

10 – 14 maggio

CONFERENZA
ESRI ITALIA
2021
DIGITAL WEEK

Interferenze falda – infrastrutture sotterranee: analisi per la città di Milano

Davide Sartirana¹, d.sartirana1@campus.unimib.it

Mattia De Amicis¹, mattia.deamicis@unimib.it

Tullia Bonomi¹, tullia.bonomi@unimib.it

¹Università degli Studi di Milano Bicocca

Parole chiave: geodatabase 3D; DbT; GIS; modello concettuale

ABSTRACT

Il rapido aumento dell'urbanizzazione ha portato ad includere gli spazi sotterranei nelle politiche di pianificazione urbana. Tra le risorse del sottosuolo, negli ultimi decenni è emersa una forte interazione tra infrastrutture sotterranee e falda acquifera in molte città. Censire queste infrastrutture è dunque necessario a strutturare un modello concettuale urbano per gestire le acque sotterranee. Partendo dal DbT Topografico (Open Data), è stato adottato un approccio GIS per raccogliere le infrastrutture sotterranee in un geodatabase (GDB) 3D aggiornabile per la città di Milano. Sono state incluse nel GDB le volumetrie interrato occupate da: a) parcheggi privati, b) parcheggi pubblici, c) linee metropolitane e stazioni. L'applicazione del GDB ha consentito di stimare i volumi posti al di sotto della falda freatica in quattro periodi, identificati come minimi o massimi di falda dalle ricostruzioni dei trend piezometrici. A causa dell'innalzamento della falda, anche le infrastrutture sotterranee più superficiali sono state impattate in alcuni periodi considerati. Alcune aree identificate erano già state segnalate come critiche in un precedente studio: questo ha permesso di validare l'approccio adottato. La metodologia è risultata efficiente per la pianificazione urbana, in particolare per il modello concettuale urbano e la definizione dei piani di gestione delle acque sotterranee.

1. Introduzione

Gli ambienti urbani sono realtà complesse, dove una moltitudine di elementi interagiscono tra loro. Negli ultimi decenni, in conseguenza di una rapida crescita urbana e della necessità di rispettare alcuni obiettivi di sostenibilità, lo sviluppo delle città sta avvenendo tramite l'aumento della densità di popolazione e lungo la dimensione verticale (H.-Q. Li et al., 2013). Questo comporta, come conseguenza, una ricerca di spazi per le infrastrutture anche nel sottosuolo (Parriaux et al., 2004). Al fine di perseguire uno sviluppo urbano sotterraneo sostenibile, quattro risorse del sottosuolo sono fondamentali: spazio per le costruzioni, materiali, acqua ed energia. Queste risorse interagiscono tra loro; in particolare, è stata osservata in molte realtà urbane una forte interazione tra la falda acquifera e le infrastrutture sotterranee (Parriaux et al., 2004), per lo più riconducibile al fenomeno della dismissione industriale. Questo ha determinato situazioni di allagamento di alcune infrastrutture sotterranee, come metropolitane, parcheggi e scantinati. Tra le città soggette a questa problematica rientra anche la città di Milano, attesa nel prossimo decennio da un ulteriore sviluppo del sottosuolo, come stabilito dal Piano di Governo del Territorio (PGT, 2030).

2. L'esigenza

L'obiettivo di questo studio ha riguardato pertanto l'individuazione degli elementi infrastrutturali del sottosuolo maggiormente soggetti a problematiche di interferenza con la falda acquifera, quantificando le volumetrie impattate al fine di assicurarne una corretta gestione in ambito emergenziale. Tradizionalmente, questa problematica viene gestita tramite modellistica numerica di flusso 3D, impiegando codici di calcolo quali Modflow o Feflow. Mediante la realizzazione di scenari, tali strumenti permettono di gestire e

prevedere efficacemente gli effetti dei cambiamenti del sistema idrogeologico sul sistema antropizzato. La realizzazione di un modello numerico è però dispendiosa sia dal punto di vista economico che temporale (Vázquez-Suñé et al., 2005). Dunque, tramite questo progetto viene proposto un nuovo approccio, interamente realizzato in ambiente GIS (ArcMap 10.8.1), al fine di gestire la problematica in maniera affidabile ma al tempo stesso rapida, data l'importanza del fattore tempo in ambito emergenziale. Tale approccio non si pone come sostitutivo della modellistica numerica, bensì come strumento di supporto: l'applicazione preliminare rispetto al modello consentirebbe di migliorare la costruzione del modello concettuale del sistema idrogeologico urbano, individuando le aree più interessate da problematiche di interferenza, su cui effettuare analisi di dettaglio tramite la modellistica numerica.

3. La soluzione

L'approccio proposto (Fig.1) (Sartirana et al., 2020) si suddivide in quattro punti: 1) raccolta dati delle infrastrutture del sottosuolo; 2) costruzione di un geodatabase (GDB) 3D delle infrastrutture sotterranee; 3) ricostruzione della tavola d'acqua dell'acquifero freatico; 4) calcolo dei volumi delle infrastrutture sotterranee posti al di sotto della tavola d'acqua.

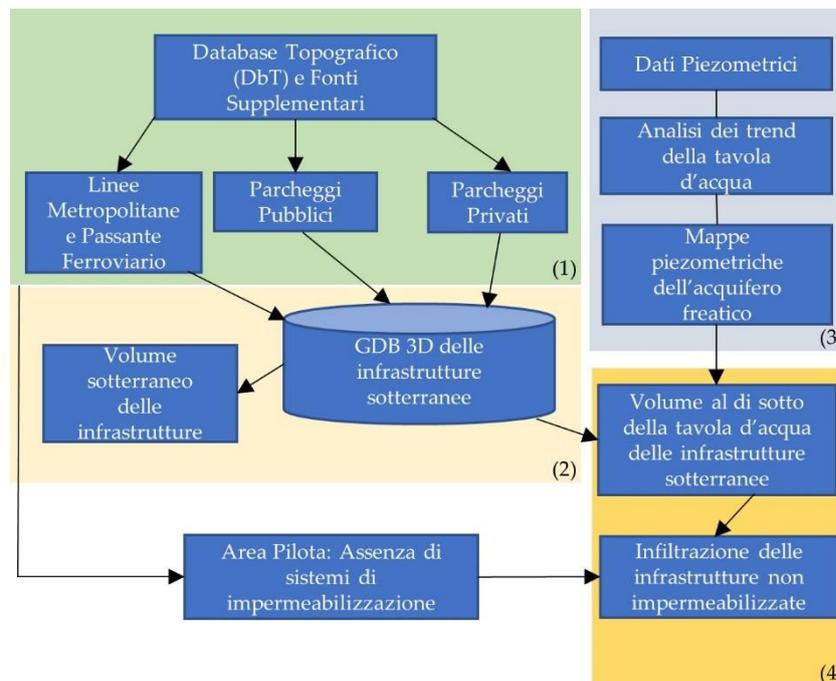


Figura 1: Diagramma di flusso della metodologia proposta.

3.1 Raccolta dati:

Il Database Topografico (DbT) è stato utilizzato come fonte primaria di informazione per la raccolta dei dati relativi a tre categorie di infrastrutture del sottosuolo: parcheggi privati; parcheggi pubblici (i.e. costruiti su suolo pubblico); linee metropolitane e passante ferroviario. Laddove necessario, altre fonti supplementari sono state impiegate per completare la raccolta dati e procedere con la costruzione del GDB 3D. La metodologia utilizzata è stata discussa in un precedente lavoro ("Metodologie per la costruzione di un DB 3D del sottosuolo per la Città di Milano" – Conferenza ESRI 2019), al quale si rimanda per maggiori dettagli.

3.2 Costruzione del GDB 3D:

I dati raccolti al punto 3.1 hanno permesso la creazione del GDB 3D per le tre categorie di infrastrutture sotterranee. I campi del GDB e le volumetrie complessive di ciascuna categoria sono presentati in Tabella 1.

Tabella 1. Campi del GDB e caratteristiche riassuntive delle infrastrutture del sottosuolo.

Nome	X (ESPG: 3003)	Y (ESPG: 3003)	Quota Bottom (m s.l.m)	Profondità (m)	Area *10 ⁹ (m ²)	Volume *10 ⁹ (m ³)
Totale Parcheggi Privati: 11283	1503537.83 - 1521368.25	5027525.88 - 5042413.91	95.54 - 140.92	5	0.01 - 92.6	45100.96
Totale Parcheggi Pubblici: 126	1505988.24 - 1520604.48	5030521.49 - 5041573.99	96.45 -132.14	5 - 20	0.45 - 22.27	5157
Totale Elementi Linee MM: 388	1506665.12 - 1521982.92	5030584.56 - 5043347.46	86.14 -132.54	5.5 - 30.98	0.04 - 39.02	13702.67

3.3 Ricostruzione della tavola d'acqua dell'acquifero freatico:

Per ciascuno dei piezometri disponibili è stato ricostruito il trend piezometrico, al fine di identificare un minimo assoluto (m.a.), un minimo relativo (m.r.), un massimo assoluto (M.A.) ed un massimo relativo (M.R.) del livello di falda, in un periodo compreso tra Gennaio 1990 e Dicembre 2019. I carichi idraulici dei piezometri disponibili sono stati interpolati utilizzando il kriging universale, data la presenza di un trend piezometrico nell'area in esame (NO-SE) (Isaaks and Srivastava, 1989). Per la realizzazione delle interpolazioni è stato utilizzato il Geostatistical Analyst presente in ArcMap: ciò ha consentito di controllare il processo di interpolazione, considerando le conoscenze dell'analista (expert knowledge), limitando quindi l'approccio blackbox tipico di altri software di interpolazione geostatistica. I quattro periodi individuati sono: Gennaio 1990 (Gen90, m.a.); Dicembre 2002 (Dic02, M.R.); Settembre 2007 (Set07, m.r.); Dicembre 2014 (Dic14, M.A.).

3.4 Volumi al di sotto della tavola d'acqua:

Combinando i risultati dei passaggi precedenti, i volumi al di sotto della falda freatica e la loro variazione nel tempo sono stati quantificati attraverso un'analisi spaziale dei dati disponibili ("Polygon Volume" e "Surface Difference"). Polygon Volume è stato utilizzato per quantificare i volumi al di sotto della falda per parcheggi privati e pubblici, mentre Surface Difference è stato utilizzato per le linee metropolitane e il passante ferroviario. La quota del bottom delle infrastrutture sotterranee è stata considerata come limite di riferimento per quantificare il volume di un'infrastruttura posto al di sotto della falda. In Figura 2 sono riportati esclusivamente i risultati per il mese di Set07 (Fig.2a), e per il mese di Dic14 (Fig.2b): essendo i periodi con il maggior numero di infrastrutture costruite, ciò agevola il confronto tra le due condizioni (m.r. e M.A.).

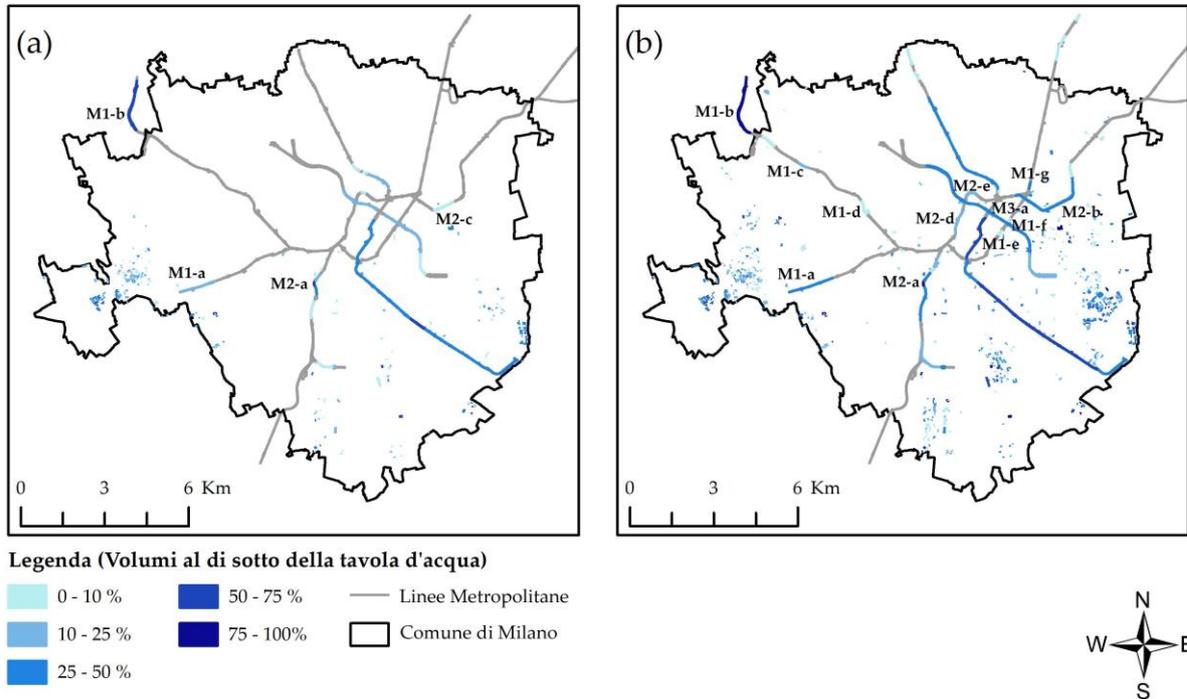


Figura 2: Volumi al di sotto della tavola d'acqua per il mese di Set07 (a) e Dic14 (b). La scala cromatica indica le percentuali dei volumi al di sotto della falda freatica.

Per i parcheggi privati, a Set07 (Fig.2a) la maggior parte dei volumi al di sotto della falda erano concentrati nella parte Ovest dell'area di studio; per Dic14 (Fig.2b), la quantità totale di volumi al di sotto della falda è aumentata, interessando anche la porzione Sud-Est dell'area.

Per i parcheggi pubblici, nella parte Nord dell'area, la maggior parte dei parcheggi si sviluppa su due piani interrati; siccome la zona insatura dell'acquifero è più ampia che a Sud, sono pochi i parcheggi interessati da un'interazione con la falda.

Al contrario, nella parte meridionale della città, più volumi di parcheggi si trovano al di sotto della falda (Fig.2). In particolare ad Ovest, dove la profondità dei parcheggi è limitata a due piani, alcuni volumi al di sotto della falda sono emersi solo durante il periodo massimo. In centro, invece, i parcheggi possono avere fino a sei piani. Data la loro profondità, volumi al di sotto della falda sono emersi per diversi parcheggi anche per Set07. Nella parte Sud dell'area la maggior parte dei parcheggi ha uno o due piani, mentre solo in pochi casi raggiunge i tre piani. Nell'ultimo caso, l'analisi ha mostrato volumi al di sotto della falda sia in condizioni minime che massime.

Per quanto riguarda la linea metropolitana M1, il suo tratto più a Ovest, nei pressi della stazione di Bisceglie (M1-a, Fig.2), si è trovato frequentemente al di sotto della falda. Volumi al di sotto della falda sono stati individuati anche nel tratto più a Nord della linea, tra le stazioni di Rho Fiera e Pero (completate nel 2005) sia a Set07 che per Dic14 (M1-b, Fig.2). Inoltre, a Dic14, sono emerse altre situazioni critiche: nei tratti nord della linea, tra le stazioni di Bonola e Uruguay (M1-c, Fig.2b), e tra QT8 e Lotto (M1-d, Fig.2b); nella zona centrale tra Palestro e Porta Venezia (M1-e, Fig.2b), Porta Venezia e Lima (M1-f, Fig.2b) e tra Loreto e Pasteur (M1-g, Fig.2b).

Per la linea M2, il tratto attorno alla stazione Sant'Agostino (M2-a, Fig.2, Fig.3) è risultato il più critico per tutti i periodi considerati. Tra Loreto e Udine (M2-b, Fig.2b), in particolare tra le stazioni di Piola e Lambrate (M2-c, Fig.2a), sono emerse criticità nei periodi di massimo della falda. In tali periodi sono emersi volumi

10 - 14 maggio

CONFERENZA
ESRI ITALIA
2021
DIGITAL WEEK

al di sotto della falda anche in zona centrale tra Lanza e Moscova (M2-d, Fig.2b), e tra Garibaldi e Gioia (M2-e, Fig.2b).

Ad eccezione delle stazioni Centrale e Repubblica (M3-a, Fig.2b), situate in centro città, la parte centrale della linea M3 si è sempre trovata al di sotto della falda. Una situazione simile si riscontra per il tratto Sud della linea.

Per il passante ferroviario, così come per la linea M3, sono stati individuati volumi al di sotto della falda lungo la maggior parte della linea.

L'analisi non è stata condotta per le linee M4 (inaugurazione 2021-2023) e M5 (inaugurazione 2015), perché costruite successivamente ai periodi individuati. I risultati emersi per le linee metropolitane sono coerenti con quanto discusso da Colombo (1999), che aveva identificato le aree M1-a, M1-c, M1-g, M2-a, M2-c ed M2-e come le zone possibilmente più critiche per le interazioni tra falda e infrastrutture.

4. Il cambiamento

Il GDB ha permesso di raccogliere, partendo dagli Open Data, dati urbani generalmente provenienti da fonti diverse (istituzioni, stakeholders, Enti pubblici e privati), standardizzando le loro differenze, creando un elenco dettagliato delle infrastrutture sotterranee. Grazie alla sua struttura aggiornabile, i dati disponibili con il tempo saranno rapidamente integrati con le informazioni già esistenti, garantendone un corretto impiego sia in ambito urbanistico che idrogeologico.

In futuro, l'integrazione del GDB con i modelli numerici di flusso consentirà di definire, come già reso possibile preliminarmente tramite questo approccio GIS, scenari di interazione secondo l'andamento dei livelli piezometrici. Gli elementi infrastrutturali hanno un effetto sia attivo che passivo sulle acque sotterranee; ciò contribuisce a caratterizzare le aree urbane come un settore specifico dell'idrogeologia, con propri tempi, scale e dinamiche idrogeologiche. Pertanto, queste informazioni devono essere analizzate e combinate insieme al vasto insieme di caratteristiche geologiche, idrologiche e geomorfologiche (Kresic and Mikszewski, 2012) necessarie per definire un modello concettuale urbano completo: questo è un passo importante, poiché il modello concettuale è la base di un adeguato piano di gestione delle acque sotterranee. Utilizzando un GDB 3D standardizzato, la revisione del modello concettuale urbano, dispendiosa sia in termini di tempo che economici (Vázquez-Suñé et al., 2005), non dovrebbe avvenire frequentemente.

L'implementazione di una visione 3D dei volumi al di sotto della falda nel tempo (Fig. 3) si è rivelata uno strumento utile per meglio comprendere questa problematica: un maggiore impiego di questi strumenti garantirà sia una visione 3D completa del sottosuolo che una corretta pianificazione urbana. L'uso del GDB in un sistema accoppiato 3D GIS - modelli numerici sarà quindi efficiente per pianificare una gestione sostenibile e integrata non solo della falda acquifera ma di tutte le risorse sotterranee, aiutando le autorità locali nel loro ruolo decisionale. A tal fine, l'utilizzo di strumenti come i servizi WebGIS permetterebbe di divulgare efficacemente ai decisori politici le informazioni disponibili.

Inoltre, una facile identificazione delle principali infrastrutture sotterranee aiuterà a superare la mancanza di coordinamento, di pianificazione e di comprensione tra i diversi stakeholders, evitando così di compromettere il potenziale delle risorse sotterranee. Considerando lo sviluppo urbano dichiarato nel PGT, il GDB contribuirebbe a mantenere il potenziale sotterraneo, garantendo una gestione adeguata e sostenibile a lungo termine dello spazio sotterraneo urbano.

10 - 14 maggio

CONFERENZA
ESRI ITALIA
2021
DIGITAL WEEK

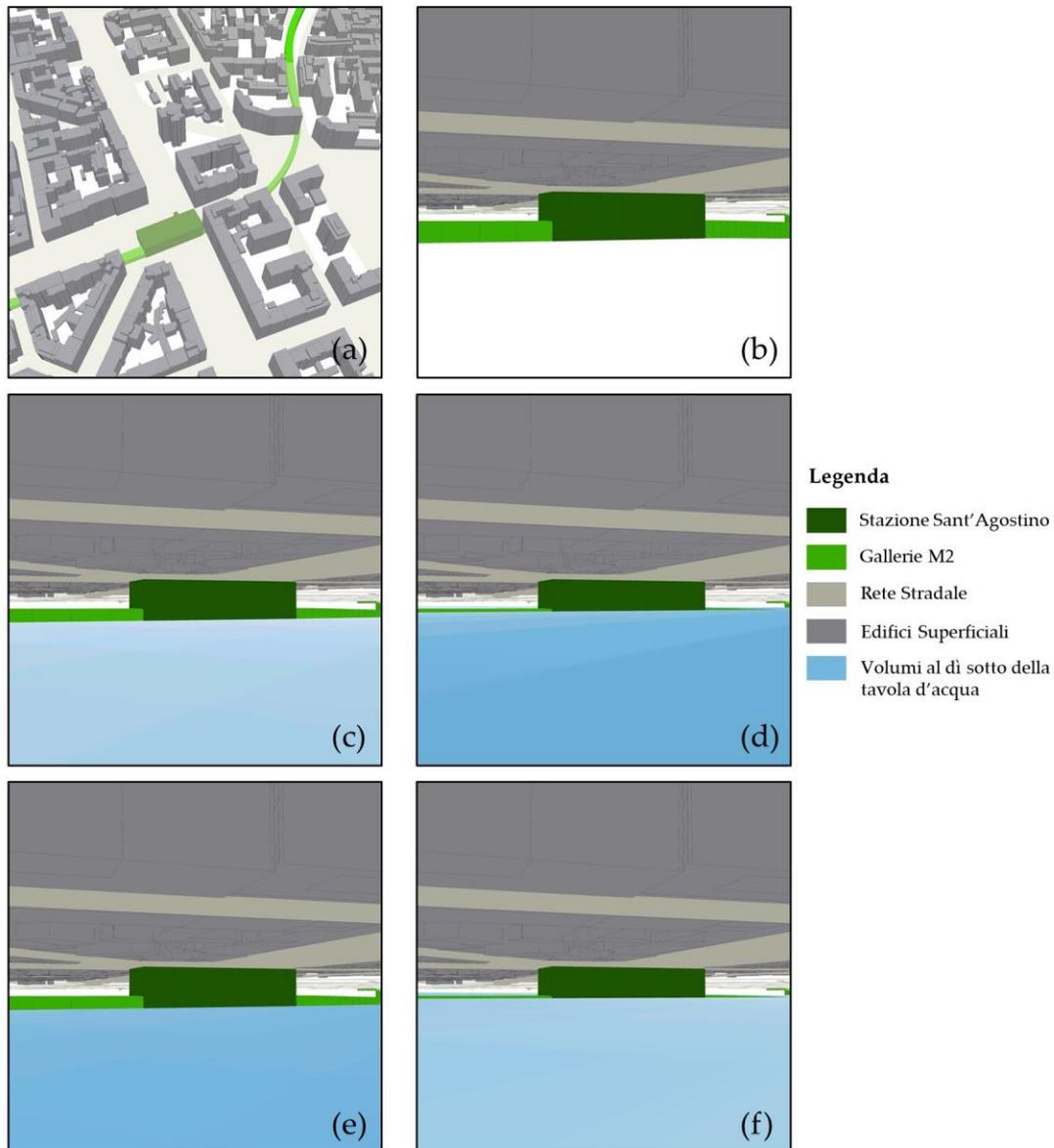


Figura 3: (a) Ricostruzione 3D in prossimità della stazione di Sant'Agostino. La stazione è visibile sotto la rete stradale. (b) Ricostruzione 3D sotterranea della stazione di Sant'Agostino. Volumi al di sotto della tavola d'acqua per (c) Gen90, (d) Dic02, (e) Set07, (f) Dic14. (Immagini realizzate con ArcGIS Pro).

Ringraziamenti

Si ringrazia Metropolitana Milanese Spa per la concessione dei dati sui profili altimetrici delle linee metropolitane e del passante ferroviario e dei dati piezometrici per la ricostruzione dei trend piezometrici e delle mappe piezometriche.

Riferimenti

- Colombo, A., 1999. Milano e l'innalzamento della falda. Cave e Cantieri.
- Isaaks, E.H., Srivastava, R.M., 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford Univ. Press. New York.
- Kresic, N., Mikszewski, A., 2012. Hydrogeological conceptual site models: data analysis and visualization. CRC press.
- Li, H.-Q., Parriaux, A., Thalmann, P., Li, X.-Z., 2013. An integrated planning concept for the emerging underground urbanism: Deep City Method Part 1 concept, process and application. Tunn. Undergr. Sp. Technol. 38, 559–568. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.04.010>
- Parriaux, A., Tacher, L., Joliquin, P., 2004. The hidden side of cities - Towards three-dimensional land planning. Energy Build. 36, 335–341. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.026>
- Sartirana, D., Rotiroti, M., Zanotti, C., Bonomi, T., Fumagalli, L., De Amicis, M., 2020. A 3D geodatabase for urban underground infrastructures: implementation and application to groundwater management in Milan metropolitan area. ISPRS Int. J. Geo-Information 9. <https://doi.org/10.3390/ijgi9100609>
- Vázquez-Suñé, E., Sánchez-Vila, X., Carrera, J., 2005. Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch of hydrogeology, with reference to Barcelona, Spain. Hydrogeol. J. 13, 522–533. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0360-2>