360002	1508477	5029887	6,89
0150360006	1507897	5029842	6,27
0150700004	1526360	5041939	12,38
0150740007	1507180	5032490	7,15
0150770004	1517130	5043632	16,73
0150770022	1519395	5044677	19,37
0150810004	1521480	5042960	11,7
0150810069	1522264	5042813	11,1
0150870003	1501081	5036901	5,92
0150970003	1502660	5033450	5,38
0150980004	1513764	5043930	17,24
0150980028	1514126	5044416	19,31
0151461119	1513851,59	5033431,02	11,25
0151461120	1513610,37	5033962,67	12,62
0151461121	1513348,35	5034852,5	13,39
0151461161	1515881,71	5032742,35	5,9
0151461162	1513649,99	5033199,75	10,63
0151461288	1517571,22	5035994,69	10,2
0151461289	1517623,93	5035239,13	6,11
0151461312	1518960,77	5036549,61	9,38
0151461313	1519781,03	5037954,42	6,9
0151461353	1519822,14	5033800,43	4,73
0151461354	1519258,21	5032293,58	4,58

0151461374	1517469,95	5031721,33	7,14
0151461375	1519346,29	5030883,55	3,17
0151461376	1517524,42	5031740,5	7
0151461377	1515745,33	5030910,27	5,9
0151461378	1515314,08	5031525,74	8,94
0151461379	1518796,41	5029391,55	3,1
0151461417	1513793,68	5031879,27	8,45
0151461435	1509902,24	5031688,21	4,7
0151461463	1511991,39	5033353,17	11,44
0151461487	1506834,73	5034543,22	4,53
0151461488	1506962,84	5036027,37	3,59
0151461489	1505573,38	5032813,89	3,38
0151461495	1508272,01	5037642,89	8,99
0151461496	1506100	5037850	4,45
0151461535	1509401,84	5038917,46	10,92
0151461536	1511891,28	5036706,24	13,86
0151461557	1514450	5036857	14,86
0151462382	1516272,11	5041236,72	14,88
0151462383	1514592,82	5040820,74	15,02
0151462384	1511200,94	5040602,23	14,19
0151462385	1512527,12	5040194,9	15,76
0151462386	1508425,47	5039875,67	5,05
0151462389	1520300,03	5038569,05	6,93
0151462390	1512000,97	5037975,09	15,59
0151462391	1517863,07	5038009,92	10,18
0151462392	1520977,42	5035432,56	3,31
0151462393	1509374,4	5034985,9	9,22
0151462394	1519923,34	5032762,31	3,65
0151462396	1513682,54	5029342,17	3,94
0151462399	1515042,02	5026669,48	3,66
0151570002	1510867	5042285	15,61
0151590004	1516913	5027004	3,2
0151700005	1506621	5039129	9,58
0151710197	1522946	5032854	2,94
0151750006	1525252	5038044	6,49
0151750008	1525340	5039735	12,77
0151750289	1525039	5036171	3,24
0151790004	1499516	5042096	13,82
0151790005	1499516	5042096	13,29
0151920005	1520822	5030727	7,98
0152090014	1517917	5041639	14,67
0152090017	1517290	5042290	16,19
0152090021	1519200	5042715	16,2
0152110005	1505114	5036454	7,18

Soggiacenza Settembre 2014

ID	x	y	z
0150090032	1506861	5042594	12,53
0150090035	1505759	5044226	14,64
0150110058	1510350	5028205	7,09
0150110059	1510375	5028240	5,85
0150140004	1536076	5047733	34
0150150005	1512090	5023725	4,59
0150190001	1486563	5037866	11,19
0150240004	1507371	5020189	4,18
0150270001	1509260	5043610	14,46
0150270003	1510995	5045425	14,9
0150320001	1515240	5041885	17,2
0150360002	1508477	5029887	7,19
0150360006	1507897	5029842	6,57
0150700004	1526360	5041939	12,68
0150740007	1507180	5032490	7,45
0150770004	1517130	5043632	17,03
0150770022	1519395	5044677	19,67
0150810004	1521480	5042960	12
0150810069	1522264	5042813	11,4
0150970003	1502660	5033450	5,78
0150980004	1513764	5043930	17,54
0150980028	1514126	5044416	19,61
0151461120	1513610,37	5033962,67	12,37
0151461121	1513348,35	5034852,5	13,19
0151461161	1515881,71	5032742,35	6,2
0151461162	1513649,99	5033199,75	11,73
0151461288	1517571,22	5035994,69	10,2
0151461289	1517623,93	5035239,13	6,61
0151461312	1518960,77	5036549,61	9,53
0151461313	1519781,03	5037954,42	7,4
0151461353	1519822,14	5033800,43	5,18
0151461354	1519258,21	5032293,58	4,88
0151461374	1517469,95	5031721,33	7,49
0151461375	1519346,29	5030883,55	3,97
0151461376	1517524,42	5031740,5	7,2
0151461377	1515745,33	5030910,27	6,7
0151461378	1515314,08	5031525,74	9,09
0151461379	1518796,41	5029391,55	3,7
0151461417	1513793,68	5031879,27	7,9
0151461435	1509902,24	5031688,21	5,1
0151461463	1511991,39	5033353,17	10,74
0151461487	1506834,73	5034543,22	4,48
0151461488	1506962,84	5036027,37	3,54
0151461489	1505573,38	5032813,89	3,53
0151461495	1508272,01	5037642,89	9,64
0151461496	1506100	5037850	4,65

0151461535	1509401,84	5038917,46	11,17
0151461536	1511891,28	5036706,24	13,48
0151461557	1514450	5036857	14,36
0151462382	1516272,11	5041236,72	14,28
0151462383	1514592,82	5040820,74	14,77
0151462384	1511200,94	5040602,23	14,24
0151462385	1512527,12	5040194,9	15,26
0151462386	1508425,47	5039875,67	7,55
0151462389	1520300,03	5038569,05	7,33
0151462390	1512000,97	5037975,09	15,09
0151462391	1517863,07	5038009,92	9,83
0151462392	1520977,42	5035432,56	2,31
0151462393	1509374,4	5034985,9	9,12
0151462394	1519923,34	5032762,31	4,8
0151462396	1513682,54	5029342,17	3,49
0151462399	1515042,02	5026669,48	3,01
0151570002	1510867	5042285	18,68
0151590004	1516913	5027004	2,28
0151700005	1506621	5039129	10,08
0151710197	1522946	5032854	3,18
0151750006	1525252	5038044	6,79
0151750008	1525340	5039735	13,07
0151750289	1525039	5036171	3,54
0151790005	1499516	5042096	13,49
0151920005	1520822	5030727	8,28
0152090014	1517917	5041639	14,97
0152090017	1517290	5042290	16,49
0152090021	1519200	5042715	16,5
0152110005	1501081	5036901	6,02
0150870003	1505114	5036454	7,48

## Bibliografia

1. Storia geologica dell'Italia, A. Desio
2. Note illustrative alla carta geologica d'Italia,
3. Progetto Qualfalda II,
4. Management of the London Basin Chalk Aquifer, Status report 2014
5. Groundwater flow around deep foundations, V. Francani, P. Gattinoni 2014
6. Groundwater basin recovery in urban areas and implications for engineering projects, J. Dean M. Sholley, IAEG2006 Paper number 693
7. Groundwater resource modelling for public water supply management in London
8. Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains, A. Lamé
9. Report on the damaging effects of water on tunnels during their working life
10. M. Andreoli, Programma di previsione e prevenzione dei rischi, rischio idraulico e idrogeologico, vol 1.2, 2013
11. XIV journées techniques du Comité français d'hydrogéologie: Dissolution du gypse à Paris, efficacité et carences de la réglementation, 2007
12. Remontées des nappes d'eau souterraine causes et effets, Giugno 1983
13. Le prise en compte des aléas géologiques dans la conception du tunnel EOLE, Balain A., Andre D. 2005
14. Rising groundwater levels in London and possible effects on engineering structures, Wilkinson B., 1985
15. Midas GTS-Nx Manual-Analysis reference,-Chapter 5-Algorithm
16. Geologia applicata, applicazione ai progetti di ingegneria civile, Scesi, Papini, Gattinoni CEA
17. Relazione sullo stato dell'ambiente del comune di Milano: Ciclo integrato delle acque, AA.VV., 2003
18. "Un po' di storia". I navigli lombardi, Bricchetti E.

## Sitografia

1. <http://www.naviglilombardi.it>
2. <https://vecchiamilano.wordpress.com/2011/07/14/i-canali-di-milano-1-parte/>
3. <https://vecchiamilano.wordpress.com/2011/07/14>
4. Nessuna fonte nel documento corrente./i-canali-di-milano-2-parte/
5. <https://vecchiamilano.wordpress.com/2011/04/21/l'olona-il-fiume-di-milano/>
6. [http://www.geoportale.regione.lombardia.it/metadati?p\\_p\\_id=PublishedMetadata\\_WAR\\_geoportalemetadataportlet&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=maximized&p\\_p\\_mode=view&PublishedMetadata\\_WAR\\_geoportalemetadataportlet\\_view=editPublishedMetadata&PublishedMetadata\\_WAR\\_geoportalemetadataportlet\\_uuid=%7BD9C55C94-1EEC-4467-98A8-F68B90C59504%7D&PublishedMetadata\\_WAR\\_geoportalemetadataportlet\\_editType=view&PublishedMetadata\\_WAR\\_geoportalemetadataportlet\\_fromAsset=true](http://www.geoportale.regione.lombardia.it/metadati?p_p_id=PublishedMetadata_WAR_geoportalemetadataportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&PublishedMetadata_WAR_geoportalemetadataportlet_view=editPublishedMetadata&PublishedMetadata_WAR_geoportalemetadataportlet_uuid=%7BD9C55C94-1EEC-4467-98A8-F68B90C59504%7D&PublishedMetadata_WAR_geoportalemetadataportlet_editType=view&PublishedMetadata_WAR_geoportalemetadataportlet_fromAsset=true)
7. <http://ambiente.provincia.milano.it/sia>
8. <http://www.idrogeologia.net/schede-idrogeologia/idrogeologia-teoria/coefficiente-permeabilita/figure/x01-valori-riferimento-orientativi-coefficiente-permeabilita.jpg.pagespeed.ic.QKNpdrs71g.jpg>

9. [http://www.cittametropolitana.mi.it/ambiente/acqua/acque\\_sotterranee/info\\_tecniche/ivello\\_falda/falda\\_provincia/archivio\\_mappe\\_tematiche.html](http://www.cittametropolitana.mi.it/ambiente/acqua/acque_sotterranee/info_tecniche/ivello_falda/falda_provincia/archivio_mappe_tematiche.html)
10. [http://www.milanofree.it/milano/storia/fontanili\\_milano.html](http://www.milanofree.it/milano/storia/fontanili_milano.html)
11. [http://www.metropolitanamilanese.it/pub/page/MM/passante\\_ferroviario](http://www.metropolitanamilanese.it/pub/page/MM/passante_ferroviario)
12. [http://www.metropolitanamilanese.it/pub/page/it/MM/metropolitane\\_milano](http://www.metropolitanamilanese.it/pub/page/it/MM/metropolitane_milano)
13. <http://www.sottomilano.it>