

POLITECNICO DI TORINO
Corso di Laurea Magistrale
in Architettura Costruzione Città

Tesi di Laurea Magistrale

INTEROPERABILITÀ GIS-BIM PER LA REALIZZAZIONE DEL 'DIGITAL TWIN'
DELL' AREA URBANA DI MIRAFIORI



Relatrice:

Prof. ssa Anna Osello

Candidato:

Giovanni Chionetti

Correlatrice:

Dott. ssa Daniela De Luca

Anno Accademico 2019/2020

ABSTRACT

Considerato il rapido sviluppo che le città stanno vivendo in termini di popolazione, dimensioni e consumo energetico, una gestione efficiente e adeguata della città è di grande necessità. In quest'ottica nasce il concetto di 'digital twin' urbano. Un 'digital twin' per una città è una replica virtuale della stessa, basata sulla rappresentazione digitale delle reti urbane come sistema di alimentazione generato dall' utilizzo di dati reali, ottenuti dai dispositivi di monitoraggio all'interno della città. Il concetto di gemello digitale è nato con la rappresentazione virtuale di oggetti specifici come le turbine eoliche, in cui viene sviluppato un modello virtuale basato sulla turbina fisica al fine di ottimizzarne le prestazioni e il rapporto costo-efficacia. Per quanto riguarda la città, l'uso crescente dell'"Internet of Things" (IoT) e la conseguente riduzione del costo della tecnologia stanno facilitando l'implementazione dei futuri 'digital twin', grazie a un sostanziale aumento della condivisione delle informazioni.

Il presente lavoro propone l'utilizzo della metodologia BIM integrata al sistema GIS per la realizzazione del gemello digitale dell'area urbana di Mirafiori, storico quartiere operaio della periferia sud di Torino.

Viene analizzato il contributo che il BIM e il GIS possono apportare singolarmente nella costruzione di un 'digital twin' unitamente alle necessità e ai risultati dell'utilizzo congiunto dei due metodi. Ne viene quindi studiato il grado di interoperabilità presentando le criticità affrontate e i diversi metodi utilizzati per superarle.

INDICE

ABSTRACT	2
INTRODUZIONE	5
Capitolo 1. Stato dell'Arte	7
1.1 Storia del digital twin	
1.1.1 Definizioni	
1.1.2 Caratteristiche	
1.2 Digital twin in ambito urbano	
1.2.1 Smart city	
1.2.2 Digital twin urbano	
1.2.3 Casi studio	
Capitolo 2. Metodologia	29
2.1 Il GIS	
2.1.1 Breve storia del GIS	
2.1.2 Definizioni	
2.1.3 Software	
2.2 il BIM	
2.2.1 Breve storia del BIM	
2.2.2 Definizioni	
2.2.3 Software	
2.3 Interoperabilità GIS-BIM	
Capitolo 3. Caso studio	51
3.1 Mirafiori	
3.2 Data collection	
3.3 Creazione modello GIS	
3.3.1 Unione modelli GIS	
3.3.2 Applicazione strumenti di analisi urbana	

3.4 Creazione modello BIM

3.4.1 Lettura delle geometrie tramite un'interfaccia di programmazione grafica

3.4.2 Lettura dei parametri alfanumerici

3.4.3 Importazione dei dati ottenuti dalle analisi GIS

3.4.4 Creazione di filtri vista per la visualizzazione del modello

Capitolo 4. Data visualization 70

Capitolo 5. Analisi critica di processo 75

Conclusioni e sviluppi futuri 78

Bibliografia e sitografia 80

Ringraziamenti

INTRODUZIONE

Secondo l'ONU nel 2008 la metà della popolazione globale viveva in aree urbane. Nel 2050 si stima che la percentuale salirà al 66% con l'affermarsi entro il 2030 di 43 megalopoli con oltre 10 milioni di abitanti, la maggior parte dei quali abitanti delle regioni in via di sviluppo¹.

Le criticità che questa urbanizzazione estrema porta con sé sono traffico, scarsità di risorse, mancanza di aree verdi, deterioramento delle infrastrutture, effetti negativi sulla salute umana, gestione dei disastri naturali, gestione dei rifiuti, consumo di energia e inquinamento dell'aria, ecc.

Allo stesso tempo però è stato dimostrato come una grande densità urbana, se supportata da corretti sistemi di gestione, possa ottenere risultati migliori di aree a bassa densità per quanto riguarda il consumo di terreni agricoli, spreco di energia e risorse, accessibilità e segregazione sociale.

E' opinione condivisa quindi che all'interno della città, e non attraverso il suo abbandono, saranno combattute le sfide fondamentali del nostro secolo². Per affrontarle è necessario un nuovo modello di città che sia la soluzione, non più il problema, di problemi su scala urbana e globale.

Con questi presupposti nasce negli anni '90 il concetto di 'smart city', una città che attraverso l'utilizzo delle nascenti tecnologie sapesse adattarsi e rispondere in anticipo alle necessità dei suoi cittadini, in termini di qualità della vita e di sostenibilità.

Attraverso i recenti e continui sviluppi di nuove tecnologie, 'Internet of Things', 'cloud computing', intelligenza artificiale e 'machine learning', è stato esteso all'ambito urbano uno strumento utilizzato da alcuni anni dalle aziende leader della produzione industriale e della tecnologia: il 'digital twin'.

Questo strumento, che ha le sue radici concettuali nelle sperimentazioni della NASA, in termini generali indica la rappresentazione virtuale di un'entità fisica, con cui comunica in tempo reale attraverso interazioni bidimensionali, andando a formare un sistema olistico, in cui la parte fisica e quella virtuale si promuovono e evolvono reciprocamente.

L'apporto che questo strumento può dare nella formazione di una 'smart city' è ampiamente riconosciuto e le possibilità che esso comprende, simulazione dei

¹ ONU (2014)

² ibidem

movimenti di persone e l'evacuazione di emergenza, rappresentazione dei rischi di alluvione, progettazione di edifici intelligenti, gestione dell'energia attraverso il rilevamento delle occupazioni, ecc., sono praticamente illimitate.

Uno strumento utile alla realizzazione di un 'digital twin' urbano è sicuramente l'utilizzo integrato dei metodi BIM e GIS.

Questi due sistemi nascono e si sviluppano da presupposti diversi e quindi la loro interoperabilità, ossia l'utilizzo fluido e congiunto dei due sistemi, non è ottimale. E' nell'interesse comune colmare queste lacune per la realizzazione di uno strumento ritenuto fondamentale per la creazione di un 'digital twin' urbano e quindi di una 'smart city'.

La presente trattazione, attraverso la modellazione di un basilare 'digital twin' dell'area urbana di Mirafiori Torino, testa la funzionalità di un metodo di interoperabilità fra GIS e BIM in cui quest'ultimo è la destinazione finale del processo. Questa metodologia, in cui il sistema principale è il BIM, non presenta molti esempi di ricerca, ma è un'opzione valida che merita ulteriori approfondimenti.

La tesi del presente lavoro è capire in che modo e con quali risultati si riescono a convertire dati GIS in un ambiente di lavoro BIM.

Viene presentato il processo utilizzato, che comprende l'impiego di una piattaforma di programmazione visiva, dalla collezione dei dati fino alla visualizzazione dei risultati finali.

Al termine viene fatta un'analisi critica del grado di interoperabilità del processo, esponendo gli aspetti positivi e le criticità affrontate.

Viene quindi fatta una panoramica conclusiva del lavoro e di quali possano essere gli sviluppi futuri rispetto alle tematiche affrontate.

CAPITOLO 1. Stato dell' Arte

1.1 Digital Twin

1.1.1 Storia del concetto di 'digital twin'

E' riconosciuto che il concetto di 'digital twin' sia stato introdotto dal Dott. Michael Grieves nel 2003, durante il corso di Product Lifecycle Management all'Università del Michigan

³ ⁴. Tale concetto, presentato all'epoca come "a virtual, digital equivalent to a physical product"⁵ conteneva già tutti gli elementi fondamentali: spazio reale, spazio virtuale e diffusione di dati e informazioni tra spazio reale e virtuale. Mentre la terminologia cambierà nel corso degli anni, questi aspetti resteranno costanti e comuni alle diverse definizioni. Il concetto definito da Grieves infatti comparirà ufficialmente come 'digital twin' soltanto nel 2010, utilizzato da John Vickers in un 'Roadmap Report'⁶ ⁷ della NASA. Seguirà nello stesso anno un altro 'Roadmap'⁸ in cui vengono tracciati gli sviluppi futuri della modellazione e della simulazione dei veicoli. In questo report il DT viene così definito:

"A Digital Twin is an integrated multiphysics, multiscale simulation of a vehicle or system that uses the best available physical models, sensor updates, fleet history, etc., to mirror the life of its corresponding flying twin. The Digital Twin is ultra-realistic and may consider one or more important and interdependent vehicle systems, including propulsion/energy storage, avionics, life support, vehicle structure, thermal management/TPS, etc. Manufacturing anomalies that may affect the vehicle may also be explicitly considered.

In addition to the backbone of high-fidelity physical models, the Digital Twin integrates sensor data from the vehicle's on-board Integrated Vehicle Health Management (IVHM) system, maintenance history and all available historical/fleet data obtained using

³ Grieves M., *Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication*. White paper. Melbourne, FL: Florida Institute of Technology, 2014

⁴ Qiu C., Zhou S., Liu Z., Gao Q., & Tan J., *Digital assembly technology based on augmented reality and digital twins: a review*. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 1(6), 597–610, 2019

⁵ Grieves M., op.cit.

⁶ Piascik R., DRAFT: Materials, Structures, Mechanical Systems, and Manufacturing Road Map, Technology Area 12, NASA Office of Chief Technologist, 2010

⁷ Grieves M., op.cit.

⁸ Shafto M., Conroy M., Doyle R., Glaessgen E., Kemp C., LeMoigne J., Wang L., DRAFT: Modeling, Simulation, Information technology & Processing Road Map, Technology Area 11, NASA technology road map, 2010

data mining and text mining. By combining all of this information, the Digital Twin continuously forecasts the health of the vehicle/system, the remaining useful life and the probability of mission success. The systems on-board the Digital Twin are also capable of mitigating damage or degradation by recommending changes in mission profile to increase both the life span and the probability of mission success”⁹.

Negli stessi anni anche la US Air Force esprimeva idee simili¹⁰ stabilendo che il ‘digital twin’ sarebbe stato parte della visione a lungo termine dell’ USAF per i prossimi 30 anni.

L’idea generale era che ogni aereo dovesse avere un modello digitale associato specifico. L’obiettivo principale, attraverso l’aggiornamento del modello in base ai viaggi e ai danni subiti, era di determinare quando un danno strutturale ha più probabilità di verificarsi, prevedendo quindi gli intervalli di manutenzione ottimali.

Non c’è da sorprendersi che NASA e USAF siano le prime compagnie a comprendere il concetto di DT e pianificarne lo sviluppo.

L’idea di utilizzare dei ‘gemelli’ ha origine negli anni ‘60, con il programma Apollo: venivano costruiti almeno due identici veicoli spaziali che permettevano agli ingegneri di riprodurre le condizioni durante la missione. Il gemello era utilizzato anche per l’esercitazioni durante la preparazione del volo. Durante la missione era utilizzato per simulare delle alternative, dove i dati provenienti dal veicolo originale venivano riprodotti nel modo più veritiero possibile, per poter assistere gli astronauti in situazioni critiche. E’ noto infatti l’utilizzo di un ‘gemello’ a terra per il salvataggio dell’equipaggio della fallimentare Apollo 13, fondamentale affinché non si trasformasse in tragedia.

Un altro esempio ben noto di ‘twin’ è l’‘Iron Bird’, uno strumento ingegneristico usato dalle compagnie aeronautiche per comprendere, convalidare e ottimizzare i sistemi aeronautici.¹¹ La cabina di pilotaggio del velivolo è riprodotta accuratamente in un modello a terra, dal quale è possibile simulare l’esperienza di volo grazie alla generazione digitale delle condizioni ambientali quali densità dell’aria, temperatura, velocità.

Al tempo anche altre compagnie quali General Electric, Siemens and Rolls Royce progettavano motori, turbine e motori con l’ausilio di simulazioni.

⁹ Ibidem

¹⁰ Air Force Research Laboratory (2011) Condition-based maintenance plus structural integrity (CBM + SI) & the airframe digital twin. 88ABW-2011-1428

¹¹ Shafto M., Conroy M., Doyle R., Glaessgen E., Kemp C., LeMoigne J., Wang L., op.cit.

Allo stesso modo le compagnie petrolifere e del gas lavoravano con simulazioni delle riserve di carburante dagli anni '80. Prima della definizione di Grieves venivano utilizzati termini come 'ombre digitali', 'avatar', 'modelli'.

Dall'idea alla base di questi esempi seminali si giunge alla formalizzazione del concetto nel 2014, con la pubblicazione del Whitepaper sul 'digital twin' di Michael Grieves¹². In questo il DT è definito come l'integrazione di tre parti: "(a) prodotti fisici nello Spazio Reale, (b) prodotti virtuali nello Spazio Virtuale, (c) connessioni di dati e informazioni che legano insieme prodotti virtuali e reali"¹³.

Dal 2014, con il diffondersi del concetto e lo sviluppo di nuove tecnologie si notano sempre più numerose sperimentazioni di DT, in settori differenti quali 'product design'¹⁴, progettazione della linea di assemblaggio¹⁵, ottimizzazione del processo produttivo¹⁶, manutenzione di equipaggiamenti complessi¹⁷, petrolio e gas¹⁸ e medicina e assistenza sanitari¹⁹. Esempi di DT possono essere osservati anche in molte grandi compagnie come General Electric, Siemens, PTC, Microsoft, Tesla, con l'obiettivo di aumentare performance, flessibilità e quindi competitività²⁰.

Sia nel 2017 che nel 2018 Gartner, azienda leader nella consulenza per le tecnologie dell'informazione, ha classificato il DT tra i primi dieci trend tecnologici per la nuova decade. Inoltre Gartner afferma che entro il 2021 la metà delle maggiori aziende utilizzerà 'gemelli digitali', ottenendo un miglioramento del 10% in termini di efficienza. Nel 2018, Lockheed Martin, società americana del settore aerospaziale, della difesa e delle tecnologie avanzate, ha elencato il DT fra le sei tecnologie che rivoluzioneranno l'industria della difesa²¹.

Con questi presupposti, è facile aspettarsi che il DT vivrà un rapido sviluppo nei prossimi anni²².

¹² Grieves M., op.cit.

¹³ Ibidem

¹⁴ Tao F., Sui F., Liu A., Qi Q., Zhang M., Song B., Guo Z., Lu SC-Y, Nee A.Y.C., *Digital twin-driven product design framework*, Int J Prod Res., 2018

¹⁵ Zhang H., Liu Q., Chen X., Zhang D., Leng J., *A Digital Twin-Based Approach for Designing and Multi-Objective Optimization of Hollow Glass Production Line*, IEEE Access, 5, pp. 26901-26911, 2017

¹⁶ Uhlemann T., Lehmann C., Steinhilper R., *The digital twin: realizing the cyber-physical production system for industry 4.0*, Procedia CIRP 61, pp. 335-340, 2017

¹⁷ Tao F., Zhang M., Liu Y., Nee A.Y.C., *Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment*, CIRP Ann, 67 (1), pp. 169-172, 2018

¹⁸ <https://www.linkedin.com/pulse/3-ways-digital-twins-going-help-improve-oil-gas-sophie-menard>

¹⁹ <https://www.dr-hempel-network.com/digital-health-technology/digital-twins-in-healthcare/>

²⁰ Schleich B., Anwer N., Mathieu L., Wartzack S., *Shaping the digital twin for design and production engineering*, CIRP Ann, 66 (1), pp. 141-144, 2017

²¹ Qi Q., Tao F., Zuo Y., Zhao D., *Digital Twin Service towards Smart Manufacturing*, Procedia CIRP, 72, pp. 237-242, 2018

²² <https://constructionblog.autodesk.com/2020-construction-trends/>

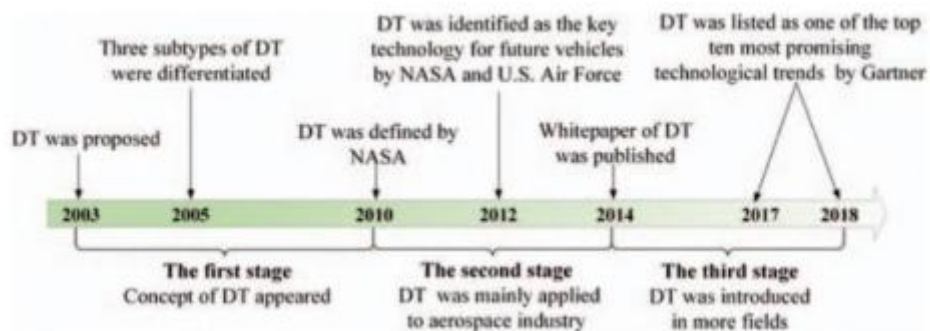


Figura 1 Storia del 'digital twin'²³

²³ Tao F., Zhang M., Nee A.Y.C., *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*, Academic Press, 2019

1.1.2 Definizioni

Si propongono di seguito alcune definizioni di DT provenienti da diversi settori²⁴.

SOURCE	DEFINITION
CAMBRIDGE CENTRE FOR DIGITAL BUILT BRITAIN <i>Academia</i>	"A digital twin is a realistic digital representation of something physical" ²⁵
DASSAULT SYSTÈMES <i>Software</i>	"A "Virtual Twin" is a virtual representation of what has been produced. We can compare a Virtual Twin to its engineering design to better understand what was produced versus what was designed, tightening the loop between design and execution" ²⁶
DELOITTE <i>Consulting</i>	"A digital twin is a near-real-time digital image of a physical object or process that helps optimise business performance" ²⁷
GARTNER <i>IT</i>	"A digital twin is a digital representation of a real-world entity or system. The implementation of a digital twin is an encapsulated software object or model that mirrors a unique physical object, process, organisation, person or other abstraction. Data from multiple digital twins can be aggregated for a composite view across a number of real-world entities, such as a power plant or a city, and their related processes" ²⁸
GENERAL ELECTRIC <i>Conglomerate</i>	"A digital twin is a living model that drives a business outcome" ²⁹
IBM <i>Software</i>	"A digital twin is a virtual representation of a physical object or system across its lifecycle, using real-time data to enable understanding, learning and reasoning" ³⁰
MICHAEL BATTY <i>Academia</i>	"A digital twin is a mirror image of a physical process that is articulated alongside the process in question, usually matching exactly the operation of the physical process which takes place in real-time" ³¹

²⁴ <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/digital-twin-towards-a-meaningful-framework>

²⁵ <https://www.cdbb.cam.ac.uk/national-digital-twin-programme>.

²⁶ Grieves M., Vickers J., *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems*, BT - Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches, pp. 85-113, 2016

²⁷ <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html>.

²⁸ <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/digital-twin>.

²⁹ <https://www.youtube.com/watch?v=2dCz3oL2rTw>

³⁰ <https://www.ibm.com/internet-of-things/trending/digital-twin>.

³¹ Batty M., *Digital twins. Environ Plan B Urban Anal City Sci*, 45(5), pp. 817-820, 2018

MICHAEL GRIEVES <i>Academia</i>	“The digital twin is a set of virtual information constructs that fully describes a potential or actual physical manufactured product from the micro (atomic level) to the macro (geometrical level). At its optimum, any information that could be obtained from inspecting a physical manufactured product can be obtained from its digital twin” ³²
MICROSOFT <i>Software</i>	“A digital twin is a virtual model of a process, product, production asset or service. Sensor-enabled and IoTconnected machines and devices, combined with machine learning and advanced analytics, can be used to view the device’s state in real-time. When combined with both 2D and 3D design information, a digital twin can visualise the physical world and provide a method to simulate electronic, mechanical, and combined system outcomes” ³³
NASA <i>Government / Research</i>	“A digital twin integrates ultra-high fidelity simulation with the vehicle’s on-board integrated vehicle health management system, maintenance history and all available historical and fleet data to mirror the life of its flying twin and enable unprecedented levels of safety and reliability” ³⁴
SIEMENS <i>Conglomerate</i>	“A digital twin is a virtual representation of a physical product or process, used to understand and predict the physical counterpart’s performance characteristics” ³⁵

³² Grieves M., Vickers J., op.cit., pp. 85-113.

³³ <https://info.microsoft.com/rs/157-GQE-382/images/Microsoft%27s>

³⁴ https://www.nasa.gov/mission_pages/apollo/missions/apollo13.html

³⁵ <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/digital-twin/24465>.

1.1.3 Caratteristiche del 'digital twin'

Nella gran parte delle definizioni il DT è considerato una rappresentazione virtuale che interagisce con l'oggetto fisico nel corso del ciclo vita e propone una chiave per valutare, ottimizzare, predire, ecc. La concentrazione è posta sugli elementi definiti da Grieves nel 2014 nella descrizione del modello tridimensionale di DT: "(a) physical products in Real Space, (b) virtual products in Virtual Space, as well as (c) the connections of data and information that tie the virtual and real products together"³⁶. A oggi questo tipo di DT è il più diffuso. Il modello è rappresentato da Grieves nel Whitepaper del 2014. [Fig. 2]

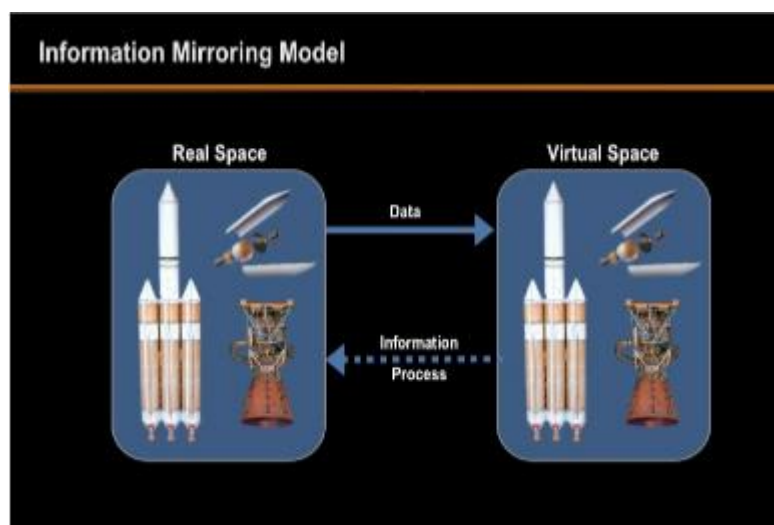


Figura 2 Modello tridimensionale del 'digital twin'³⁷

Il concetto però, avendo sempre maggiore espansione e attingendo ai rapidi sviluppi nel campo delle nuove tecnologie, è iniziato a cambiare presentando nuove tendenze ed esigenze. Recentemente è stata proposta una definizione a cinque dimensioni del DT, aggiungendo 'digital twin data' e servizi alla versione tridimensionale³⁸. Rispetto al modello precedente, oltre all'interazione fra fisico e virtuale, il nuovo può unire dati provenienti da entrambi i 'twin' per un'analisi più ampia e accurata. Il modello 5D è rappresentato in Fig. 3 e descritto dalla formula seguente³⁹.

$$M_{DT} = (PE, VM, Ss, DD, CN)$$

³⁶ Grieves M., op.cit.

³⁷ ibidem

³⁸ Tao F., Liu W, Zhang M., et al. *Five-dimension digital twin model and its ten applications*. Comput Integr Manuf Syst 2019;25(1):1–18.

³⁹ Tao F., Zhang M., Liu Y., Nee A.Y.C., *Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment*, CIRP Ann, 67(1), pp. 169–72, 2018

Dove PE è entità fisica, VM modello virtuale, Ss servizi, DD 'digital twin data', e CN connessioni. I ruoli delle diverse componenti sono di seguito descritti.

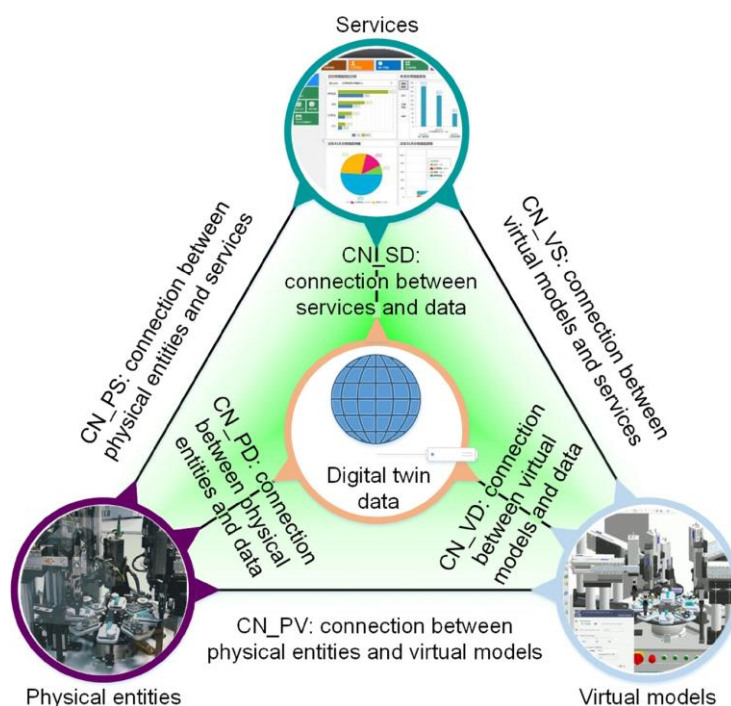


Figura 3 DT in cinque dimensioni⁴⁰

Entità fisica.

Lo scopo del DT è di creare un modello digitale di entità fisiche per simularne il comportamento. La base del DT è ovviamente il 'mondo reale'. Esso può consistere in un prodotto, un sistema, un processo di attività, un'organizzazione. Secondo la complessità dell'entità fisica interpretata i DT si dividono in tre livelli gerarchici: "unit level, system level, and system of system (SoS) level"⁴¹. [Fig. 4]

⁴⁰ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S027861251930086X>

⁴¹ Tao F., Qi Q., Wang L., Nee A., Digital twins and cyber-physical systems towards smart manufacturing and industry 4.0: correlation and comparison, Engineering 5(4), pp. 653–61, 2019

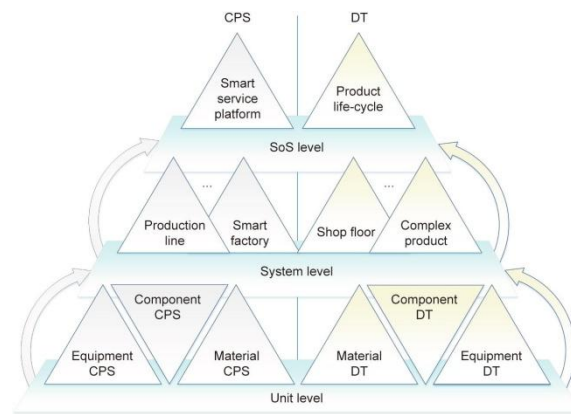


Figura 4 Livelli gerarchici del DT⁴²

Modello virtuale

I modelli virtuali cercano di essere repliche fedeli delle entità fisiche, riproducendone geometria, proprietà, comportamento e regole.

I ‘modelli geometrici 3D’ descrivono la forma, le dimensioni, le relazioni spaziali.

I ‘modelli fisici’, basati su proprietà come velocità, forza, usura, riflettono fenomeni quali deformazione, laminazione, frattura e corrosione.

I ‘modelli comportamentali’ descrivono il ‘behavior’ (cambiamento di stato, degradazione delle performance e coordinazione) e i meccanismi di risposta delle entità ai cambiamenti delle condizioni esterne.

I ‘modelli di regole’ permettono al DT di ragionare, giudicare, valutare e prendere decisioni, seguendo le regole estratte da dati storici o definite da esperti.

‘Digital twin data’

I ‘twin data’ sono un fattore chiave del DT. Possono essere molto eterogenei, appartenere a più dimensioni, provenire da fonti e periodi temporali diversi. Alcuni dati sono ottenuti dalle entità fisiche, e possono essere sia statici che dinamici. Altri sono i risultati delle simulazioni fatte sul ‘twin’. Altri ancora sono ottenuti dai servizi, e ne descrivono l’input e l’ output. Altri sono frutto della conoscenza di esperti, o estratti da dati storici. Infine alcuni dati sono il risultato della fusione dei dati menzionati.

⁴² ibidem

Servizi

I servizi sono il risultato finale del DT: sono la traduzione delle funzioni fornite dal DT (ad esempio valutazione, previsione, verifica) in termini facili e comprensibili per un utilizzo comune. Per l'utente sono 'black box' che possono essere usate senza nessuna conoscenza dei meccanismi interni. Devono essere forniti soltanto i parametri e le richieste (costo, tempo, qualità) per ottenere i risultati desiderati (valutazione, previsione, verifica). Essi semplificano il processo, facilitando l'applicazione del DT a diversi campi ed utenti.

Connessioni

Le connessioni fra entità fisiche, modelli virtuali, servizi e 'data' permettono lo scambio d'informazioni e dati. Esistono 6 tipi di connessione⁴³:

entità fisiche – modelli virtuali (CN_PV);

entità fisiche – data (CN_PD);

entità fisiche – servizi (CN_PS);

modelli virtuali – data (CN_VD);

modelli virtuali – servizi (CN_VS);

servizi – data (CN_SD).

⁴³ Tao F., Zhang M., Liu Y., Nee A.Y.C., op.cit., pp. 169–72

1.2 Digital twin in ambito urbano

E' stato descritto il concetto generale di 'digital twin' e ne sono state accennate le possibilità in diversi settori. L'analisi sarà ora concentrata sull'applicazione di questa pratica all'ambito urbano, facendone una panoramica e presentando una serie di casi studio.

Insieme a industria e assistenza medica il settore urbano è quello che in questo momento presenta più interesse nell'applicazione di DT⁴⁴ [Fig. 5]. Rispetto al settore industriale può vantare meno casi studi e pubblicazioni scientifiche, ma anche per la sua natura non ancora chiaramente definita permette eccezionali possibilità di sviluppo e viene visto con molto interesse degli esperti del settore⁴⁵.

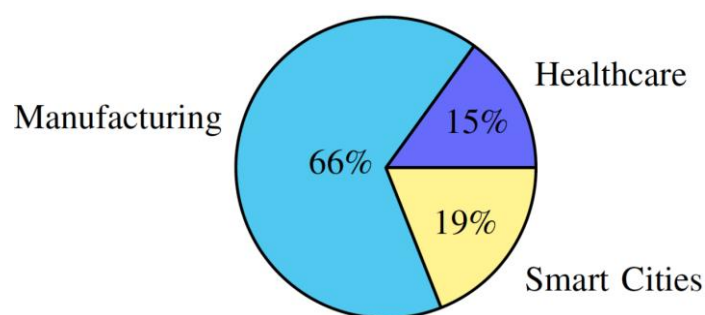


Figura 5 Percentuale delle aree di ricerca⁴⁶

⁴⁴ Fuller A., Fana Z., Daya C., Barlowb C., Digital Twin: Enabling Technology, Challenges and Open Research

⁴⁵ <https://constructionblog.autodesk.com/2020-construction-trends/>

⁴⁶ Fuller A., Fana Z., Daya C., Barlowb C., op.cit

1.2.1 Smart city

Il concetto di 'digital twin' in ambito urbano va a inserirsi nell'idea più ampia di 'smart city'. Questo termine è stato proposto per la prima volta negli anni '90 negli Stati Uniti⁴⁷ e dagli anni 2000, complice lo sviluppo di nuove tecnologie e l'esacerbazione delle criticità della città tradizionale, ha ricevuto maggiori attenzioni e sperimentazioni [Fig. 6].

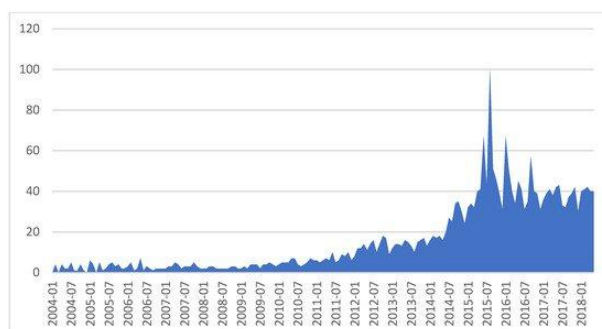


Figura 6 Numero relativo di risultati delle ricerche di 'Smart Cities' su Google tra il 2004 e il 2018⁴⁸

Secondo il Fondo delle Nazioni Unite per la popolazione, nel 2008 oltre il 50% della popolazione globale, 3,3 miliardi, viveva in aree urbane; una cifra che dovrebbe salire al 66% entro il 2050⁴⁹. In Europa il 75% della popolazione vive già in aree urbane e entro la fine del 2020 la percentuale dovrebbe raggiungere l'80%⁵⁰.

L'importanza sempre maggiore ricoperta dalle aree urbane è un fenomeno globale, come confermato dalla diffusione di megalopoli di oltre 20 milioni di abitanti che stanno sviluppandosi in Asia, America Latina e Africa⁵¹. Entro il 2030, si prevede che il mondo avrà 43 megalopoli con oltre 10 milioni di abitanti, la maggior parte dei quali appartenenti a regioni in via di sviluppo⁵².

Di conseguenza oggi la maggior parte delle risorse viene consumata nelle città. Questo fatto contribuisce all'importanza economica e sociale dei centri urbani, ma anche alla loro scarsa sostenibilità ambientale.

⁴⁷ Sun M., Zhang J., *Research on the application of block chain big data platform in the construction of new smart city for low carbon emission and green environment*, Computer Communications, 149, pp. 332-342, 2020

⁴⁸ Allam Z., Newman P., *Redefining the Smart City: Culture, Metabolism and Governance*, Smart Cities 1(1), pp. 4-25, 2018

⁴⁹ Onu 2014

⁵⁰ See 2006

⁵¹ Onu 2008

⁵² <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>

Le sfide principali che l'urbanizzazione porta con sé sono traffico, scarsità di risorse, mancanza di aree verdi, deterioramento delle infrastrutture, effetti negativi sulla salute umana, gestione dei disastri naturali, gestione dei rifiuti, consumo di energia e inquinamento dell'aria.

Nel corso delle ultime decadi la produzione di rifiuti è aumentata considerevolmente: da 0,5 kg a persona/per giorno si è passati a 1,7 kg⁵³. La scarsa gestione e lo smaltimento errato possono tradursi in problemi che compromettono le condizioni ambientali aumentando l'inquinamento dell'aria e del suolo e quindi mettono a rischio la salute umana.

Le città consumano il 60-80% di energia in tutto il mondo e sono quindi responsabili della produzione di quasi l'80% dei gas serra, con danni incalcolabili all'ambiente⁵⁴.

Tuttavia, nonostante le criticità che essa comporta, una grande densità urbana, se supportata da efficienti sistemi di trasporto, di energia, e in generale da una corretta organizzazione spaziale, può essere la chiave per risolvere vari problemi urbani, quali consumo di terreni agricoli, spreco di energia e risorse, inquinamento dell'aria, accessibilità e segregazione sociale⁵⁵. In Fig. 7 e in Fig. 8 è mostrato chiaramente l'aumentare di energia consumata e di emissioni di CO₂ legate al trasporto in base alla densità delle aree urbane⁵⁶.

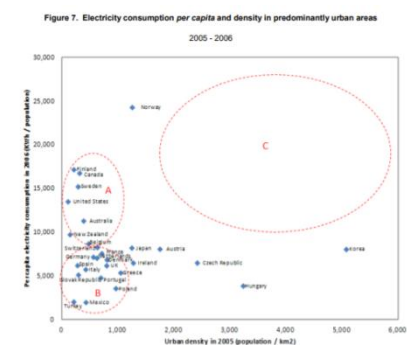


Figura 7 Consumo di elettricità rispetto alla densità urbana

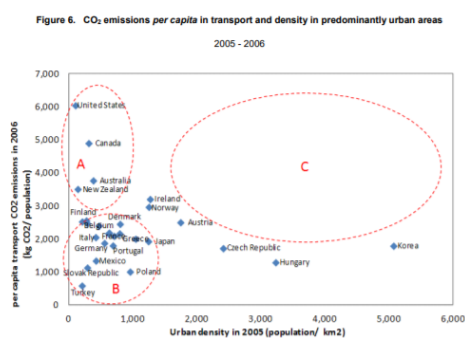


Figura 8 Emissioni di CO₂ per il trasporto rispetto alla densità urbana⁵⁷

⁵³ Singh A., *Managing the uncertainty problems of municipal solid waste disposal* *Journal of Environmental Management* 240 259-265, 2019

⁵⁴ ibidem

⁵⁵ Neuman M., *The compact city fallacy*, *J. Plan. Educ. Res.*, 25 (1), pp. 11-26, 2005

⁵⁶ Hammer et al., *Cities and Green Growth: A Conceptual Framework*, OECD Regional Development Policy Working Papers, forthcoming

⁵⁷ ibidem

Quindi, piuttosto che essere il problema dal quale fuggire, un tipo di urbanizzazione alternativa sembra essere la chiave per affrontare le sfide del vivere moderno e della sostenibilità.

John Wilmoth, direttore della Divisione Popolazione dell'ONU DESA, afferma che “La gestione delle aree urbane è diventata una delle sfide di sviluppo più importanti del ventunesimo secolo. Il nostro successo o fallimento nella costruzione di città sostenibili sarà un fattore determinante per il successo dell'agenda delle Nazioni Unite per lo sviluppo post 2015”⁵⁸. Una recente ricerca di C40, organizzazione di città per il contrasto del cambiamento climatico attraverso azioni urbane, mostra che le decisioni di politica urbana prese prima del 2020 potrebbero determinare fino a un terzo del restante budget globale di carbonio che non sia già condizionato da decisioni passate⁵⁹.

Gli esperti dell'industria e del mondo accademico concordano su come la ‘smart city’ sia la possibile risposta a queste necessità.

In termini generici, la ‘smart city’ è un’area urbana che utilizza le tecnologie dell’informazione e della comunicazione (ICT) (ad es. ‘Internet of things’, big data, intelligenza artificiale, ecc.) per migliorare l’efficienza delle normali operazioni urbane e la qualità dei servizi (Qos) forniti ai cittadini. In termini formali, gli esperti hanno dato diverse definizioni considerando diversi aspetti e prospettive. Secondo una popolare definizione la ‘smart city’ “connette infrastrutture fisiche, sociali, commerciali e ICT per elevare l’intelligenza della città”⁶⁰. In un’altra descrizione del concetto la ‘città intelligente’ è “un’evoluta città moderna che utilizza ICT e altre tecnologie per migliorare la qualità della vita (QoL), la competitività, l’efficacia operativa dei servizi urbani, garantendo al contempo la disponibilità di risorse per le generazioni presenti e future in termini sociali, economici e ambientali”⁶¹.

Lo scopo principale delle prime ‘smart city’ era di migliorare la qualità della vita dei cittadini riducendo le differenze fra la domanda e l’offerta per diversi servizi.

Rispettando le nuove richieste in termini di QoL, le moderne ‘smart city’ si concentrano in particolare su soluzioni sostenibili ed efficienti per la gestione dell’energia, i trasporti, l’assistenza sanitaria, la ‘governance’, ecc. al fine di soddisfare le opportunità e necessità urbane precedentemente descritte.

⁵⁸<https://www.un.org/en/development/desa/news/population/world-urbanization-prospects-2014.html>

⁵⁹<https://www.sei.org/publications/keeping-cities-green-avoiding-carbon-lock-in-due-to-urban-development/>

⁶⁰ Harrison C., Eckman B., Hamilton R., Hartswick P., Kalagnanam J., Paraszczak J., *Foundations for smarter cities*, IBM Journal of Research and Development, 54, pp. 1-1, 2010

⁶¹ S. Kondepudi Smart sustainable cities analysis of definitions The ITU-T Focus Group for Smart Sustainable Cities, 2014

In sostanza una 'smart city' è una città che attraverso una forte integrazione tecnologica (IoT e big data) riesce ad avere un'immagine estremamente precisa di se stessa e, attraverso l' utilizzo di strumenti di previsione ed analisi avanzati (AI), può rispondere, in tempo reale o a lungo termine, a determinate situazioni al fine di garantire la migliore QoI, a livello di vivibilità, servizi, rapidità. Tutto ciò in un'ottica di sostenibilità.

1.2.2 Digital twin urbano

Il concetto di 'digital twin', esaminato in termini generali nel paragrafo 1.1, si inserisce perfettamente in questo scenario, fornendo alla 'smart city' uno strumento prezioso per essere realmente 'smart'.

Come afferma Michael Grieves "Ever since the crystallisation of the digital twin concept at the beginning of the twenty-first century, I have always thought that architecture and buildings — throughout their lives — presented a natural use case for the digital twin. [...] This issue is especially pertinent to the urban buildings of today, which operate within complex systems"⁶². Secondo l'ideatore e teorizzatore del DT, fin dalla nascita del concetto di 'digital twin' architettura e edifici sono stati un caso studio ideale per la sua applicazione.

Dalla pianificazione urbana all'ottimizzazione dell'uso del suolo, possedere un DT urbano dà la possibilità di gestire la città in modo efficace.

I vantaggi sono numerosi e vanno dalla manutenzione preventiva all'efficienza operativa e al risparmio sui costi, al miglioramento dei servizi per i cittadini, a maggiore sicurezza e resilienza. Possono essere utili anche per migliorare il design sotto l'aspetto ambientale. Ad esempio, un modello gemello digitale potrebbe massimizzare l'esposizione all'energia solare d'interi quartieri.

Le possibilità di utilizzo comprendono la simulazione dei movimenti di persone e l'evacuazione di emergenza, la rappresentazione dei rischi di alluvione, la progettazione di edifici intelligenti e la gestione dell'energia attraverso il rilevamento delle occupazioni, il modello e la simulazione del traffico stradale, il monitoraggio e la previsione della qualità dell'aria, il modello delle infrastrutture verdi e la simulazione di un progetto prima della sua realizzazione, visualizzando i problemi prima che diventino realtà.

Inoltre il DT favorisce la comunicazione e la collaborazione fra diverse aree politiche, migliorando allo stesso tempo il coinvolgimento e l'impegno di cittadini e comunità: attraverso la costruzione di una piattaforma visualizzabile e interagibile i cittadini potrebbero proporre e comprendere opzioni di sviluppo e compromessi, e quindi costituire un sostegno politico e comunitario per investimenti infrastrutturali positivi.

Nel 2018, il 'Centre for Digital Built Britain' dell'Università di Cambridge ha lanciato il progetto 'National Digital Twin' per supportare una rete britannica di digital twin "per il bene pubblico"⁶³. Per garantire che i 'city digital twin' si sviluppino e vengano utilizzati in modo

⁶² <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/digital-twin-towards-a-meaningful-framework>

⁶³ <https://www.cdbb.cam.ac.uk/national-digital-twin-programme>

pertinente e responsabile, il progetto ha definito una serie di valori guida: i 'Gemini Principles'⁶⁴. I principi stabiliscono nove priorità in materia di fiducia, trasparenza, valore sociale, proprietà, responsabilità e sicurezza [Fig. 9].



Figura 9 'Gemini Principles'⁶⁵

⁶⁴ <https://www.cdbb.cam.ac.uk/DFTG/GeminiPrinciples>

⁶⁵ ibidem

1.3 Casi studio

A oggi pubblicazioni e casi studio di ‘city digital twin’ sono pochi, ma sono destinati ad aumentare: secondo ABI reserach, società di consulenza nel mercato tecnologico globale, gli esempi di ‘urban digital twin’ saranno oltre 500 entro il 2025⁶⁶.

Sono analizzati gli esempi principali e più completi.

Città	Anno	Strumenti	Metrica	Obiettivi
EUROPA				
Cambridge, Regno Unito ^{67 68}	2019 - in corso	Microsoft Azure (DT); Telensa Multi-Sensor Pods (IoT)	Sensori video e radar installati sui pali della luce. Analisi dei tragitti abituali a seconda di età e impiego	Ridurre il traffico, proporre tragitti alternativi, migliorare la qualità dell’aria. Creazione di una piattaforma web per visualizzare progetti futuri e avere ‘feedback’ dai cittadini
Kalasatama, Helsinki, Finlandia ^{69 70}	2018 - 2019	Cad, Ifc, Gis, Csv, CityGml (DT); Cesium (visualizzazione web); OpenCities Planner (‘smart platform’); Ansy Discovery Live (analisi)	Lidar, modelli preesistenti. Creazione del modello digitale, importazione su una piattaforma interagibile, analisi energetica e dei venti	Produzione di un DT di alta qualità e condivisione del risultato ottenuto. Il modello funge da piattaforma per la progettazione, il collaudo, il servizio durante l’intero ciclo di vita dell’area urbana. Modello visualizzabile ^{71 72}
Rennes, Francia ⁷³	2018 – 2019	Dassault Systèmes’ 3D EXPERIENCITY (DT)	Creazione del modello digitale, importazione su una piattaforma interagibile, analisi ambientali	Mediazione urbana con i cittadini, progettazione urbane e analisi quali simulazione dei raggi solari, del rumore, impatto dell'ombra degli alberi sugli edifici. Modello visualizzabile ⁷⁴

⁶⁶ https://www.abiresearch.com/market-research/product/1033835-digital-twins-smart-cities-and-urban-model/?utm_source=media&utm_medium=email

⁶⁷ <https://www.smartcitiesworld.net/news/news/cambridge-digital-twin-to-tackle-congestion-and-air-quality-3917>

⁶⁸ <https://www.pbctoday.co.uk/news/bim-news/cambridge-digital-twin/52581/>

⁶⁹ <http://www.kiradigi.fi/en/experiments/ongoing-projects/kalasatama-digital-twins.html>

⁷⁰ https://www.hel.fi/static/liitteet-2019/Kaupunginkanslia/Helsinki3D_Kalasatama_Digital_Twins.pdf

⁷¹ <https://kartta.hel.fi/3d/#/>

⁷² <https://cityplanneronline.com/helsinki/fiksukalasatama>

⁷³ <http://www.eurocities.eu/eurocities/documents/Digital-3D-modelling-of-Rennes-Metropole-WSP0-A8JDUM>

⁷⁴ <http://3d.rennes2030.fr/Rennes2030/>

Rotterdam, Paesi Bassi ^{75 76}	2018 – In corso	CityGML, Bim, Gis (DT); Cesium (visualizzazione web)	Lidar, dati urbani su cavi e condotti, illuminazione stradale, alberi, edifici, sensori traffico stradale e navale, rifiuti. Creazione di una piattaforma web interagibile	Gestione delle risorse sotterranee, simulazioni (potenziale solare, potenziale del tetto verde, vari potenziali risparmi), interazioni tra oggetti sotterranei / di superficie (in fase di sviluppo), gestione delle acque, integrazione con progettazione BIM, marketing della città, visualizzazione in tempo reale: parcheggio disponibile, livello dell'acqua, traffico stradale e navale, attraverso la gestione dei ponti. Modello visualizzabile ⁷⁷
---	--------------------	---	--	--

AMERICA DEL NORD				
Boston, USA ⁷⁸	2018	Esri's ArcGIS (DT e analisi);	Creazione del modello 3D GIS e analisi delle ombre. Integrazione dei dati disponibili di Boston: proprietà dei lotti, distretti di zonizzazione, monumenti storici e spazio aperto. Proiezioni sull'innalzamento del livello del mare	Creazione di modello 3D della città completo di strumenti per l'analisi delle ombre e la valutazione dell'impatto di nuovi progetti. Analisi qualitativa e quantitativa delle altezze e delle ombre. In futuro l'intenzione è di rendere il modello connesso in tempo reale con sensori. Rendere il modello 'user- friendly' e accessibile ovunque
Pasadena, USA ^{79 80}	2018 – 2019	Esri's ArcGIS (DT e analisi); ZenCity (smart platform)	Integrazione delle richieste di assistenza, l'ubicazione dell'apparecchiatura, i dati sull'idrante, la posizione del personale. Creazione del modello 3D e di una piattaforma per i feedback dei cittadini e la comunicazione marketing	Monitoraggio delle situazioni rischio in collaborazione con i vigili del fuoco attraverso la creazione di una piattaforma. Migliorare il traffico cittadino. Assistere il dipartimento di pianificazione nell'analisi dello sviluppo e della crescita. Migliorare la comunicazione con gli utenti e gestire meglio il marketing e il 'branding' attraverso soluzioni di monitoraggio dei social media
Portland, USA ⁸¹	2019	Sidewalk Labs' Replica (DT)	Creazione del modello 3D della città, sensibile all'utilizzo di smartphone	Creazione di un 'digital twin' esteso e interattivo, che si attiva attraverso la percezione di smartphone

⁷⁵ <https://eu-smartcities.eu/news/rotterdams-digital-twin-redefines-our-physical-digital-social-worlds>

⁷⁶ <https://en.idate.org/product/digital-twin-cities/>

⁷⁷ <https://www.3drotterdam.nl/#/>

⁷⁸ <https://www.esri.com/about/newsroom/blog/3d-gis-boston-digital-twin/>

⁷⁹ <https://www.techwire.net/news/automation-data-among-focuses-for-digital-cities-winners.html>

⁸⁰ https://www.youtube.com/watch?v=Gd_kB5TxEb8&feature=youtu.be

⁸¹ <https://www.governing.com/blogs/bfc/col-digital-twin-maps-guide-changing-city.html>

ASIA / MEDIO ORIENTE				
Dubai, Emirati Arabi Uniti ^{82 83}	2019 – 2020	Siemens’ MindSphere (IoT e DT); Cisco (smart platform); SAP (gestione dei flussi di persone); DarkMatter (sicurezza)	Sensori attivi per sei mesi, sparsi in un’area con 137 edifici distribuiti su un’area di 4,4 chilometri quadrati. In totale analizzati più di 200.000 ‘data points’. Network 5G per le connessioni. Creazione di una ‘smart platform’ per collegare visitatori, partecipanti, dispositivi, applicazioni	Progettazione, costruzione e gestione dell’area Expo di Dubai 2020. Gestire raffreddamento in modo efficiente, ottimizzare i trasporti pubblici, migliorare il controllo della qualità dell’aria, la gestione del traffico e il controllo degli accessi e della sicurezza. Analisi quotidiane di elementi: trattamento delle acque, social media, parcheggio, benessere termico degli utenti, composizione del suolo, irrigazione, flusso d’aria, controllo degli accessi, gestione dei rifiuti, illuminazione stradale. Gestione degli sviluppi futuri dell’area concluso l’Expo
Jaipur, India ^{84 85}	2018 – 2019	Dassault Systèmes’ 3D EXPERIENCITY (DT)	Lidar e fotografie aeree, con automobili e a piedi, dove non è possibile accedere in altro modo	Semplificare iniziative di ripristino da emergenze, gestione del turismo, aiutando anche la pianificazione e l’esecuzione su larga scala di progetti infrastrutturali e urbanistici
Singapore ^{86 87}	2017 – In corso	FME, Dassault Systèmes’ 3D EXPERIENCITY (DT)	Lidar, costruzione di modello 3D con informazioni dettagliate come texture, rappresentazione materiale di oggetti geometrici; attributi del terreno, ad esempio corpi idrici, vegetazione, infrastrutture di trasporto, ecc. I modelli di edifici comprendono la geometria e i componenti delle strutture, come pareti, pavimenti e soffitti, fino ai suoi dettagli, come la percentuale di granito, sabbia e pietra in un materiale da costruzione	Le possibilità di utilizzo di questo modello, a oggi l’esempio più avanzato di ‘digital twin city’, sono molteplici, grazie alla quantità e varietà di dati contenuti. Queste possibilità si basano su quattro funzionalità principali: - Sperimentazione virtuale Il DT ad esempio può essere utilizzato per esaminare le aree di copertura delle reti 3G / 4G, fornire una visualizzazione realistica delle aree di scarsa copertura e evidenziare le aree che possono essere migliorate nel modello di città 3D. - Banco di prova virtuale ‘Virtual Singapore’ può essere utilizzata come piattaforma di prova per convalidare la fornitura di servizi. Ad esempio può essere utilizzata per simulare la dispersione della folla e per stabilire procedure di evacuazione

⁸² <https://www.connectedremag.com/das-in-building-wireless/siemens-showcases-test-bed-for-digital-twins-smart-city-infrastructure/>

⁸³ <https://www.meed.com/dubai-expo-2020-digital-twin/>

⁸⁴ https://www.huffingtonpost.in/2018/11/04/how-jaipur-is-building-a3d-virtual-twin-city-for-better-planning-and-governance_a_23577773/

⁸⁵ <https://accommodationtimes.com/3d-city-jaipur-project/>

⁸⁶ <https://www.3ds.com/customer-stories/single/virtual-singapore/>

⁸⁷ <https://www.nrf.gov.sg/programmes/virtual-singapore>

				durante un'emergenza. - Pianificazione e processo decisionale Con un ricco ambiente di dati, 'Virtual Singapore' è una piattaforma olistica e integrata per lo sviluppo di applicazioni analitiche. Ad esempio, un'applicazione potrebbe essere sviluppata per analizzare i flussi di trasporto e i modelli di movimento dei pedoni. - Ricerca e sviluppo La ricchezza di dati di 'Virtual Singapore', resa disponibile con i diritti di accesso necessari, può consentire ai ricercatori di innovare e sviluppare nuove tecnologie o capacità
Yingtan, Cina ⁸⁸	2019	Huawei (IoT)	5g e IoT. Il numero di dispositivi collegati tramite IoT ha superato la popolazione cittadina e sono state istituite 214 aziende IoT	43 categorie di applicazioni IoT per ottenere una gestione intelligente di acque, trasporti, lampioni e parcheggi al fine di migliorare la vita dei cittadini e limitare lo spreco di risorse

PROGETTI URBANI				
Amaravati, India ⁸⁹	2019 – In corso	Cityzenith's Smart World Pro (DT)	Monitoraggio globale dal giorno 0 attraverso onnipresenti sensori IoT	Amaravati sarà la prima città in assoluto a essere nata con un 'digital twin'. Tutto ciò che accade in Amaravati verrà virtualmente anticipato e adattato in tempo reale. Tramite sensori IoT sarà possibile monitorare l'avanzamento delle costruzioni in tempo reale, delle condizioni ambientali e del benessere. Saranno fatte simulazioni avanzate del traffico e della mobilità, del microclima e dei cambiamenti climatici. L'invio di permessi di costruzione sarà reso più facile e rapido
SidewalkTo	2017 –	Sidewalk Labs'	Attraverso sensori IoT	Costruzione del quartiere di Toronto

⁸⁸ <https://www.huawei.com/en/press-events/news/2019/11/Huawei-Customers-Win-Awards-SCEWC>

⁸⁹ <https://newcities.org/the-big-picture-digital-twins-for-greenfield-smart-cities/>

ronto, Toronto, Canada ^{90 91}	In corso	Replica (DT)	rilevamento di dati in tutta la città intelligente, dallo smaltimento dei rifiuti alle panchine. Creazione di un DT interagibile e in evoluzione costante, attraverso i feedback degli utenti	“da Internet in su”, comprendendo auto a guida autonoma, marciapiedi mobili e robot di consegna sotterranei. Creazione di posti di lavoro. Sviluppo sostenibile e ad impatto positivo sull’ambiente. Abitazioni economicamente accessibili. Mobilità alternativa
---	----------	--------------	---	--

⁹⁰ <https://www.sidewalktoronto.ca/innovations/digital-innovation>

⁹¹ <https://www.ft.com/content/9cd15bcc-fbff-11e9-a354-36acbbb0d9b6>

Capitolo 2. Metodologia

2.1 GIS

2.1.1 Breve storia del GIS

Le origini del GIS vanno ricercate nell'epidemiologia:

nel 1832, nel 'Rapport sur la marche et les effets du choléra dans Paris et le département de la Seine'⁹² i distretti di Parigi vengono rappresentati con gradazioni di colore secondo il numero di morti per colera. Nel 1854 a Londra la causa di un'epidemia di colera viene individuata grazie a una mappa che indica dove le vittime vivevano, risalendo a una vicina fonte d'acqua⁹³. Questo è uno dei primi casi in cui il metodo cartografico non soltanto è usato per rappresentare, ma soprattutto per analizzare un fenomeno geografico.

All'inizio del XX secolo si hanno esempi di mappe divise in 'layer', una delle caratteristiche principali del GIS, senza però un 'database' ad essi collegati.

È con lo sviluppo tecnologico del dopoguerra che si creano le condizioni favorevoli allo sviluppo di un concetto moderno di GIS.

Il campo in cui fiorirà il concetto di GIS si crea negli anni '60, con l'emergere dei computer e delle prime idee di geografia quantitativa e computazionale, su cui si concentrano le ricerche accademiche del tempo.

Il primo GIS computerizzato della Storia ha luce nel 1963, frutto del lavoro di Roger Tomlinson. Il 'pioniere', incaricato dal governo canadese di creare un inventario facilmente fruibile delle sue risorse naturali, ha l'idea di usare i computer per unire i dati provenienti da tutte le province. In questo modo crea il design per il processo automatico di archiviazione ed elaborazione di grandi quantità di dati. A questo sistema darà il nome di 'Canada Geographic Information System' (CGIS).

Negli anni successivi la ricerca viene portata avanti in ambito universitario. Nel 1964, alla Northwestern University Howard Fisher crea uno dei primi software di mappatura digitale, SYMAP. Nel 1965 fonda l'Harvard Laboratory for Computer Graphics', dove, grazie

⁹² "Rapport sur la marche et les effets du choléra dans Paris et le département de la Seine. Année 1832". Gallica.

⁹³ Johnson S., *The Ghost Map: a street, an epidemic and the two men who battled to save Victorian London*, London: Allen Lane, 2006

al lavoro di geografi, pianificatori, informatici, vengono sviluppati i primi concetti e applicazioni di GIS⁹⁴.

Alla fine degli anni '70 nascono due sistemi GIS di dominio pubblico (MOSS e GRASS GIS) e, all'inizio degli anni '80, compaiono le prime compagnie commerciali a fornire software GIS: M&S Computing (in seguito Intergraph), ESRI ('Environmental Systems Research Institute'), CARIS ('Computer Aided Resource Information System'), MapInfo Corporation ed ERDAS ('Earth Resource Data Analysis System').

Nel 1986 viene rilasciato il primo 'desktop GIS': MIDAS ('Mapping Display and Analysis System'). Nel 1990 viene rinominato in 'MapInfo for Windows' e reso disponibile sul sistema operativo Microsoft Windows. Così ha inizio il passaggio del GIS dal settore di ricerca a quello aziendale⁹⁵.

In seguito alla divulgazione di Internet nei primi anni '90, gli utenti GIS hanno potuto sfruttare il potenziale della condivisione e della diffusione dei dati geospaziali. Biblioteche digitali, che consentivano la ricerca nei loro cataloghi, iniziarono ad apparire a metà degli anni '90. Oggi lo stato dell'arte è rappresentato dai geoportali, siti Web che integrano i cataloghi di diverse fonti. Una volta che l'utente identifica un set di dati potenzialmente interessante, viene indirizzato al sito di custodia del set di dati, dal quale è possibile visualizzare o estrarre i dati⁹⁶.

Nel 2004, ispirato dal successo di Wikipedia e dalla difficoltà di ottenere dati geografici gratuiti, nasce OpenStreetMap, un progetto collettivo per la creazione di una mappa gratuita e modificabile del pianeta. I geodati alla base della mappa sono considerati l'output primario del progetto, e sono liberamente scaricabili⁹⁷.

Il rilascio di Google Earth e Google Maps nel 2005, e il successivo rilascio di numerosi altri siti di mappatura e globi virtuali, hanno consentito agli utenti di sfruttare un potente mezzo di diffusione dei dati. Sono ora disponibili centinaia di migliaia di tali fonti supplementari, sebbene il loro valore risieda più nella visualizzazione che nell'analisi sistematica⁹⁸.

Nel 1998 il vicepresidente degli Stati Uniti Al Gore, in un discorso intitolato 'Digital Earth', immaginava un mondo in cui la tecnologia digitale avrebbe presentato una visione accessibile non solo di come il mondo appare oggi, ma anche di come appariva in passato e

⁹⁴ <https://www.esri.com/en-us/what-is-gis/history-of-gis>

⁹⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/Geographic_information_system#History_of_development

⁹⁶ Goodchild MF., *Geographic information systems and science: today and tomorrow*, Procedia Earth and Planetary Science, 1(1), 2009

⁹⁷ https://en.wikipedia.org/wiki/OpenStreetMap#Software_for_editing_maps

⁹⁸ Goodchild MF., op cit.

di come apparirà in futuro. Il GIS si è evoluto in una tecnologia che supporta una vasta gamma di attività, dalla ricerca scientifica alla gestione, ma non ha ancora raggiunto il suo pieno potenziale come piattaforma per lo studio di futuri alternativi e per la progettazione di paesaggi che raggiungano determinati obiettivi. Una tecnologia di progettazione dovrebbe includere strumenti per la simulazione di paesaggi futuri, basati sia sui processi naturali che sui risultati delle azioni umane.

Infine la tendenza verso un monitoraggio continuo, in tempo reale, verso cui si sta spostando il 'mondo geografico', necessiterà di tecnologie maggiormente concentrate sulla dinamicità e il cambiamento, piuttosto che su una visione fotografica del presente⁹⁹.

Queste sfide, che Goodchild nel 2009¹⁰⁰ indica come i futuri obiettivi del GIS, sono al centro degli sviluppi tecnologici odierni: Google Maps, così come altre applicazioni specifiche, permettono già alcune funzionalità in tempo reale, come visualizzare la presenza di mezzi pubblici e il loro orario di arrivo, taxi nelle vicinanze, orari di apertura dei negozi.

Per una mappatura sempre più precisa, particolareggiata e aggiornata in tempo reale nasce anche il 'Digital twin'.

⁹⁹ ibidem

¹⁰⁰ ibidem

2.1.2 Definizione di GIS

Il GIS è l'unione di sistemi derivati da diversi campi: geografia, agricoltura, botanica, economia, informatica, matematica, fotogrammetria, ecc. ed è utilizzato da un gruppo eterogeneo di utenti, che ne sfruttano diversi aspetti. Per ciò non è stato facile definire univocamente il concetto.

Alcune definizioni di GIS tratte da *An overview and definition of Gis*, di Maguire D. J, 1991¹⁰¹:

- DoE: "a system for capturing, storing, checking, manipulating, analysing and displaying data which are spatially referenced to the Earth"
- Aronoff: "any manual or computer based set of procedures used to store and manipulate geographically referenced data"
- Carter: "an institutional entità, reflecting an organizational structure that integrates technology with a database, expertise and continuous financial support over time"
- Parker: "an information technology which stores, analyses, and displays both spatial and non-spatial data"
- Dueker: "a special case of information systems where the database consists of observations on spatially distributed features, activities, or events, which are definable in space as points, lines, or areas. A GIS manipulates data about these points, lines, and areas to retrieve data for ad hoc queries and analyses"
- Smith et al.: "a database system in which most of the data are spatially indexed, and upon which a set of procedures operated in order to answer queries about spatial entities in the database"

¹⁰¹<http://idecc.cs.uns.edu.ar/~nbb/ccm/downloads/Literatura/OVERVIEW%20AND%20DEFINITION%20OF%20GIS.pdf>

- Ozemoy, Smith e Sicherman: “an automated set of functions that provides professionals with advanced capabilities for the storage, retrieval, manipulation, and display of geographically located data”
- Burrough: “a powerful set of tools for collecting, storing, retrieving at will, transforming and displaying spatial data from the real world”
- Cowen: “a decision support system involving the integration of spatially referenced data in a problem-solving environment”
- Koshkariyov, Tikunov e Trofimov: “a system with advanced geo-modelling capabilities”
- Devine e Field: “a form of MIS (Management Information System) that allows map display of the general information”

Le definizioni presentate sono generali e coprono un ampio raggio di argomenti e attività differenti. Tutte le definizioni condividono però il concetto di GIS come sistema con informazioni geografiche. Questo punto in comune è ribadito nella definizione di Selvam et al.: “A GIS is basically a computerized information system like any other database, but with an important difference: all information in GIS must be linked to a geographic (spatial) reference (latitude/longitude, or other spatial coordinates)”¹⁰² [Fig. 10].

¹⁰²https://books.google.it/books/about/GIS_and_Geostatistical_Techniques_for_Gr.html?id=d5WaDwAAQBAJ&printsec=frontcover&source=kp_read_button&redir_esc=y#v=onepage&q&f=true

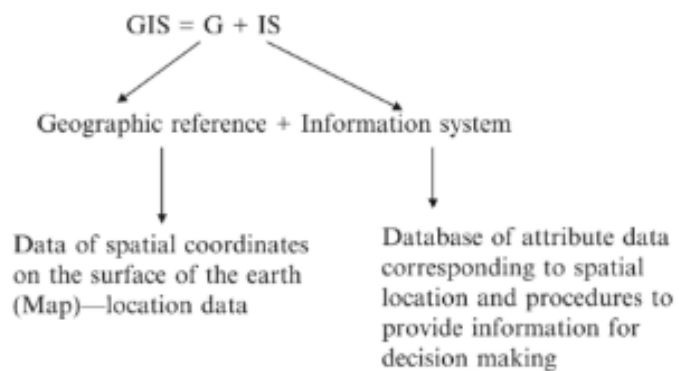


Figura 10 Diagramma di flusso del GIS¹⁰³

Il GIS non raccoglie mappe o immagini. Quello che fa è creare un 'database' dal quale si possono creare mappe con le caratteristiche desiderate. Le diverse caratteristiche sono presenti su 'layer' tematici. Affinché i diversi 'layer' possano comunicare, è necessario che siano riferiti allo stesso riferimento spaziale. E' evidente quindi l'importanza dei riferimenti geografici per il GIS, che lo differenzia da altri 'database'.

¹⁰³ ibidem

2.1.3 Software

Sono ora elencati alcuni software GIS, divisi in tre categorie¹⁰⁴:

software 'open-source'; software commerciali; servizi GIS.

Software 'open-source'¹⁰⁵:

- QGIS (Quantum GIS). Potente strumento di elaborazione dei dati cartografici e geospaziali con numerosi plug-in di supporto
- gvSIG. Mappatura e 'geoprocessing' con plug-in di rendering 3D
- GRASS GIS (Geographic Resources Analysis Support System). Gestione dei dati geospaziali, manipolazione di vettori e raster; sviluppata dall'US Army Corps of Engineers
- ILWIS (Integrated Land and Water Information System). Integra immagini, dati vettoriali e tematici
- SAGA GIS (System for Automated Geoscientific Analysis). Strumento per la modellistica ambientale, l'analisi del terreno e la mappatura 3D

Software commerciali¹⁰⁶:

- ArcGIS (Esri). Nasce nel 1970 e da allora è il leader dei software commerciali. Permette una grande varietà di strumenti e visualizzazioni 3D rapide
- Geomedia (Hexagon Geospatial). Rivale di ArcGIS per anni, è utilizzato per il suo approccio orientato alla soluzione. Offre strumenti di 'data management', visualizzazione (anche 3D), analisi e cartografia

¹⁰⁴https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_geographic_information_systems_software#GIS_as_a_service

¹⁰⁵ <https://gisgeography.com/free-gis-software/>

¹⁰⁶ <https://gisgeography.com/commercial-gis-software/>

- MapInfo Professional (Pitney Bowes). E' focalizzato sulla localizzazione e sulla praticabilità del software
- Global Mapper (Blue Marble). Originalmente sviluppato dalla United States Geological Survey, è uno strumento flessibile il cui focus principale è la gestione di dati di elevazione
- Smallworld (General Electric). Ampiamente utilizzato da servizi elettrici, telecomunicazioni, gas, idrici, offre la possibilità di disegnare e gestire complesse reti spaziali
- AutoCAD Map 3D (Autodesk). Come suggerisce il nome è utilizzato per la gestione di dati 3D. Inoltre riduce il gap fra CAD e GIS

Servizi GIS utilizzabili tramite Internet; si dividono in 3 sottocategorie¹⁰⁷:

SaaS, Software as a Service. Software disponibili su Internet:

- ArcGIS Online. Versione 'cloud' di ArcGIS
- CartoDB. Piattaforma online che offre un software 'open source'
- Mapbox. Creazione di mappe personalizzate per siti web.

PaaS, Platform as a Service. Servizi di analisi/processo e geocoding:

- ArcGIS Online
- Google Maps e Google Earth
- Here WeGO
- Microsoft Bing

¹⁰⁷https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_geographic_information_systems_software#GIS_as_a_service

Daas, Data as a Service. Servizi di visualizzazione dati:

- ArcGIS Online
- Apple Maps
- Google Maps e Google Earth.
- Here WeGO
- OpenStreetMap
- Microsoft Bing Maps

Per questa trattazione sono stati utilizzati Qgis e ArcGIS per la gestione dei dati GIS; in particolare è stato sfruttato maggiormente ArcGIS per le possibilità offerte dai suoi strumenti di analisi, che saranno presentati successivamente. Inoltre è stato utilizzato OpenStreetMap per il download di dati. Infine è stato utilizzato AutoCAD Map 3D in un tentativo di sfruttarne l'interoperabilità fra GIS e BIM.

2.2 BIM

2.2.1 Breve storia del BIM¹⁰⁸

Le basi concettuali del sistema BIM risalgono ai primi giorni dell'informatica. Nel 1962, Douglas C. Englebart ci offre una visione sorprendente della sua idea di futuro architetto nel documento 'Augmenting Human Intellect':

"the architect next begins to enter a series of specifications and data—a six-inch slab floor, twelve-inch concrete walls eight feet high within the excavation, and so on. When he has finished, the revised scene appears on the screen. A structure is taking shape. He examines it, adjusts it... These lists grow into an evermore-detailed, interlinked structure, which represents the maturing thought behind the actual design".

Englebart suggerisce i concetti di design orientato sull'oggetto, manipolazione parametrica e un database di relazioni anticipando idee che diverranno realtà soltanto molti anni dopo.

E' da questi concetti che si sviluppa una visione dell'architettura a partire dai suoi componenti costitutivi, raccolti in database attraverso un processo tassonomico. Uno dei primi progetti a creare con successo un 'building database' è il 'Building Description System' (BDS), il primo software a descrivere singoli elementi di una 'libreria' da cui possono essere ricercati e aggiunti a un modello. Il progetto è ideato negli anni '70 da Charles Eastman, formatosi come architetto a Berkeley e in seguito informatico alla Carnegie Mellon University. Pochissimi architetti hanno avuto la possibilità di lavorare sul sistema BDS e non è chiaro se qualche progetto sia stato realizzato utilizzando il software. BDS è stato un esperimento che ha identificato alcuni dei problemi fondamentali da affrontare nella progettazione architettonica dei prossimi cinquant'anni. Il progetto seguente di Eastman, GLIDE (Graphical Language for Interactive Design), creato nel 1977 alla CMU, esponeva la maggior parte delle caratteristiche di una moderna piattaforma BIM.

¹⁰⁸ <https://www.archdaily.com/302490/a-brief-history-of-bim>

Un altro punto di riferimento nello sviluppo del BIM è la fondazione per merito di Paul Teicholz del Center for Integrated Facility Engineering (CIFE) a Stanford nel 1988. Da qui nasceranno studenti di dottorato e collaborazioni industriali per promuovere lo sviluppo di modelli di edifici 'quadridimensionali' con attributi relativi al tempo della costruzione.

Mentre il BIM stava progredendo rapidamente negli Stati Uniti, è curioso notare come è il Blocco Sovietico ad avere due geni di programmazione che avrebbero finito per definire il mercato del BIM come è oggi conosciuto. Leonid Raiz e Gábor Bojár sarebbero poi diventati rispettivamente co-fondatore di Revit e fondatore di ArchiCAD.

ArchiCAD fu creato nel 1982 a Budapest, in Ungheria, da Gábor Bojár, un fisico che si ribellò al governo comunista e fondò una società privata. Gábor scrisse le prime righe di codice dando in pegno i gioielli di sua moglie e contrabbandando Computer Apple attraverso la cortina di ferro¹⁰⁹. Utilizzando una tecnologia simile al 'Building Description System', Graphisoft, la compagnia fondata da Bojár, nel 1984 rilascia Radar CH per il sistema operativo Apple Lisa. Successivamente questo diventerà ArchiCAD, il che rende ArchiCAD il primo software BIM ad essere disponibile su un personal computer. Il software inizialmente trova difficoltà a diffondersi ed è solo nel 2007-2011 che inizia a guadagnare utenti, principalmente come strumento per piccoli progetti commerciali e residenziali in Europa.

Graphisoft afferma che a oggi più di un milione di progetti sono stati disegnati con ArchiCAD. Nel 1985, poco dopo che Graphisoft aveva iniziato a vendere Radar CH, in Massachusetts, USA, viene fondata la Parametric Technology Corporation (PTC) che nel 1988 rilascia la prima versione di Pro/ENGINEER. Questo è un programma CAD che utilizza un motore di modellazione parametrica basato su vincoli. Dotati della conoscenza sviluppata con Pro / ENGINEER, Irwin Jungreis e Leonid Raiz si separano da PTC e avviano la loro società di software chiamata Charles River Software a Cambridge, MA.

¹⁰⁹http://news.bbc.co.uk/2/hi/business/2522537.stm?utm_medium=website&utm_source=archdaily.com

Nel 2000 la società sviluppa un programma chiamato "Revit", una parola inventata che intende esprimere 'revisione' e velocità, scritto in C ++, che utilizza un motore di modifica parametrica, reso possibile dalla programmazione orientata agli oggetti. Nel 2002, Autodesk acquista l'azienda e inizia a promuovere fortemente il software.

Revit ha rivoluzionato il mondo del 'Building Information Modeling' creando una piattaforma che all' interno di un ambiente di programmazione visiva permette la creazione di famiglie parametriche e consente di aggiungere un attributo temporale a un componente per consentire che una "quarta dimensione", il tempo, sia associata all'edificio. Ciò consente agli appaltatori di generare programmi di costruzione basati sui modelli BIM e simulare il processo di costruzione.

Per facilitare la collaborazione fra i diversi specialisti al lavoro sullo stesso progetto nel 2004 Revit rilascia la possibilità di creare 'workset' di lavoro, ossia 'ambienti' di lavoro specifici per ogni utente, che può visualizzare l' intero progetto, ma modificare soltanto gli elementi del workset a cui gli è consentito accedere.

Alcune piattaforme BIM hanno una piccola quota di mercato, ma hanno avuto un grande impatto sul modo di progettare. Fra queste c'è Generative Components (GC), sviluppato da Bentley Systems nel 2003. Il sistema GC è focalizzato sulla flessibilità parametrica, sulla scultura di geometrie e il supporto di NURBS, cioè 'Non Uniform Rational Basis-Splines', un modello matematico comunemente usato in computer grafica per generare e rappresentare curve e superfici. L'interfaccia si basa su un ambiente di 'scripting' basato su nodi per generare moduli. Digital Project è un programma simile sviluppato da Gehry Technologies intorno al 2006 sulla base di CATIA, un programma di progettazione sviluppato da Dessault Systems, un produttore francese di aeroplani. Queste due piattaforme hanno generato una sorta di rivoluzione nel design, poiché il potere di iterare operazioni e trasformare forme ha portato a forme architettoniche particolarmente complesse e interessanti, praticamente impossibili da ottenere con un metodo di modellazione tradizionale. Anche Revit si è

adattato a queste tendenze, rilasciando nel 2013 la prima versione di Dynamo, una piattaforma di programmazione grafica basata su nodi.

Sebbene il concetto generale e la tecnologia alla base del BIM risalgano alla prima metà degli anni '80, l'industria ha da pochi anni iniziato a comprendere i potenziali benefici del 'Building Information Model'. Le tendenze nell'interazione uomo-computer, realtà aumentata, 'cloud computing', 'generative design' e progettazione e costruzione virtuale continuano a influenzare il rapido sviluppo del BIM.

2.2.2 Definizione di BIM

Nonostante il concetto si fosse sviluppato a cavallo degli anni '70 e '80, l'acronimo BIM compare per la prima volta soltanto nel 2002, nel white paper pubblicato da Autodesk intitolato "Building Information Modeling,"¹¹⁰. Dal 2003, quando Jerry Laiserin organizza un dibattito 'face-to-face' sul BIM fra Autodesk e Bentley¹¹¹, il termine BIM inizia ad essere via via sempre più utilizzato.

Oggi però l'acronimo può intendere concetti diversi secondo il processo edilizio cui è riferito. A testimonianza di questa ambiguità nella letteratura internazionale si possono trovare diverse definizioni di BIM. Se ne riporta una selezione tratta da Osello, 2012¹¹².

1. BIM come Building Information Modelling/Modeling:

- "Building Information Modeling (BIM) is one of the most promising developments in the architecture, engineering and construction (AEC) industries. With BIM technology, an accurate virtual model of a building is constructed digitally. When completed, the computer-generated model contains precise geometry and relevant data needed to support the construction, fabrication, and procurement activities needed to realize the building"¹¹³

- "Building Information Modelling [...] is a method that is based on a building model containing any information about the construction. In addition to the contents of the 3D object-based models, this is information such as specifications, building elements specifications, economy and programmes"¹¹⁴

- "Building Information Modeling (BIM) has become a valuable tool in some sectors of the capital facilities industry. However in current usage, BIM technologies tend to be applied within vertically integrated business functions rather than horizontally across an entire facility lifecycle. Although the term BIM is routinely used within the context of vertically integrated applications, the NBIMS Committee has chosen to continue using this

¹¹⁰ "Autodesk (2002). Building Information Modeling. San Rafael, CA, Autodesk, Inc" (PDF). laiserin.com.

¹¹¹ Op cit 31

¹¹² Osello A., *Il futuro del disegno con il BIM per ingegneri e architetti*, Dario Flaccovio Ed., pp. 31-33, 2012

¹¹³ Eastman K.L.C., Teicholz P., Sacks R., *BIM Handbook: a guide to building information modeling for owners managers, designers, engineers, and contractor*, Second edition 2011

¹¹⁴ BIPS National agency for enterprise and construction 3d working method 2006, no. April, 2007

familiar term while evolving the definition and usage to represent horizontally integrated building information that is gathered and applied throughout the entire facility lifecycle, preserved and interchanged efficiently using open and interoperable technology for business, functional and physical modeling, and process support and operations”¹¹⁵

- “[...] a model needs only two essential characteristics to be described as a BIM model. The first is that it must be a three-dimensional representation of a building (or other facility) based on objects, and second, it must include some information in the model or the properties about the objects beyond the graphical representation”¹¹⁶

2. BIM come Building Information Model:

- “A Building Information Model (BIM) is a digital representation of physical and functional characteristics of a facility. As such it serves as a shared knowledge resource for information about a facility forming a reliable basis for decisions during its lifecycle from inception onward. A basic premise of BIM is collaboration by different stakeholders at different phases of the life cycle of a facility to insert, extract, update or modify information in the BIM to support and reflect the roles of that stakeholder. The BIM is a shared digital representation founded on open standards for interoperability”¹¹⁷

- “The Building Information Model is a data-rich, object- oriented, intelligent and parametric digital representation of the facility, from which views and data appropriate to various users’ needs can be extracted and analysed to generate information that can be used to make decisions and improve the process of delivering the facility”¹¹⁸

- “A Building Information Model is a digital representation of physical and functional characteristics of a facility. As such, it serves as a shared knowledge resource for information about a facility forming a reliable basis for decisions during its life cycle from inception onward”¹¹⁹

¹¹⁵ National institute of building science National building information modeling standard, Nist, 2007

¹¹⁶ Brusaporci S., *Handbook of Research on Emerging Digital Tools for Architectural Surveying, Modeling, and Representation*, 2015

¹¹⁷ Smith D.K., *Getting started and Working with Building Information Modeling*. Facilities

¹¹⁸ Underwood J., *Handobook of Research on Building Information Modeling and Construction Informatics: Concepts and Tecnologie*, 2009

¹¹⁹ United States National BIM Standard, VI 2008

3. BIM come Beyond Information Models:

- “BIM is not a software application. BIM is an information- based system that builds long-term value and advances innovation. It improves how projects get designed and built. It builds economic value in many areas. It improves the environment and people’s lives. BIM is an evolutionary change in how people relate to the built environment. The speed of this change creates many opportunities for ambiguity. [...] we define BIM as Beyond Information Models to align with the universal nature of the concept”¹²⁰

¹²⁰ Jermigan F., *BIG BIM little BIM: The Practical Approach to Building Information Modeling Integrated Practice done the right Way!* 4Site Press, 2007

2.2.3 Software

Una grande varietà di software BIM è proposta dal mercato e utilizzata da diverse categorie di professionisti. A causa dei diversi formati dei file, il passaggio di progetti fra software comporta una perdita d'informazioni, fondamentali per la struttura specifica del modello BIM. Per risolvere questa inefficienza nel 1995¹²¹, sotto la stimolo di Autodesk, viene sviluppato il formato file IFC (International Foundation Class) come standard neutro e aperto per facilitare l'interoperabilità nell'industria di architettura, ingegneria e costruzioni.

Il formato è sviluppato da buildingSMART (prima International Alliance for Interoperability), che dà una certificazione ai software in grado di importare ed esportare efficacemente in formato IFC. L'elenco completo è a disposizione sul sito di buildingSMART¹²²

Si elencano i principali¹²³:

- Autodesk Revit. Uno dei software BIM più utilizzati. E' studiato specificatamente per ingegneri strutturali e MEP, architetti e appaltatori. Permette una progettazione dell'intero ciclo vita dell'edificio fornendo una piattaforma di comunicazione semplice e precisa per lo scambio di competenze fra professionisti di varie discipline.
Inoltre attraverso il programma di programmazione dedicato, Dynamo, consente una progettazione basata su algoritmi, in modo da velocizzare o rendere possibili pratiche altrimenti irrealizzabili. E' compatibile soltanto con Microsoft Windows
- Graphisoft ArchiCAD. Primo software commerciale a essere stato creato, ArchiCAD è ancora oggi uno degli strumenti più utilizzati per un progetto BIM. Pensato per 'interior designer', architetti e urbanisti, soddisfa le esigenze del moderno design architettonico 2D / 3D e delle funzioni BIM, dalla pianificazione alla realizzazione del progetto fino al 'facilities management'. E' disponibile per Mac e Windows

¹²¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Industry_Foundation_Classes

¹²² <https://www.buildingsmart.org/compliance/software-certification/certified-software/>

¹²³ <https://financesonline.com/building-information-modeling/>

- Bentley Systems AECOsim Building Designer. E' un software di progettazione di edifici multidisciplinare che consente agli utenti di creare, analizzare e gestire infrastrutture di varie dimensioni, forma e complessità. Permette una efficace collaborazione fra architetti e ingegneri con strumenti e flussi di lavoro condivisi
- Allplan Architecture. E' un software che permette a architetti e ingegneri la possibilità di progettare edifici con creatività, libertà e flessibilità. Le funzionalità di modellazione 3D sono potenziate dall'integrazione con il software di modellazione Parasolid di Siemens.
Il software BIM permette di esportare e condividere facilmente i dati con partner di pianificazione e altre parti interessate, nonché di scambiare facilmente i dati tra progetti BIM
- Acca PriMus IFC è una piattaforma per stime di costruzione attraverso modelli BIM. Prendendo le misure da un modello BIM 3D genera automaticamente la relativa distinta delle quantità. Questo software è specializzato nell'automazione dell'acquisizione di costi e quantità di progetti da modelli CAD 3D o BIM, consentendo di essere aggiornati sulle stime del progetto a ogni modifica

Per la trattazione è stato utilizzato Autodesk Revit 2019 per la creazione del modello BIM. Inoltre è stata fondamentale la possibilità di utilizzare Dynamo, la piattaforma di programmazione grafica specifica di Revit, per poter trattare le informazioni provenienti dal GIS.

2.3 Interoperabilità GIS-BIM

E' stata descritta la 'smart city' come una città che attraverso la creazione, l'analisi e l'utilizzo d'informazioni riguardanti l'ambiente urbano in ogni sua dimensione, riesce a garantire la qualità della vita desiderata ai suoi abitanti ottenendo al tempo stesso risultati sostenibili in termini economici, sociali e ambientali.

E' stato presentato il concetto di 'digital twin' e come questo possa essere uno strumento chiave per la catalogazione, la visualizzazione, l'analisi e la creazione di nuovi dati utili alla gestione della vita urbana.

Considerata la centralità assoluta che i 'data' evidentemente rivestono nella realizzazione di queste dinamiche, un possibile sviluppo può essere l' utilizzo integrato di GIS e BIM.

Questi due concetti sono stati in precedenza definiti e in particolare è stata evidenziata la loro capacità di gestire e elaborare informazioni.

Sebbene condividano il concetto essenziale di descrizione del mondo reale attraverso la combinazione di rappresentazione e informazione, sono stati sviluppati come soluzioni a problemi e domini differenti, e perciò presentano delle divergenze.

Il BIM può essere utilizzato per creare, gestire e condividere i dati del ciclo di vita di strutture verticali, ad esempio edifici, mentre il GIS può archiviare, gestire e analizzare i dati che descrivono l'ambiente urbano, distribuito in senso orizzontale¹²⁴. Il BIM si concentra sull' edificio in sé, spesso slegato dal contesto, mentre il GIS è specializzato nelle informazioni geospaziali che ne definiscono l' esterno. Il BIM presta maggiore attenzione alla rappresentazione del progetto e ai suoi dettagli interni, ossia 'micro-level data', mentre il GIS è utilizzato per generare informazioni a livello macro, come grafici topografici. Uno si occupa a livello di dettaglio dei componenti degli edifici e sulle informazioni progettuali, quali costo e crono programma, mentre l'altro interpreta gli edifici come forme e componenti in un'ottica geografica. Infine, anche se ne esistono alcuni esempi, il BIM solitamente rappresenta oggetti che non esistono prima del modello, mentre il GIS cerca di

¹²⁴ Ma Z., Ren Y., *Integrated Application of BIM and GIS: An Overview*, Procedia Engineering, 196, pp. 1072-1079, 2017

rappresentare ciò che già esiste, in modo che sia riconoscibile il più facilmente possibile¹²⁵

¹²⁶

Le loro differenze sono riassumibili in:

diversi utenti, diversi focus applicativi, diverse fasi di sviluppo, diverse scale spaziali, diversi sistemi di coordinate, diverse rappresentazioni semantiche e geometriche, diversi livelli di granularità e diversi metodi di memorizzazione e accesso alle informazioni¹²⁷.

La necessità di una visione globale della città, sia in larghezza (casa, quartiere, città) che in profondità (architettura, strutture, impianti), ha spinto l'interesse generale ad approfondire la natura sovrapposta del BIM e del GIS. L'utilizzo integrato di queste tecnologie è in grado di portare benefici in entrambi i campi di azione.

Le informazioni provenienti da un GIS possono facilitare applicazioni BIM quali la selezione del sito e la disposizione dei materiali in loco, mentre i modelli BIM possono aiutare a generare modelli dettagliati in un GIS e portare a una maggiore efficacia nella gestione dei progetti.

Allo scopo di sfruttare questo sistema olistico sono stati fatti vari tentativi per far comunicare le due tecnologie, nonostante le differenze che li contraddistinguono.

In Wang et al., 2019¹²⁸ si può trovare un'accurata recensione delle ricerche sull'interoperabilità fra GIS e BIM [fig. 11].

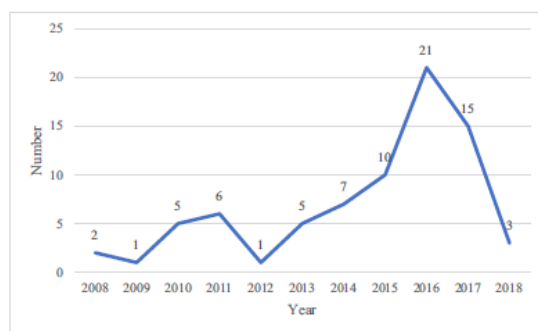


Figura 11 Numero di articoli per anno (il 2018 è riferito ai primi tre mesi)¹²⁹

¹²⁵ Liu X., Wang X., Wright G., Cheng J.C.P., Li X., *A State-of-the-Art Review on the Integration of Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information System (GIS)*, ISPRS Int. J. Geo-Inf., 6(2), 2017

¹²⁶ Wang H., Pan Y., Luo X., *Integration of BIM and GIS in sustainable built environment: A review and bibliometric analysis*, Automation in Construction, 103, , pp. 41-52, 2019

¹²⁷ Liu X., ecc., op.cit.

¹²⁸ Wang H., Pan Y., Luo X., op.cit.

¹²⁹ ibidem

Sostanzialmente si può affermare che in questo contesto esistono due formati principali di scambio: 'CityGML', sviluppato da Open Geospatial Consortium, e 'Industry Foundation Classes' (IFC), da BuildingSmart.

CityGML è legato al GIS e permette di rappresentare modelli 3D di città con caratteristiche semantiche. E' strutturato in 'Levels of Detail' (LOD) da 0 a 4.

IFC è il formato principale per l'interoperabilità all'interno del BIM. In un modello IFC le entità sono divise in categorie e possono appartenere a diversi Levels of Development (LODt), da 100 a 500. Il LODt si riferisce al grado di completamento di un elemento BIM rispetto al ciclo vita della controparte reale¹³⁰.

I due concetti sono correlati e condividono una serie di somiglianze in termini d'informazioni sull'architettura e sugli attributi, ma IFC contiene informazioni molto più dettagliate che CityGML, e una completa 'traduzione' fra i due formati non è facile.

Un metodo comune per connettere GIS e BIM è quello di operare conversioni o estensioni fra i formati esistenti. Ciò porta a un gran numero di sperimentazioni che utilizzano 'plug-in', o nuovi formati intermedi, per colmare la distanza. Uno dei più popolari metodi di conversione è il cosiddetto 'Extract, Transform, Load' (ETL), che è utilizzato da piattaforme come 'Feature Manipulation Engine' (FME).

Un altro sistema d'integrazione dei dati è quello basato su 'Semantic Web Technologies'. In questo caso l'output non è un vero modello, ma un insieme di riferimenti ontologici che contengono informazioni comuni, utile per la conversione sia di CityGML che di IFC.

Ogni metodo presenta i suoi pro e contro e soddisfa diverse necessità, ma non è ancora presente una soluzione definitiva^{131 132 133}.

Wang et al. dividono i diversi metodi in tre categorie secondo il ruolo di BIM e GIS¹³⁴:

- BIM comanda e GIS supporta:
Il modello integrato è dominato dal modello BIM e il modello GIS viene utilizzato come modello ausiliario per importare o integrare i dati dal modello GIS nel modello BIM.

¹³⁰ Barbato D., De Marchi M., Pristeri G., *GIS-BIM Interoperability for Regeneration of Transurban Areas*, 2018

¹³¹ ibidem

¹³² Liu X., ecc., op.cit.

¹³³ Wang H., Pan Y., Luo X., op.cit.

¹³⁴ Ibidem

- GIS comanda e BIM supporta:
Il modello integrato è dominato dal modello GIS e il modello BIM viene utilizzato come modello ausiliario per convertire il modello BIM in un modello GIS.
- BIM e GIS egualmente coinvolti:
Il modello integrato si basa su un rapporto equilibrato tra i modelli BIM e GIS, i cui dati vengono uniti su piattaforme di terze parti.

Nella trattazione è stato testato un metodo del primo tipo, BIM dominante su GIS, attraverso il quale, con l'utilizzo di un software di programmazione, è stato possibile convertire le informazioni contenute su layer GIS in un modello BIM 3D contenente tutte le stesse informazioni.

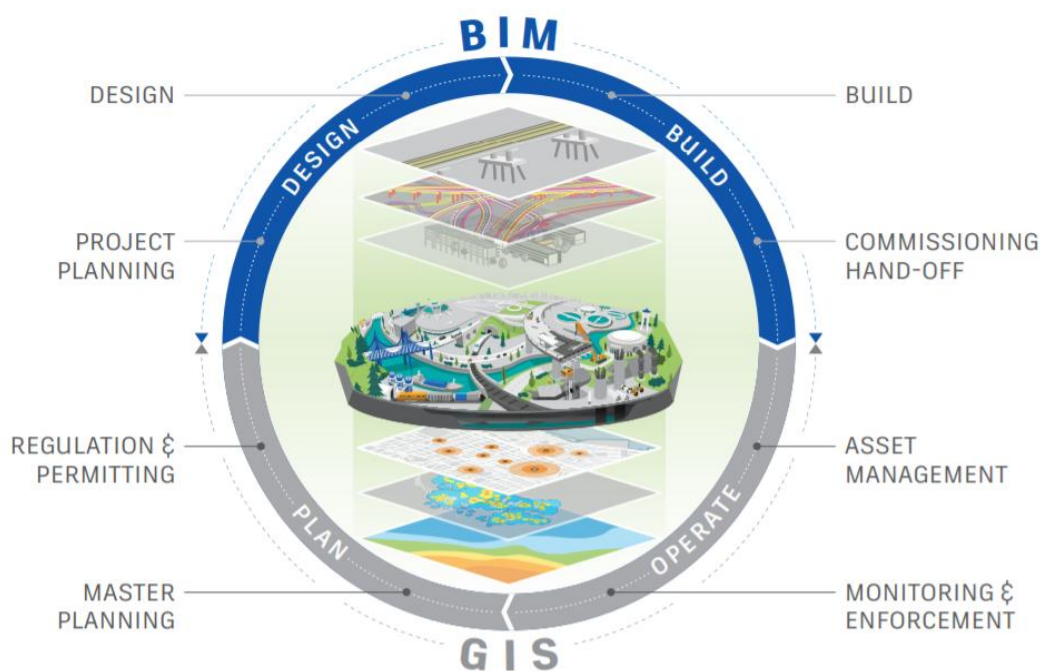


Figura 12 Workflow ideale GIS BIM¹³⁵

¹³⁵ <https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/pdfs/autodesk-bring-together-bim-gis-ebook.pdf>

Capitolo 3. Caso studio

La trattazione presenta un metodo per ottenere un certo grado d'interoperabilità GIS-BIM al fine della creazione di un 'digital twin' dell'area urbana di Mirafiori, a Torino.

3.1 Mirafiori

Il caso studio è l'area circostante il comprensorio industriale di Fiat Mirafiori, alla periferia Sud di Torino. Nello specifico sono analizzate l'ex circoscrizione 9, Nizza Millefonti - Lingotto – Filadelfia, e la circoscrizione 2, accorpamento dei quartieri Mirafiori Sud, Mirafiori Nord e Santa Rita.

“Lo stabilimento Fiat Mirafiori è l'emblema di Torino città industriale, imponente scenario dell'affermazione del fordismo e delle sue ricadute nella storia politica, economica e sociale del capoluogo piemontese”¹³⁶.

Il complesso industriale, che copre una superficie di 2.000.000 m², fu il più grande comprensorio industriale italiano ed è la fabbrica automobilistica ancora in funzione più antica d'Europa¹³⁷.

Inaugurato su terreni agricoli nel 1939 per sostituire l'obsoleta struttura del Lingotto, venne studiato per dare lavoro a oltre 20'000 operai. Diventò operativo dopo la Seconda Guerra Mondiale, durante la quale fu colpito sette volte da bombardamenti.

Nel 1956 viene ampliato con la costruzione dell'area di Mirafiori Sud e arriva negli anni centrali del 'boom economico' ad avere 75 mila dipendenti.

La Fiat, che rappresentava allora il modello più avanzato del 'welfare aziendale', aveva provveduto alla costruzione di oltre 2'500 alloggi destinati ai dipendenti.

Negli anni '80 iniziano le difficoltà per lo stabilimento, con il decentramento produttivo e la crescita dell'automazione che alla fine degli anni '90 porta a 25'000 il numero di lavoratori¹³⁸.

L'ultima utilitaria prodotta nelle fabbriche torinesi è stata l'Alfa Mito, la cui produzione è cessata nel 2018.

¹³⁶ <http://www.museotorino.it/view/s/5431e6fb4be949bfb79fc973c6576165>

¹³⁷ https://en.wikipedia.org/wiki/Fiat_Mirafiori

¹³⁸ <https://www.panorama.it/news/economia/lo-stabilimento-fiat-mirafiori-compie-80-anni-storia-foto>

Oggi a Mirafiori si produce unicamente il Suv Maserati 'Levante' con 11'000 vetture prodotte e meno di 10'000 dipendenti. Si attende la produzione della nuova 500 elettrica, che dovrebbe partire nel 2020 e che occuperà 1200 nuovi lavoratori¹³⁹.

Le circoscrizioni analizzate, la 2 e l'ex 9, ora parte della circoscrizione 8, sono aree periferiche fortemente caratterizzate dallo sviluppo industriale torinese del '900.

Nello sviluppo di queste aree ha avuto un ruolo fondamentale l'impatto dei due stabilimenti produttivi Fiat: prima il Lingotto (1916-1922) e quindi Mirafiori (1936-1939, 1956); inizialmente grandissimi poli d'occupazione e d'attrazione, e ora, il Lingotto, chiuso nel 1982, e Mirafiori, fortemente ridimensionato, aree urbane che oggi devono essere riviste in ottica post-industriale.

L'area compresa dall'unione delle circoscrizioni 2 e 9 segna il confine meridionale di Torino. Confina ad Est con il comune di Moncalieri, a Sud con Nichelino e Beinasco, a Ovest con Orbassano e Grugliasco. A Nord è delimitata dalla linea ferroviaria Torino-Modane e da corso Orbassano, a Est con corso Unità d'Italia, fiume Po.



Figura 13 Vista satellitare dell'unione delle ex circoscrizioni 2, 10 e 9

¹³⁹ <http://www.torinotoday.it/economia/produzione-auto-2019-fiat-mirafiori.html>

3.2 Data collection

E' già stata sottolineata l'importanza dei dati nel processo di creazione del 'digital twin' e in quanto elemento essenziale sia del sistema GIS che del BIM.

I dati ricercati in particolare erano relativi agli edifici dell'area studiata.

Attraverso il Geoportale del Comune di Torino¹⁴⁰ non è stato possibile scaricare un file contenente informazioni relative agli edifici, poiché i dati scaricabili del costruito arrivano soltanto fino al grado di precisione dei lotti. A parte ciò è possibile scaricare altri dati utili legati a diversi campi, quali amministrativo o della viabilità.

E' stato quindi testato l'utilizzo del catalogo di OpenStreetMap¹⁴¹, progetto GIS 'open-source' i cui dati sono scaricabili anche attraverso un rapido 'plug-in' disponibile su QGIS, 'QuickOSM'.

Anche attraverso questa libreria è possibile scaricare dati relativi a diverse esigenze e sono disponibili dati relativi agli edifici, ma non tutti gli edifici della zona in esame sono presenti e descritti con informazioni accurate e dettagliate. Inoltre i dati reperibili su questa piattaforma sono dati liberamente aggiunti da altri utenti, quindi potrebbero non essere completamente affidabili.

Si è scelto quindi di utilizzare i dati del progetto DB_TOPOGRAFICO_TO reperiti tramite il LARTU (Laboratorio di Analisi e Rappresentazioni Territoriali ed Urbane)¹⁴² del Politecnico di Torino.

All'interno del file comprensivo, oltre a file relativi alla viabilità o alla vegetazione, c'è una serie di file che descrivono esaurientemente gli immobili e le antropizzazioni di Torino.

Fra questi sono stati utilizzati due file: 020101_UNITA_VOLUMETRICA e 020102_EDIFICIO. Entrambi contengono i poligoni che rappresentano la forma al suolo degli edifici. Il primo contiene informazioni su quota al suolo, altezza e numero di piani degli edifici; il secondo su tipologia edilizia, categoria d'uso, epoca di costruzione e nome.

Una volta ottenuti i dati desiderati è stato necessario elaborarli su un software GIS.

¹⁴⁰ <http://geoportale.comune.torino.it/geocatalogocoto/?sezione=catalogo>

¹⁴¹ https://www.google.com/search?q=openstreetmap&rlz=1C1EJFA_enIT773IT778&oq=ope&aqs=chrome.1.69i59l2j69i61j69i60j69i61j69i65l3.1999j1j1&sourceid=chrome&ie=UTF-8

¹⁴² http://www.lartu.polito.it/dove_siamo

3.3 Creazione modello GIS

3.3.1 Unione modelli GIS

La seguente parte della trattazione è svolta con l'utilizzo di ArcGIS Pro.

Come detto i dati desiderati sono contenuti su due file separati. Affinché le informazioni che descrivono il medesimo edificio siano importabili su Revit come tali, è necessario operare un'unione dei due 'layer' GIS.

Una possibilità di unione disponibile è attraverso la comparazione di due attributi contenenti valori comuni. In questo caso è utilizzabile questa tecnica poiché i due layer condividono i valori appartenenti agli attributi chiamati ID e CIT_AR. E' stata quindi testata questa possibilità, attraverso il comando 'Add Join', ma il risultato, seppur soddisfacente, per alcuni edifici non è riuscito.

E' stato quindi utilizzato un altro comando simile, 'Spatial Join', che opera l'unione di due layer basandosi sulla loro relazione spaziale. Viene quindi usata questa opzione e il risultato è ottimale: le caratteristiche degli edifici sovrapposti vengono unite in un unico file che raccoglie tutti gli attributi dei 'layer' differenti. Affinché l'operazione riesca, si deve utilizzare come base, ossia come 'target features', il layer 020101_UNITA_VOLUMETRICA, che presenta una divisione degli edifici più dettagliata. Facendo il contrario l'operazione riesce, ma con imprecisioni e perdite di dati.

I dati sono però riferiti all'intera città di Torino. E' stato quindi corretto il modello GIS, eliminando gli elementi non compresi nell'area di interesse.

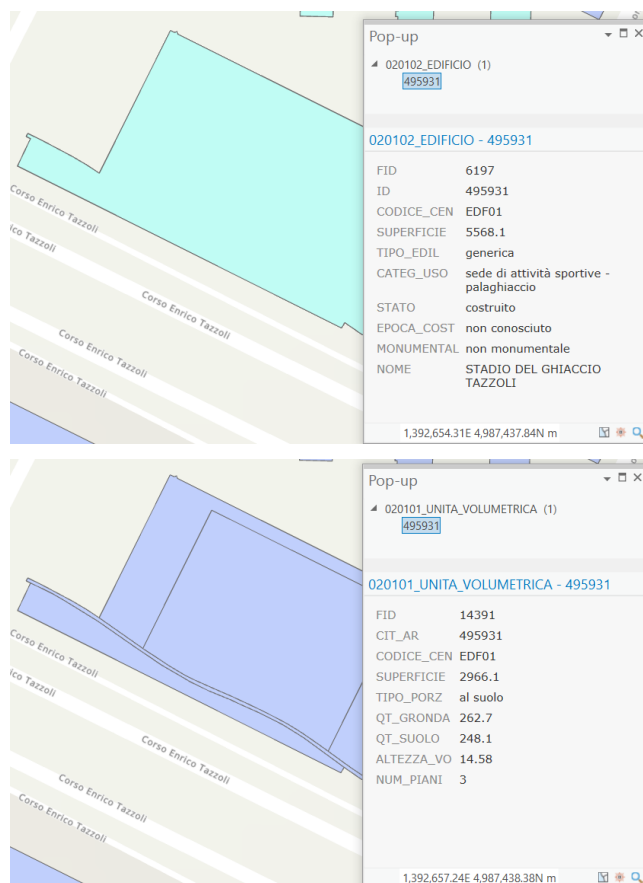


Figura 14 Tabella degli attributi del layer 020102_EDIFICIO e 020101_UNITA_VOLUMETRICA

Pop-up	
c020101_UNITA_VOLUMETRICA_Sp (1)	
1	
c020101_UNITA_VOLUMETRICA_Sp - 1	
OBJECTID	14392
Join_Count	1
TARGET_FID	14391
CIT_AR	495931
CODICE_CEN	EDF01
SUPERFICIE	2966.1
TIPO_PORZ	al suolo
QT_GRONDA	262.7
QT_SUOLO	248.1
ALTEZZA_VO	14.58
NUM_PIANI	3
ID	495931
TIPO_EDIL	generica
CATEG_USO	sede di attività sportive - palaghiaccio
STATO	costruito
EPOCA_COST	non conosciuto
MONUMENTAL	non monumentale
NOME	STADIO DEL GHIACCIO TAZZOLI
Shape_Length	220.874672
Shape_Area	2966.16436

Figura 15 Risultato dell'unione spaziale della tabella degli attributi

3.3.2 Analisi urbane

Una volta ottenuto il modello GIS di base, sono state fatte delle analisi di tipo urbano sull'area di interesse. Per fare ciò è stato utilizzato lo strumento 'Network Analysis' presente in ArcGIS, che utilizza una rete stradale presente sui suoi server online, per elaborare analisi della viabilità. Se la rete di collegamento non fosse presente o ne servisse una di un altro tipo, come ad esempio quella delle piste ciclabili, si può utilizzare qualsiasi altro file composto da linee come 'network', sul quale si baseranno i calcoli dello strumento di ArcGIS.

Sono state fatte due tipi di analisi:

- Analisi della distanza in minuti dallo stabilimento di Fiat Mirafiori al resto della città, a seconda del mezzo di trasporto utilizzato
- Analisi dei percorsi più veloci per raggiungere alcuni servizi principali dell'area di studio

Per la prima analisi si deve utilizzare la funzione 'Service Area'.

Si può scegliere il punto da cui calcolare la distanza e se il punto selezionato deve essere l'arrivo o il luogo di partenza. Inoltre si può scegliere il mezzo con cui si viaggia e infine il giorno e l'ora in cui eseguire l'analisi.

In questo caso si è scelto di arrivare all'ingresso principale, su Corso Giovanni Agnelli; il giorno e l'ora non sono stati impostati, per ottenere dei dati standard.

L'analisi è stata eseguita per il viaggio in macchina, in bicicletta e a piedi.

Lo strumento calcola automaticamente le strade percorribili in macchina piuttosto che a piedi e la velocità in base ai limiti stradali. Per la velocità a piedi è impostato il valore di 5 km/h, ma se necessario è modificabile. Sfortunatamente non è presente una modalità già impostata nello strumento per il viaggio in bici. Per poterla calcolare si è quindi dovuto impostare manualmente la velocità media di 20 km/h e selezionare le strade da utilizzare per il calcolo. È stato scelto di utilizzare lo stesso 'network' del transito a piedi.

Infine è possibile scegliere le soglie con cui il programma divide le distanze e le rappresenta con poligoni. Di seguito sono presentati i risultati delle tre diverse analisi.

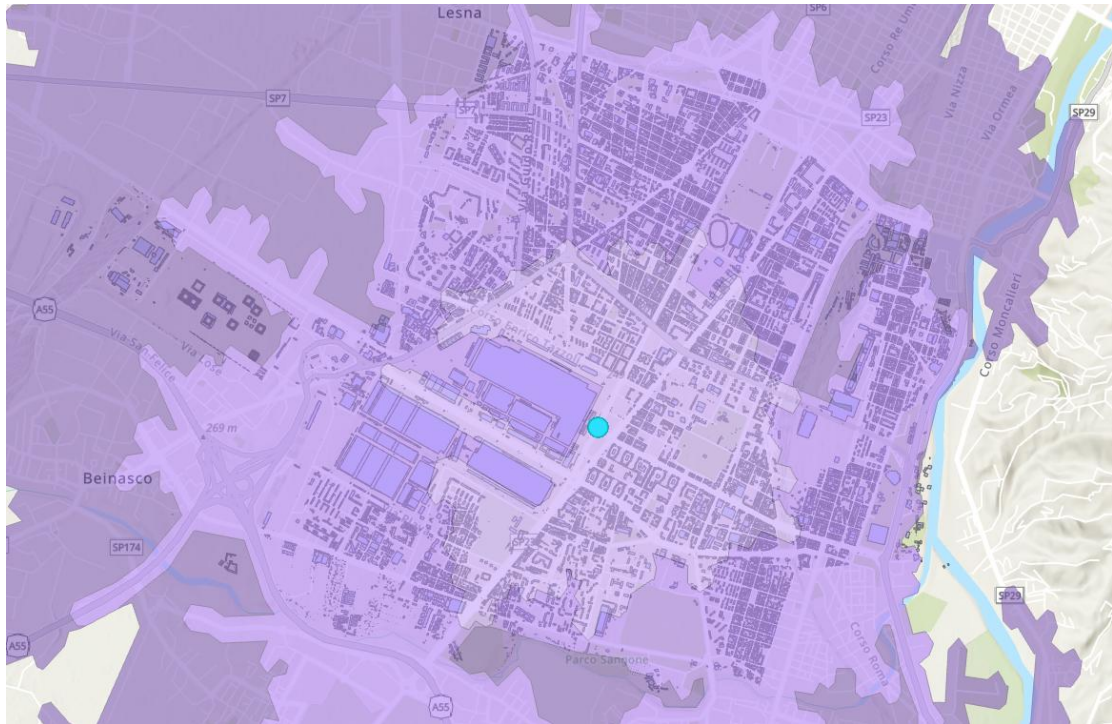


Figura 16 Distanze percorribili in macchina in intervalli di 4, 8, 12 minuti

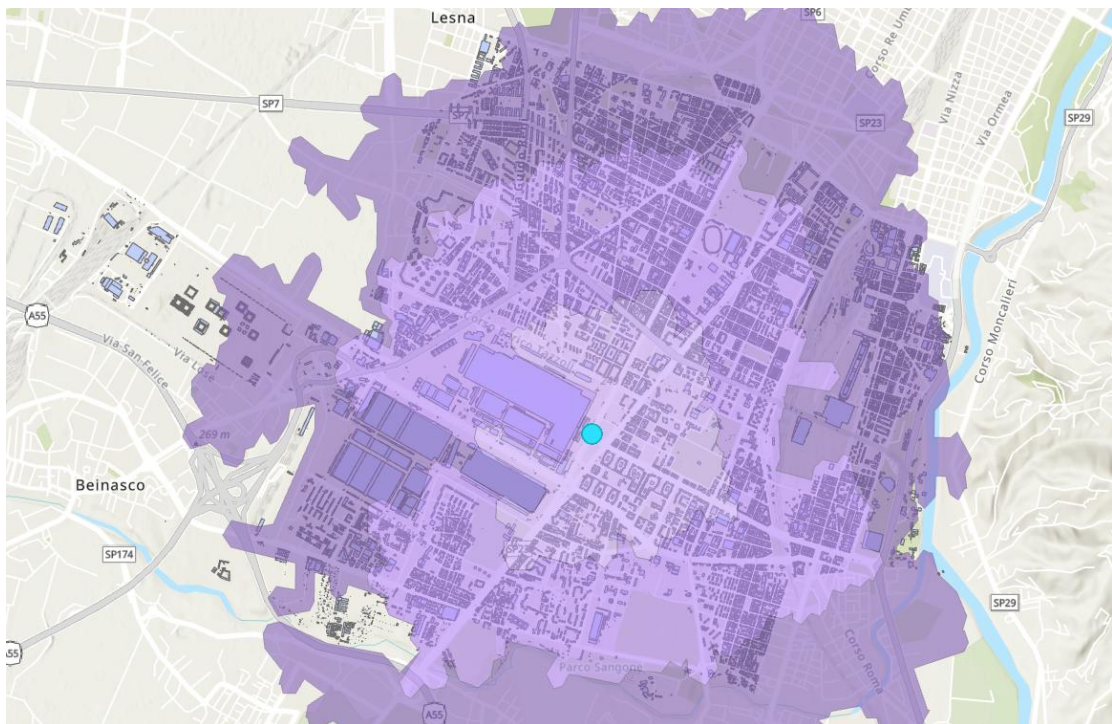


Figura 17 Distanze percorribili in bici in intervalli di 4, 8, 12 minuti

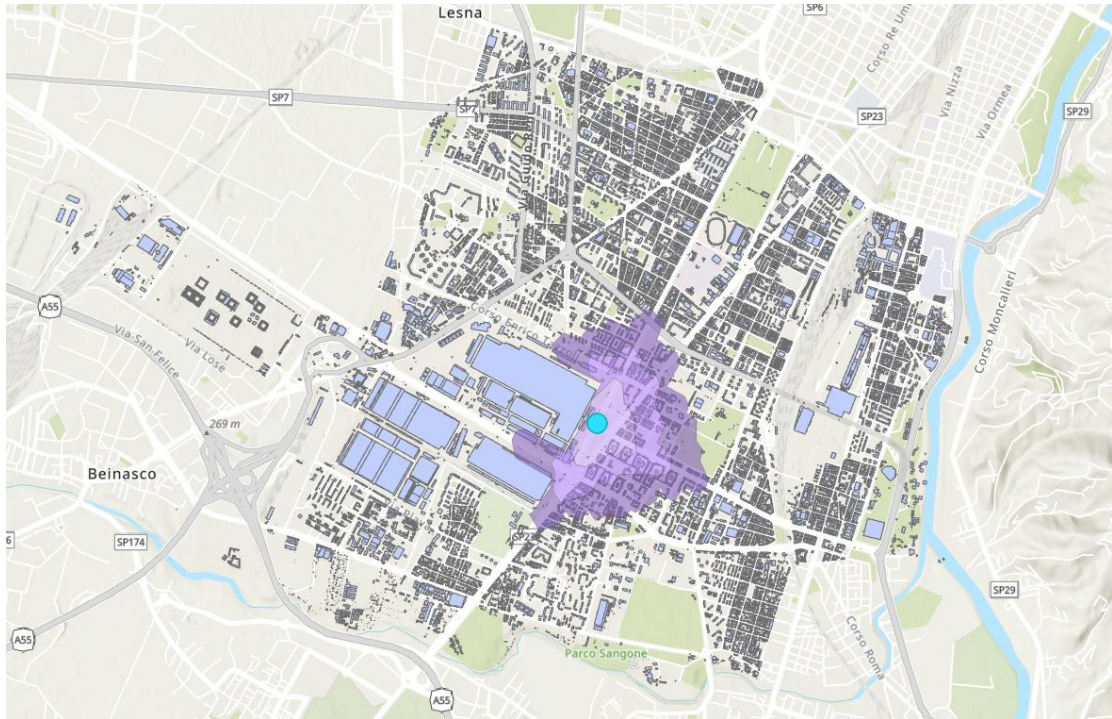


Figura 18 Distanze percorribili a piedi in intervalli di 4, 8, 12 minuti

Per la seconda analisi è stato usato il comando 'Route' che permette di visualizzare il tragitto più breve, in termini di tempo o distanza, fra due punti selezionati, e di calcolare la durata e la lunghezza in km di tale tragitto. Anche in questo caso è possibile impostare una data del viaggio.

Per presentare questa analisi sono state eseguiti tre esempi, collegando tre punti d'interesse all'ingresso di Mirafiori in Corso Agnelli. I risultati sono stati presentati in sovrapposizione con la prima analisi, in modo da poter confrontare e confermare la coerenza.

1. Percorso più breve percorribile a piedi fra la stazione ferroviaria di Torino Lingotto e Mirafiori
2. Percorso più breve percorribile in bicicletta fra i resti del castello di Mirafiori e Mirafiori
3. Percorso più breve percorribile in macchina fra il Pala Alpitour e Mirafiori

Di seguito sono presentati i risultati.

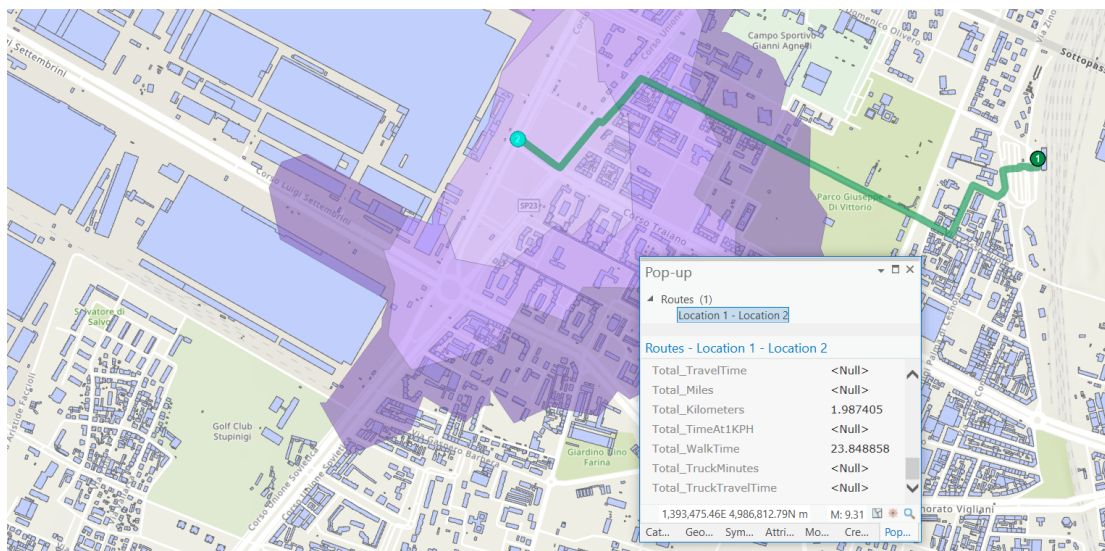


Figura 19 Percorso più breve percorribile a piedi fra la stazione ferroviaria di Torino Lingotto e Mirafiori

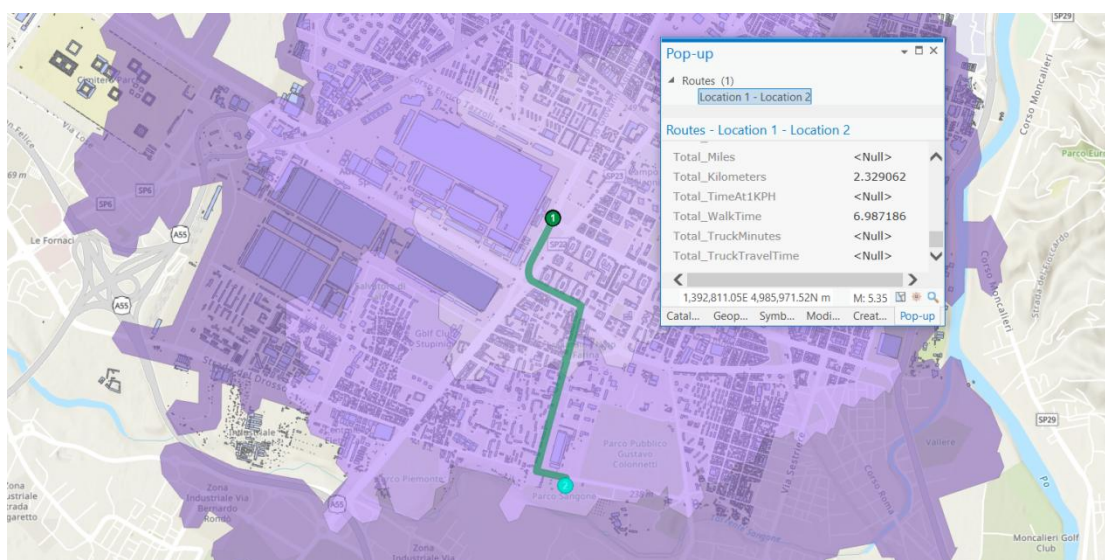


Figura 20 Percorso più breve percorribile in bicicletta fra i resti del castello di Mirafiori e Mirafiori

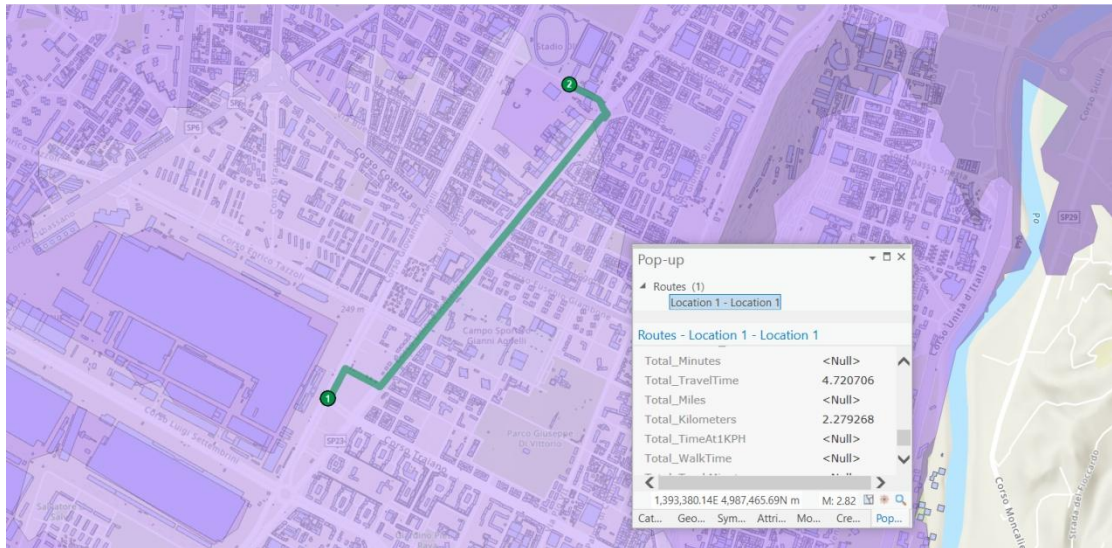


Figura 21 Percorso più breve percorribile in macchina fra il Pala Alpitour e Mirafiori

L'importazione dei dati così ottenuti nel modello BIM è presentata nel paragrafo 3.4.3.

3.4 Creazione del modello BIM

3.4.1 Lettura delle geometrie tramite un'interfaccia di programmazione grafica

In questo paragrafo viene presentato il processo che permette di importare su Revit, il software BIM scelto, le informazioni provenienti da ArcGIS, il software GIS scelto, sperimentando l'interoperabilità fra i due sistemi.

In questo processo è stato fondamentale l'utilizzo di Dynamo, una piattaforma di programmazione visiva open-source per Revit. Dynamo estende le potenzialità di Revit fornendo l'accesso all'API Revit (Application Programming Interface) in un modo più accessibile. Invece che digitando dei codici, con Dynamo è possibile eseguire delle azioni manipolando elementi grafici chiamati 'nodi'. Ogni nodo esegue un'attività specifica. I nodi hanno input e output. Gli output di un nodo sono collegati agli ingressi di un altro tramite 'fili'. Il programma scorre da un nodo all'altro attraverso la rete di fili. Il risultato è una rappresentazione grafica dei passaggi necessari per raggiungere il progetto finale¹⁴³.

Con Dynamo si riesce a velocizzare routine lente e ripetitive da fare in Revit o a svolgere operazioni altrimenti impossibili. In questo caso è stata garantita un'interoperabilità che non esiste con il solo utilizzo di Revit.

Il primo passaggio è l'importazione delle geometrie GIS e la creazione di solidi 3D corrispondenti agli edifici in Revit.

Attraverso Dynamo si riesce a importare lo 'shapefile' GIS e a estrarre i poligoni che rappresentano il contorno degli edifici dell'altezza desiderata. A ogni edificio viene imposta l'altezza ricavata dall'attributo ALTEZZA_VO presente nel file GIS. Infine si associa ai solidi così creati una Categoria a scelta e un Materiale assegnandogli un nome. In questo caso sono state create delle 'Masse' e come materiale è stato scelto 'Default', che corrisponde al materiale predefinito associato alla categoria 'Massa'. Il 'grafico' che programma queste azioni è presentato di seguito.

¹⁴³ <https://archsmarter.com/what-is-dynamo-revit/>

3.4.2 Lettura dei parametri alfanumerici

Una volta che le informazioni relative al volume sono state importate, resta da associare a tali volumi le caratteristiche presenti nel file GIS originario.

Per fare ciò, prima di operare su Dynamo, è necessario preparare il file di progetto Revit affinché possa ricevere le informazioni del file GIS. Questo significa creare su Revit gli attributi, che su BIM sono chiamati 'Parametri', che verranno abbinati alle informazioni degli attributi del GIS.

Per prima cosa si deve scegliere quali attributi importare dal file GIS, poiché alcuni sono poco utili e scartabili.

Quindi attraverso il comando 'Parametri Progetto' si vanno ad aggiungere tanti parametri quanti sono gli attributi dello 'shapefile' che si vogliono importare nel progetto. Sul file Revit è possibile scegliere il nome da dare a questi parametri, e alcuni nomi sono stati cambiati rispetto al file GIS per renderli più comprensibili. Alla fine del processo le coppie di parametri-attributi sono:

- Altezza – ALTEZZA_VO
- Anno – EPOCA_COST
- Destinazione – CATEG_USO
- Nome - NOME
- Numero_piani – NUM_PIANI
- Quota_suolo – QT_SUOLO
- Tipologia_edilizia – TIPO_EDIL
- IDsource – CIT_AR

I parametri devono essere associati alla categoria dei solidi 3D, quindi 'Massa', ed è importante che il tipo di parametro, che in questo caso può essere 'Numero' o 'Testo', corrisponda alla tipologia di attributo in GIS. Se in GIS l'attributo è 'Real', su Revit deve essere 'Numero', se è 'String' deve essere 'Testo'.

Completata questa operazione tornando su Dynamo è possibile, attraverso la creazione di due nodi per ciascun parametro, far corrispondere il contenuto degli attributi GIS ai parametri di ciascun elemento precedentemente modellato. Si deve prestare attenzione ai parametri numerici, che hanno bisogno di un nodo che li converta in testo affinché siano importabili su Revit.

Oltre a questi parametri ne è stato creato ancora uno, che non è importato da GIS, ma appartiene al modello Revit. In Revit a ogni elemento viene automaticamente assegnato un identificatore univoco, detto 'Elementi ID'. Attraverso i codici è possibile riferirsi senza possibilità di errore a un certo elemento appartenente al progetto ed è quindi prezioso per la collaborazione di diversi utenti allo stesso progetto. In questo caso, poiché l'ID degli elementi GIS, contenuto nell'attributo CIT_AR non può corrispondere all'ID automaticamente assegnato da Revit, si è ritenuto utile visualizzare fra i parametri degli elementi anche l'Element ID', in modo da facilitare l'individuazione dello stesso elemento sui due software. L'attributo CIT_AR è importato nel parametro IDsource mentre l'Element ID', attraverso un procedimento simile a quello di conversione dei parametri da GIS a BIM, è estrapolato dall'elemento BIM e visualizzato nella sua tabella dei parametri.

Il 'grafico' totale è rappresentato nella pagina seguente.

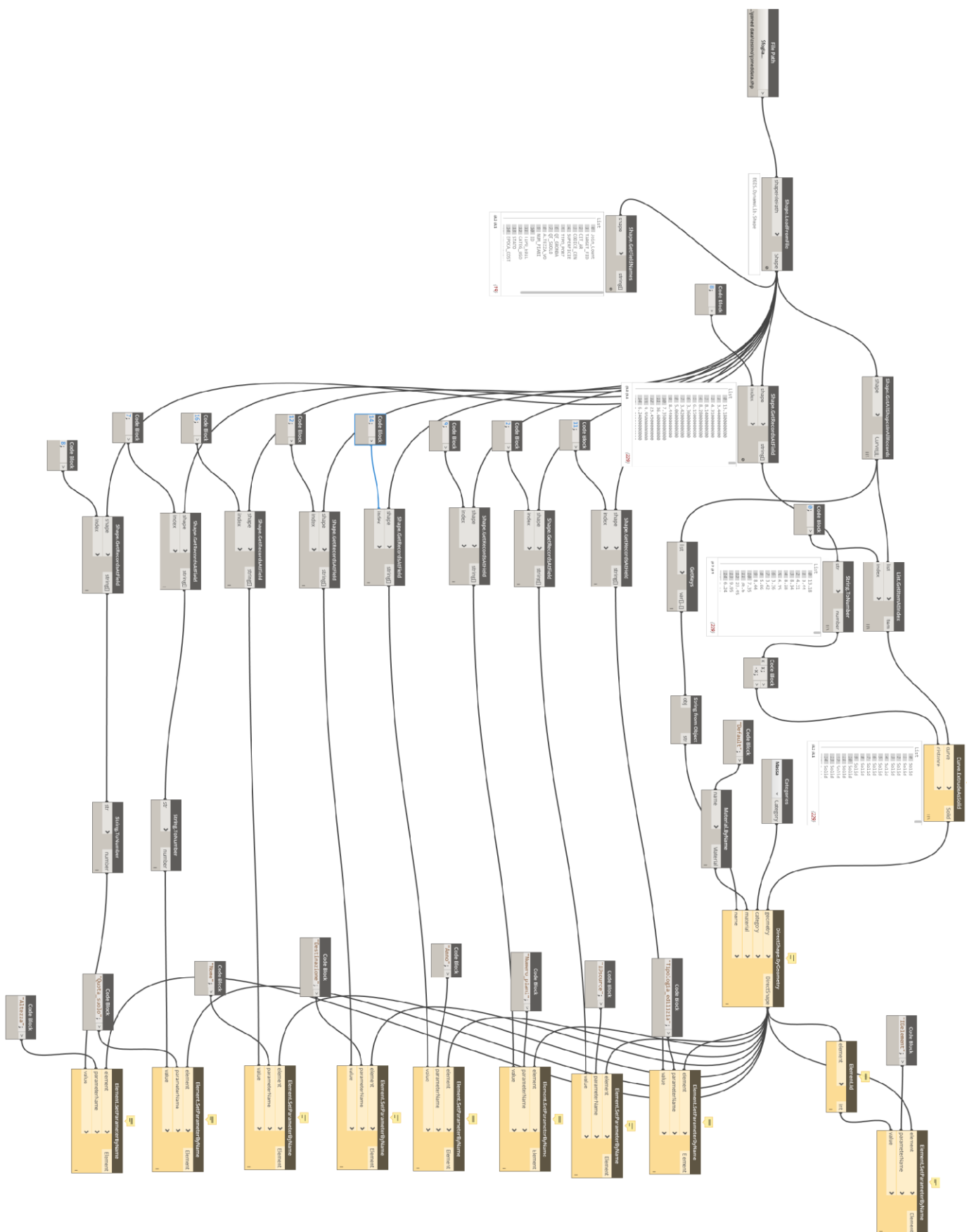


Figura 23 Codice visivo completo per l'importazioni di solidi 3D e l'associazione di parametri da file GIS

3.4.3 Importazione dei dati ottenuti dalle analisi GIS

E' necessario un discorso a parte per l'importazione dei dati generati attraverso gli strumenti di analisi GIS. Per questa operazione sono stati utilizzati due metodi alternativi.

Il primo tratta l'importazione delle classi di distanza generate dalla funzione 'Service Area' di ArcGIS. A titolo esemplificativo è presentato il procedimento per importare le informazioni relative alla distanza percorsa in auto.

L'obiettivo è di ottenere come parametro di ogni edificio il dato relativo alla distanza. Il processo si basa sullo stesso sistema utilizzato per importare lo 'shapefile' relativo agli edifici in Revit. Su ArcGIS l'output dell'analisi 'Service Area' sono dei poligoni che descrivono delle soglie di distanze selezionate dall'utente. Nel caso in questione le soglie sono 4, 8 e 12 minuti di distanza dallo stabilimento Fiat Mirafiori. Affinché queste informazioni siano importabili su BIM come parametri dei solidi, è necessario che esse siano associate allo 'shapefile' GIS che descrive gli edifici. Per fare ciò è stato necessario unire l'output dell'analisi con il file GIS precedentemente ottenuto dall'unione dei layer '020101_UNITA_VOLUMETRICA' e '020102_EDIFICIO', utilizzando lo stesso strumento che si era utilizzato per la loro unione. E' stato dunque usato il comando 'spatial join', utilizzando come base il layer unificato, affinché a ogni contorno degli edifici venisse associato il parametro di appartenenza alla classe di distanza a cui era sovrapposto. A questo punto è stato possibile importare lo 'shapefile' su Revit attraverso il codice grafico di Dynamo descritto in precedenza, che permette di creare i solidi 3D e di associare ad essi gli attributi contenuti su GIS. In Revit è stato creato il parametro 'Minuti in macchina', a cui è associato l'attributo 'ToBreak' presente su GIS che descrive la soglia di distanza alla quale appartiene il contorno dell'edificio. Quest'operazione, essenzialmente uguale a quella usata in precedenza per le geometrie e per gli altri parametri, è stata eseguita con successo.

Sono state riscontrate delle criticità per quanto riguarda il secondo metodo, volto all'importazione dei poligoni delle classi di distanza in quanto geometrie e all'importazione dei risultati dello strumento ArcGIS 'Route'.

Considerando fosse utile poter visualizzare le classi di distanza non soltanto in quanto parametri associati agli edifici, ma, per una comprensione più immediata dell'informazione, anche come aree a livello del terreno, si è tentato di importare i poligoni generati su ArcGIS come forme sul file Revit. Per fare ciò si è utilizzato lo stesso codice utilizzato in precedenza con la differenza che per il valore dell'altezza non viene utilizzato un valore estratto dagli attributi, ma un valore fisso, impostato ad esempio a '-0,5', per la

creazione di una forma solida sotto al livello del terreno. Inoltre, invece che alla categoria 'Massa', in questo caso le aree vengono associate alla categoria 'Pavimenti'.

Seppure il procedimento riesca, raggiungendo la creazione delle aree sul modello BIM con i parametri e le caratteristiche geometriche impostate, viene riscontrata un'anomalia per la quale le aree, una volta importate sul modello BIM, non sono in scala con i solidi creati in precedenza, diventando in sostanza inutili per una visualizzazione grafica delle informazioni. Si è cercato di ovviare a questa criticità attraverso l'utilizzo di AutocadMAP3D, software Autodesk che permette la trasformazione di 'shapefile' in file '.dwg'. Attraverso il comando 'MapImport' è stato possibile compiere questa conversione, il cui risultato in formato '.dwg' è importabile in Revit. Attraverso questo processo di conversione gli attributi presenti nel file GIS originale vengono persi e viene conservata soltanto la geometria. Poiché in questo caso le informazioni contenute erano poche, e già presenti come attributo relativo agli edifici, la comprensione, per cui era rilevante soprattutto l'aspetto geometrico, non è compromessa, ma il metodo non si può considerare valido per quanto riguarda l'interoperabilità.

Sono state riscontrate delle criticità simili affrontando l'importazione dei risultati dell'analisi 'Route' fatta su ArcGIS. In questo caso l'output è una linea, che rappresenta il tragitto più breve fra due punti, contenente come parametri la lunghezza in km e la durata del percorso. Per importare queste informazioni non è stato possibile utilizzare il codice in Dynamo, poiché esso non supporta l'importazione di elementi non poligonali.

E' stato utilizzato nuovamente AutocadMAP3D per convertire lo 'shapefile' in un formato leggibile da Revit. Il processo restituisce una linea che rappresenta la geometria del percorso, ma a cui non sono più associati i parametri di lunghezza e durata. I risultati sono presentati nel capitolo 4.

3.4.4 Creazione di filtri vista per la visualizzazione del modello

Al termine della modellazione, sfruttando i dati inglobati nel modello, è stata fatta un'analisi di tipo grafico.

Per visualizzare il modello Revit selettivamente, opportunità che ci viene agevolmente consentita sui software GIS, è possibile creare dei filtri all'interno della vista selezionata [Fig. 24].

I filtri sono modificazioni della grafica degli elementi, che si attivano in base alla veridicità di regole basate sui parametri degli elementi.

Possono essere impostati per ogni categoria di oggetto e si possono basare su qualsiasi parametro di quella categoria, che sia di tipo testuale o numerico.

La relazione che lega la regola al parametro può essere 'è uguale a', 'è minore di' o 'contiene', ecc.

In base ai filtri il modello Revit può apparire graficamente in modo diverso, con riempimenti solidi o retini, o si può scegliere di non visualizzare elementi che riportano un certo valore in un parametro.

Nel caso studio sono stati creati filtri in base all'anno di costruzione, in base alla destinazione d'uso e alla distanza rispetto all'impianto di Fiat Mirafiori. E' stato creato un filtro per ogni soglia dell'anno di costruzione, ad esempio '1946-1960'. Per le destinazioni d'uso invece, poiché le categorie erano troppo dettagliate, sicché ad esempio alla voce commerciale, ci sono voci quali 'commerciale-mercato', 'commerciale-terziario', 'commerciale-sede di supermercato', ecc. si è deciso di applicare dei filtri sul contenuto di una certa parola all'interno del parametro. Le parole chiave sono state 'amministrativo', 'servizi', 'commerciale', 'sede di attività sportiva', 'industriale', 'residenziale'. In base alla presenza di queste parole all'interno del parametro 'Destinazione' sono quindi stati applicati i filtri.

Questo strumento può essere utile per analisi di tipo urbano, poiché la visualizzazione è immediata e comprensibile. E' vero però, che a differenza dei software GIS in cui il processo è rapido e automatico, per ottenere lo stesso risultato sul software BIM è necessario un processo manuale che può diventare anche piuttosto lungo, secondo la quantità di valori e parametri categorizzati.

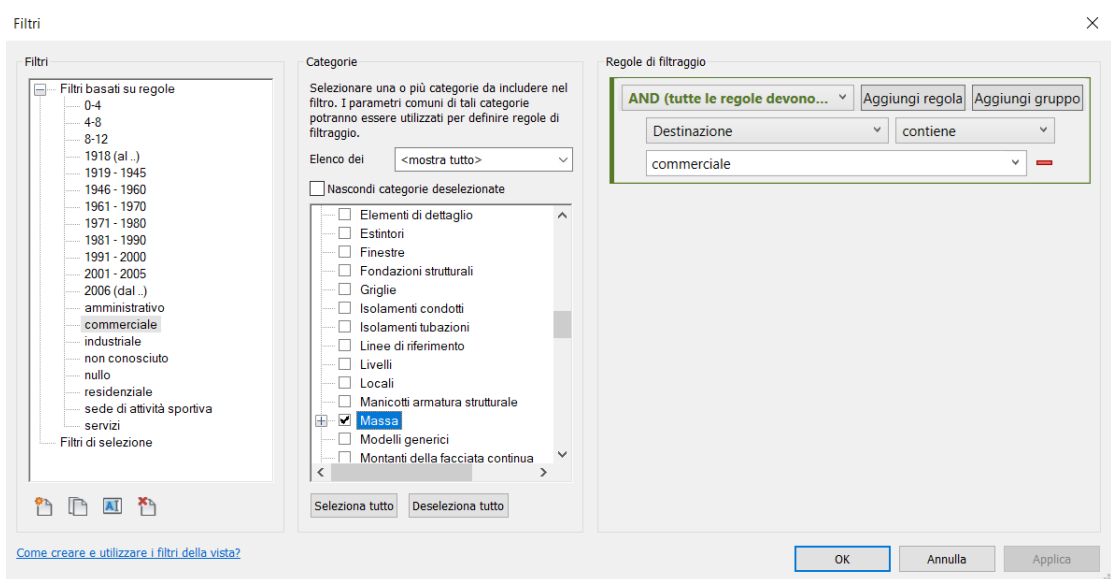


Figura 24 Finestra di creazione dei filtri su Revit

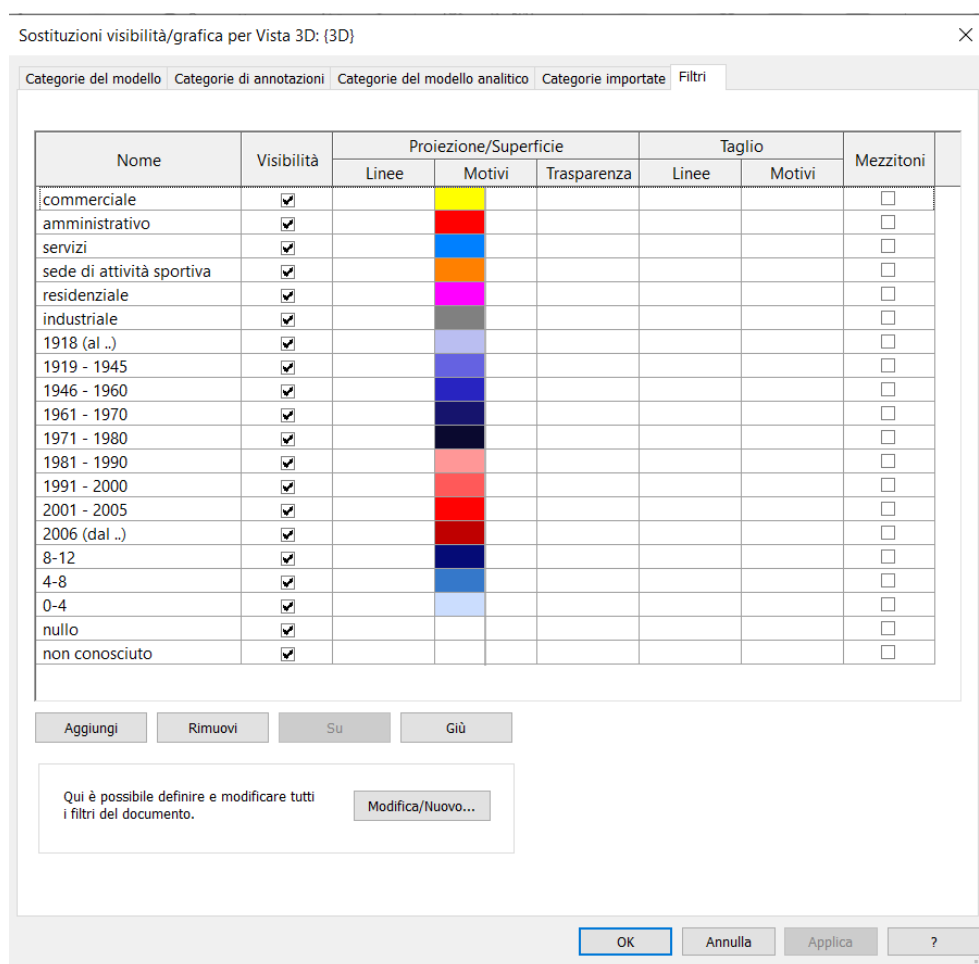


Figura 25 Finestra di applicazione dei filtri

Capitolo 4. Data Visualization

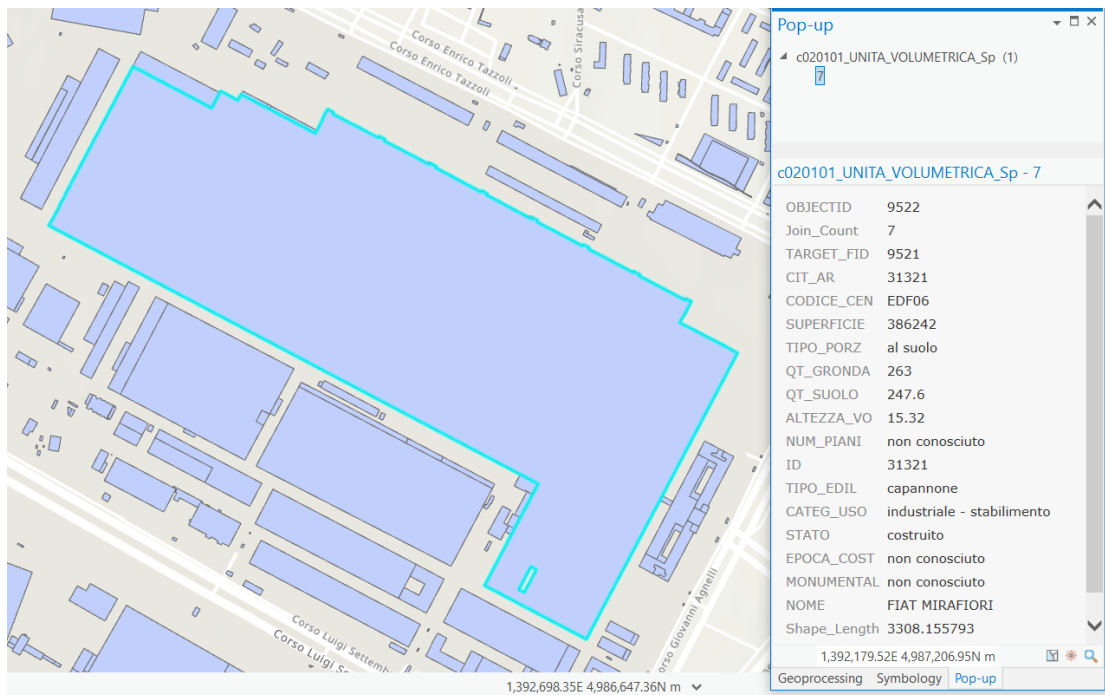


Figura 26 Selezione dell'impianto di Fiat Mirafiori con i relativi parametri su GIS

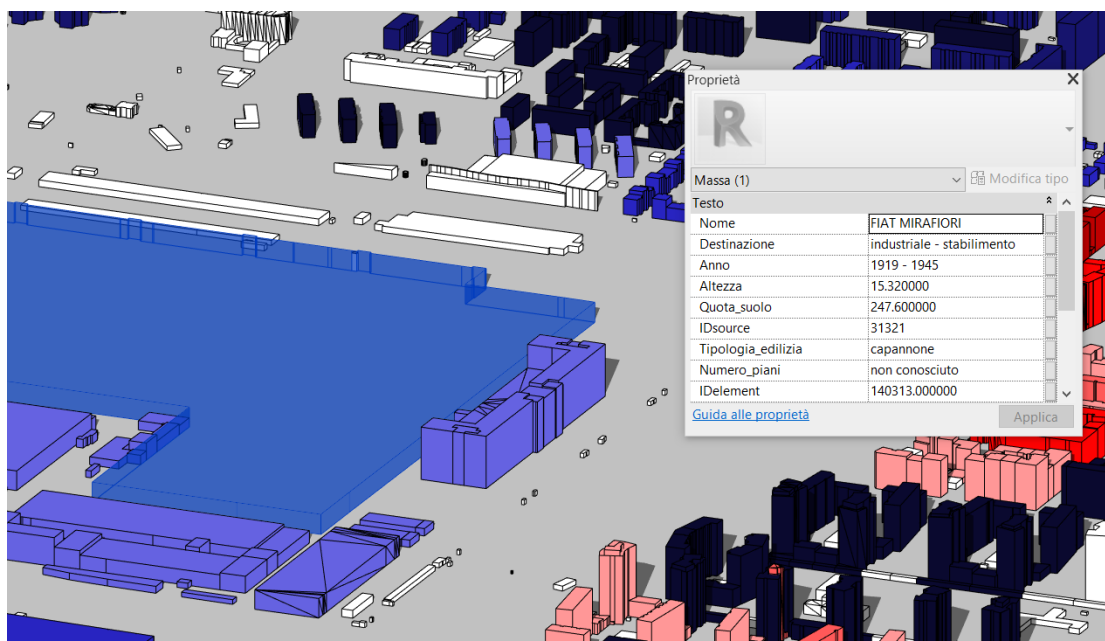


Figura 27 Selezione dell'impianto di Fiat Mirafiori con i relativi parametri su Revit

Si può notare che tutti i parametri che si desiderava avere sul progetto BIM sono stati importati con successo. Si noti il parametro IDsource che corrisponde all'attributo CIT_AR in GIS. Inoltre sul BIM è stato possibile arricchire il modello con informazioni note, ma mancanti sul file GIS originale. Ad esempio si è inserita la data di costruzione dell'impianto di Mirafiori Nord.

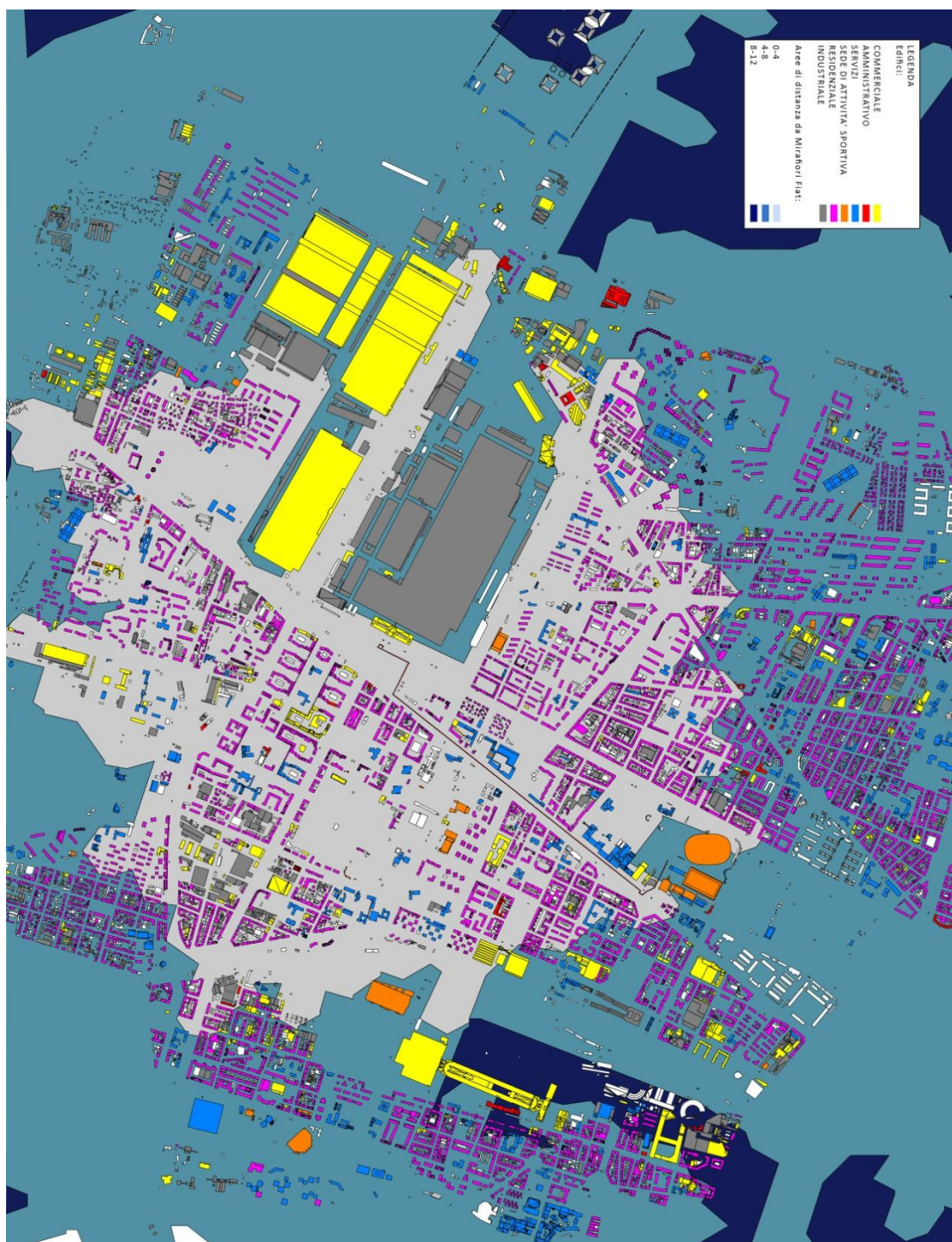


Figura 28 Vista dall'alto dell'area con i poligoni indicativi le distanze in minuti e gli edifici categorizzati in base alla destinazione d'uso. E' visibile il percorso più rapido fra lo stabilimento Fiat e il Pala Alpitour

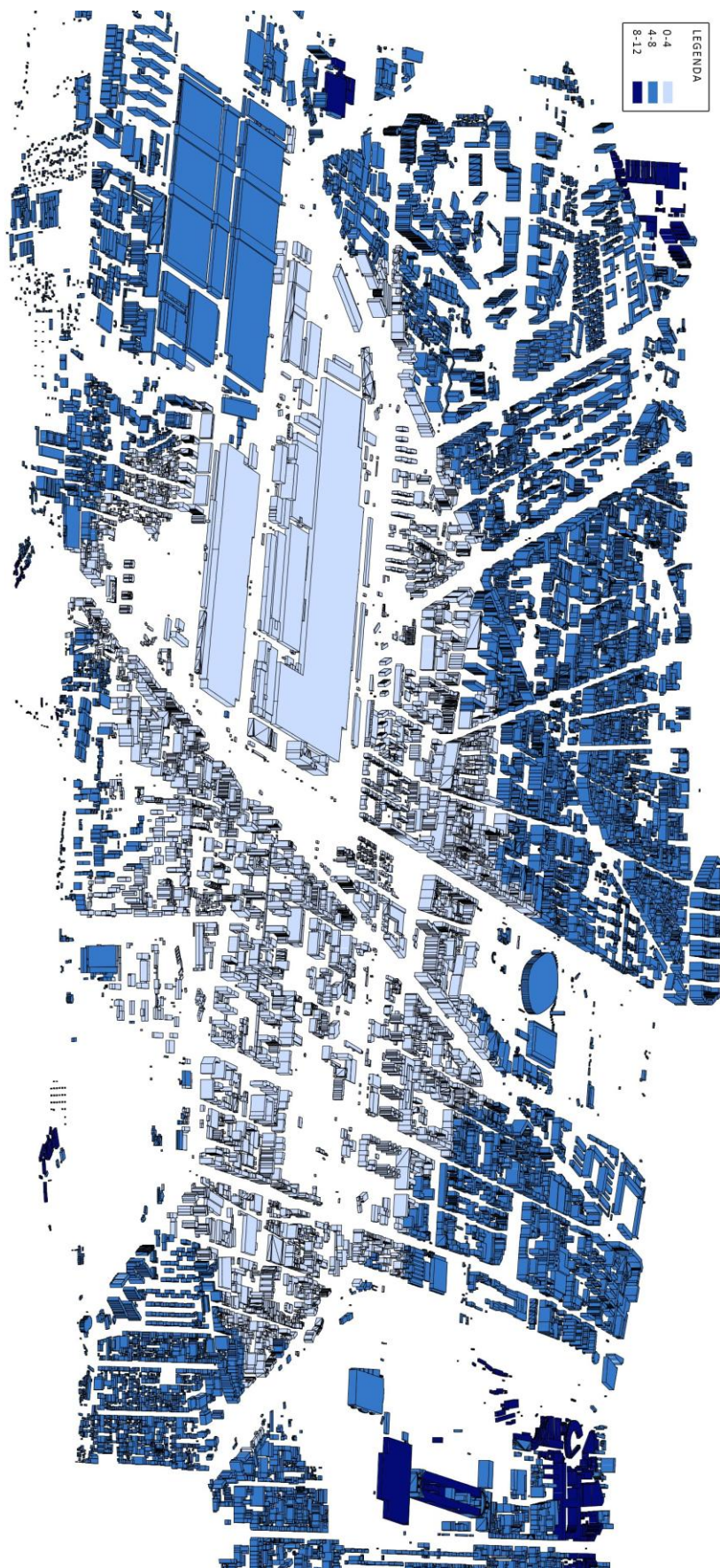


Figura 29 Vista con gli edifici categorizzati in base alle distanze in minuti dallo stabilimento Mirafiori

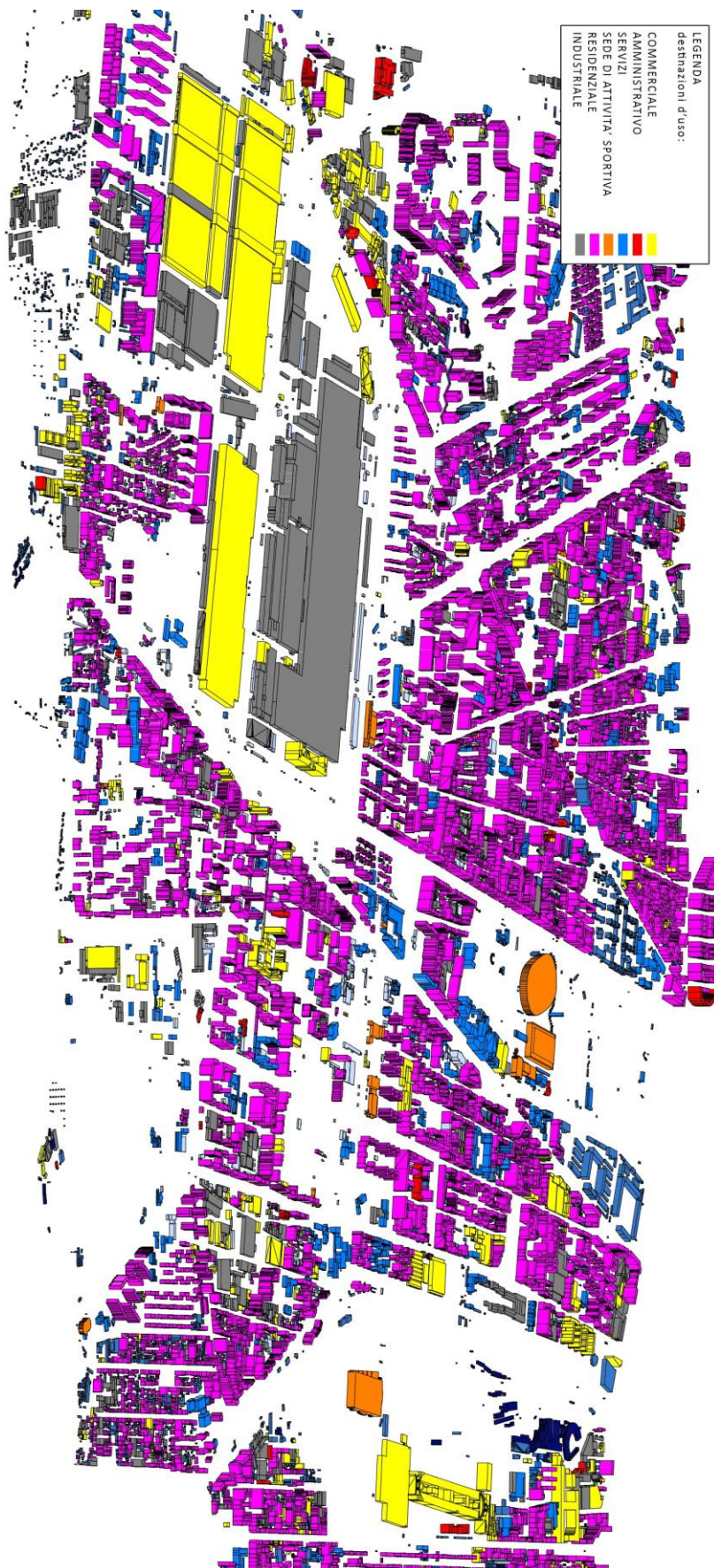


Figura 30 Vista con gli edifici categorizzati in base alla destinazione d'uso

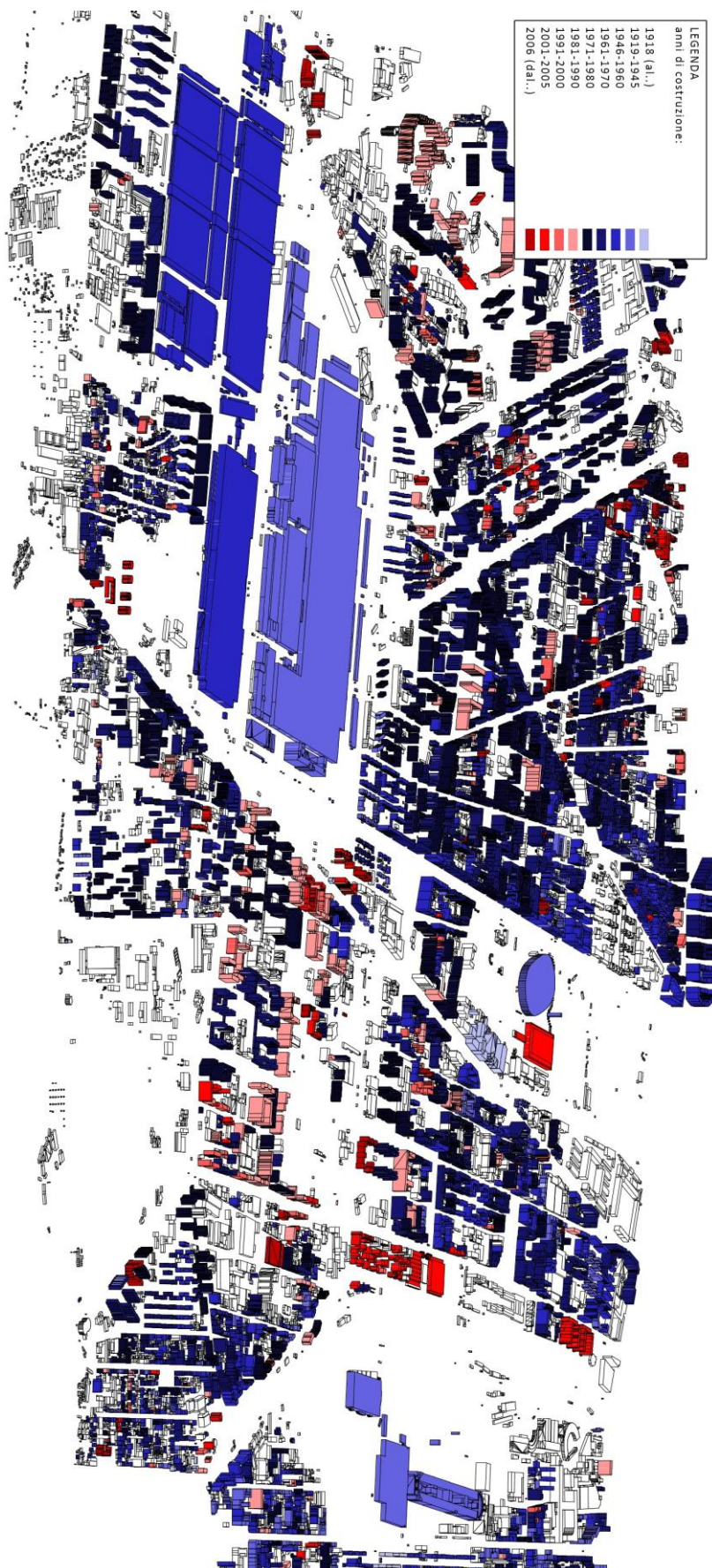


Figura 31 Vista con gli edifici categorizzati in base all'anno di costruzione

Il metodo sperimentato risulta essere un valido strumento per consentire un'interoperabilità GIS-BIM con l'obiettivo di ottenere su BIM le medesime caratteristiche del modello di partenza.

Al momento della trattazione sono presenti pochi esempi d'interoperabilità in ottica BIM, ma può essere un interessante campo di sviluppo¹⁴⁴.

Il BIM offre potenzialità progettuali e di gestione del processo costruttivo uniche in termini di precisione, rapidità e controllo. Seppure il suo campo principale sia quello della progettazione a scala dell'edificio, la collaborazione con GIS può consentire di estendere al campo urbano le possibilità di questo strumento, con vantaggi per tutto il processo costruttivo. Per una progettazione consapevole delle caratteristiche urbane può essere utile avere a disposizione, direttamente sul software di progettazione BIM, informazioni provenienti da altri sistemi, senza doverli andare a consultare o visualizzandoli su una piattaforma 'terza', che permette l'analisi simultanea di diversi sistemi, ma non ne permette la modifica o la creazione. In questo aspetto ritengo che il sistema sperimentato, rispetto all'utilizzo di una piattaforma estranea per l'unione dei dati, sia più coerente alla vocazione progettuale del sistema BIM.

Rispetto ad altri sistemi di 'Extract Transform Load' (ETL), alla cui categoria appartiene il metodo trattato, questo ha il vantaggio di non passare attraverso l'utilizzo di piattaforme estranee, come ad esempio Feature Manipulation Engine (FME), e perciò è più rapido, facile da utilizzare e completo nell'esportazione di dati. Un aspetto fondamentale di Dynamo, piattaforma di programmazione integrata e pensata per Revit, consiste nella sua praticità e nell'aspetto 'user friendly', che lo rende comprensibile anche per un utente inesperto, sia di Dynamo che di programmazione in generale. Inoltre come già detto Dynamo è disponibile direttamente in Revit, il che permette di evitare l'installazione di altri software.

In quanto a velocità il metodo presenta buone caratteristiche. Il codice è relativamente veloce da impostare; la parte che richiede un maggiore intervento manuale è quella di preparazione del file Revit, con la scrittura dei parametri e il loro abbinamento agli attributi GIS su Dynamo. A parte ciò l'esecuzione è rapida e permette di automatizzare una serie di operazioni altrimenti non praticabili.

In sostanza il metodo sviluppato presenta dei buoni risultati.

¹⁴⁴ Wang H., Pan Y., Luo X., op.cit.

L'accuratezza dei dati importati relativi agli edifici è massima, poiché ogni informazione presente in GIS viene riportata esattamente, senza alcuna perdita e anzi con una selezione rapida dei dati ritenuti più significativi.

Il metodo presenta delle criticità per quanto riguarda la parte di analisi.

Innanzitutto deve essere notato che lo strumento BIM non permette analisi di tipo urbano, per le quali si è fatto affidamento ai validi strumenti di ArcGIS, uno dei più popolari software GIS in commercio.

Come visto ArcGIS offre la possibilità di svolgere interessanti analisi riguardanti la mobilità. E' possibile analizzare la distanza di un punto a scelta dal resto della città, scegliendo il mezzo di trasporto e addirittura la data e l'ora del tragitto. Il software restituisce delle fasce divise per soglie di minuti impostate dall'utente. Inoltre è possibile visualizzare il percorso più breve fra due punti, sempre con la possibilità di impostare il mezzo e il giorno.

Le possibilità di utilizzo di questo strumento sono numerose e il software permette di svolgerle rapidamente. La controparte BIM non riesce a garantire le stesse proprietà. Innanzitutto il processo d'importazione dei dati, che è lo stesso utilizzato per importare gli edifici, seppur rapido, non è paragonabile alla velocità permessa dall'utilizzo del software GIS. Inoltre si sono riscontrate delle criticità nell'importazione dei dati.

Si è riusciti a importare i dati relativi alle distanze associando i poligoni delle classi di distanza agli edifici del modello, attraverso l'utilizzo dell'unione spaziale permessa da ArcGIS. In questo modo si può conoscere la distanza rispetto a Mirafiori di ciascun edificio, a cui questo dato viene assegnato come parametro. Quindi è possibile applicare un filtro vista basato sul parametro, come fatto anche per altri parametri, per ottenere una visualizzazione immediata.

Poteva essere utile importare i poligoni che su GIS descrivono le classi di distanza, in modo da visualizzare contemporaneamente un filtro vista espresso dagli edifici, ad esempio le classi di destinazione d'uso, e la distanza rappresentata dai poligoni a livello del piano terra. Ciò non è stato possibile attraverso l'utilizzo del precedente codice visivo, poiché i poligoni, trasformati nella categoria 'pavimenti', presentavano delle anomalie rispetto alla scala e non risultavano più utilizzabili. Si è in qualche modo riusciti a importare il profilo dei poligoni attraverso una trasformazione operata con il software AutocadMAP3D, che permette di trasformare gli 'shapefile' in file '.dwg', formato tipico dei software CAD e leggibile da Revit. Una volta ottenuto il file '.dwg' è stato possibile importarlo sul file Revit, ma il processo ha comportato la perdita degli attributi GIS. Poiché i dati erano pochi, relativi

soltanto alla divisione in tre classi rispetto alla distanza, la comprensione non è stata compromessa , ma il metodo non si può considerare valido per quanto riguarda l'interoperabilità.

Un problema simile è stato riscontrato anche con l'importazione dei 'percorsi più brevi' calcolati su GIS. Poiché lo 'shapefile' dei percorsi non è un poligono, non è stato possibile importarlo con il codice scritto in Dynamo. Per importarne la geometria è stato utilizzato nuovamente AutocadMAP3D. Attraverso la conversione attuata vanno persi gli attributi relativi a lunghezza del percorso e durata e viene conservata soltanto la geometria.

Infine per ottenere su Revit una visualizzazione selettiva, per una comprensione immediata di alcuni parametri degli edifici, sono stati creati dei filtri vista. Attraverso questo strumento si è riusciti a categorizzare il modello secondo l'anno di costruzione, la destinazione d'uso e la distanza da Mirafiori.

Con i filtri visivi si è riusciti a replicare con successo lo strumento di categorizzazione secondo i parametri, tipico del GIS, ottenendo degli utili scenari per la visualizzazione differenziata del costruito. Rispetto allo strumento GIS la controparte BIM costringe a un metodo più lungo, in cui si deve inserire manualmente ogni valore dei parametri secondo cui applicare il filtro, operazione che può diventare impraticabile se questi sono in numero elevato.

In conclusione il metodo basato sull'utilizzo di Dynamo per l'interoperabilità GIS-BIM è semplice e piuttosto rapido e funziona perfettamente per l'importazione di poligoni quali gli edifici. Sono state riscontrate delle criticità per quanto riguarda l'esecuzione di analisi e la visualizzazione finale del modello, poiché, seppure replicate in Revit, comportano una perdita di rapidità che ne limita l'applicazione, e in alcuni casi ci sono perdite di dati.

Il modello finale ottenuto è un modello BIM che integra realmente alcune caratteristiche tratte dal GIS e attraverso la loro presenza può esaltare le capacità di progettazione e gestione del progetto del BIM.

Conclusioni e sviluppi futuri

Con la presente trattazione si è presentato un tentativo di utilizzare l'interoperabilità GIS-BIM per la realizzazione di un 'digital twin' del caso studio.

Il metodo applicato si basa sulla conversione di dati GIS in dati BIM. Lo strumento essenziale è stato Dynamo, una piattaforma di programmazione visiva.

Il processo utilizzato si inserisce nella categoria d'interoperabilità in cui è il BIM a dominare sul GIS. Il BIM è un potente metodo di progettazione e questo tipo d'interoperabilità permette di aumentarne le capacità progettuali, fornendo un contesto modellato, ricco di informazioni e analizzato.

Attraverso il processo sono state analizzate le criticità dell'interoperabilità GIS-BIM e individuate le sfide future. Sebbene a oggi non esista una soluzione ottimale per far comunicare questi due sistemi, le necessità e soprattutto le opportunità di un utilizzo congiunto sono riconosciute e in merito si stanno facendo ricerche e sperimentazioni.

Un campo in cui questa dinamica può essere decisiva è la 'smart city', che necessita che i due 'workflow' comunichino in maniera fluida per una gestione a 360°.

La tecnologia si sta sviluppando in modo da risolvere i problemi d'interoperabilità fra i due sistemi, con sforzi di entrambi gli attori in causa.

Questo campo di ricerca è estremamente interessante, ricco di nuove opportunità e sviluppi; merita un ulteriore approfondimento con la sperimentazione anche degli altri possibili metodi di interoperabilità: BIM-GIS e rapporto equo fra i due sistemi.

Il risultato ottenuto nel caso studio è un modello tridimensionale degli edifici dell'area, arricchito di vari attributi quali nome, destinazione d'uso, anno di costruzione, ecc. visualizzabili come parametri nelle proprietà dei solidi creati. Attraverso questi parametri, più specificatamente attraverso l'anno di costruzione, la destinazione d'uso e la distanza rispetto a Fiat Mirafiori, è possibile fare un'analisi visiva dell'area urbana rispetto a questi aspetti caratterizzanti.

Il gemello digitale è tanto più utile quanto è più ricco di dati. Il presente modello è una base che può essere arricchita da varie altre informazioni, siano esse geometriche o descrittive. In particolare gli sviluppi futuri dovranno portare all'utilizzo dell'IoT e di dati in tempo reale, elementi chiave per la realizzazione di un vero 'Digital Twin' che, con l'apporto di intelligenza artificiale e 'machine learning', potrà essere uno strumento fondamentale per la gestione intelligente della città moderna.

La sfida non è soltanto tecnologica, ma da sempre anche culturale. Con l' aumento senza sosta dei dati disponibili su oggetti e persone, un dibattito si apre sulla sicurezza di questi dati e sul loro corretto utilizzo. La soluzione consiste nella fruizione dei dati necessari, con un utilizzo critico e umano. Come afferma Yuval Harari in *Homo Deus: A Brief History of Tomorrow*: "In passato, avere potere significava avere accesso ai dati. Oggi avere potere significa sapere cosa ignorare"¹⁴⁵.

¹⁴⁵ Harari YN, *Homo Deus: A History of Tomorrow*, Harvill Secker, 2016.

Bibliografia

Allam Z., Newman P., Redefining the Smart City: Culture, Metabolism and Governance, Smart Cities 1(1), 2018

Barbato D., De Marchi M., Pristeri G., GIS-BIM Interoperability for Regeneration of Transurban Areas, 2018

Batty M., Digital twins. Environ Plan B Urban Anal City Sci, 45(5), 2018

Fuller A., Fana Z., Daya C., Barlowb C., Digital Twin: Enabling Technology, Challenges and Open Research, Preprint

Goodchild Michael F., Geographic information systems and science: today and tomorrow, Procedia Earth and Planetary Science, 1(1), 2009

Grieves M., Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. White paper. Melbourne, FL: Florida Institute of Technology, 2014

Grieves M., Vickers J., Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems, BT - Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches, 2016

Harrison C., Eckman B., Hamilton R., Hartswick P., Kalagnanam J., Paraszczak J., Foundations for smarter cities, IBM Journal of Research and Development, 54, 2010

Johnson S., The Ghost Map: a street, an epidemic and the two men who battled to save Victorian London, London: Allen Lane, 2006

Liu X., Wang X., Wright G., Cheng J.C.P., Li X., A State-of-the-Art Review on the Integration of Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information System (GIS), ISPRS Int. J. Geo-Inf., 6(2), 2017

Ma Z., Ren Y., Integrated Application of BIM and GIS: An Overview, Procedia Engineering, 196, 2017

Neuman M., The compact city fallacy, *J. Plan. Educ. Res.*, 25 (1), 2005

Piasecki R., DRAFT: Materials, Structures, Mechanical Systems, and Manufacturing Road Map, Technology Area 12, NASA Office of Chief Technologist, 2010

Qi Q., Tao F., Zuo Y., Zhao D., Digital Twin Service towards Smart Manufacturing, *Procedia CIRP*, 72, 2018

Qiu C., Zhou S., Liu Z., Gao Q., & Tan J., Digital assembly technology based on augmented reality and digital twins: a review. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 1(6), 2019

Schleich B., Anwer N., Mathieu L., Wartzack S., Shaping the digital twin for design and production engineering, *CIRP Ann*, 66 (1), 2017

Shaflo M., Conroy M., Doyle R., Glaessgen E., Kemp C., LeMoigne J., Wang L., DRAFT: Modeling, Simulation, Information technology & Processing Road Map, Technology Area 11, NASA technology road map, 2010

Sun M., Zhang J., Research on the application of block chain big data platform in the construction of new smart city for low carbon emission and green environment, *Computer Communications*, 149, 2020

Tao F., Qi Q., Wang L., Nee A., Digital twins and cyber–physical systems towards smart manufacturing and industry 4.0: correlation and comparison, *Engineering* 5(4), 2019

Tao F., Sui F., Liu A., Qi Q., Zhang M., Song B., Guo Z., Lu SC-Y, Nee A.Y.C., Digital twin-driven product design framework., *Int J Prod Res.*, 2018

Tao F., Zhang M., Liu Y., Nee A.Y.C., Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment, *CIRP Ann*, 67 (1), 2018

Tao F., Zhang M., Nee A.Y.C., Digital Twin Driven Smart Manufacturing, Academic Press, 2019

Uhlemann T., Lehmann C., Steinhilper R., The digital twin: realizing the cyber-physical production system for industry 4.0. Procedia CIRP 61, 2017

Wang H., Pan Y., Luo X., Integration of BIM and GIS in sustainable built environment: A review and bibliometric analysis, Automation in Construction, 103, , pp. 41-52, 2019

Zhang H., Liu Q., Chen X., Zhang D., Leng J., A Digital Twin-Based Approach for Designing and Multi-Objective Optimization of Hollow Glass Production Line, IEEE Access, 5, 2017

Sitografia

<https://www.linkedin.com/pulse/3-ways-digital-twins-going-help-improve-oil-gas-sophie-menard>

<https://www.dr-hempel-network.com/digital-health-technology/digital-twins-in-healthcare/>

<https://constructionblog.autodesk.com/2020-construction-trends/>

<https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/digital-twin-towards-a-meaningful-framework>

<https://constructionblog.autodesk.com/2020-construction-trends/>

<https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>

<https://www.un.org/en/development/desa/news/population/world-urbanization-prospects-2014.html>

<https://www.cdbb.cam.ac.uk/national-digital-twin-programme>

<https://www.cdbb.cam.ac.uk/DFTG/GeminiPrinciples>

https://www.abiresearch.com/market-research/product/1033835-digital-twins-smart-cities-and-urbanmodel/?utm_source=media&utm_medium=email

<https://www.smartcitiesworld.net/news/news/cambridge-digital-twin-to-tackle-congestion-and-air-quality-3917>

<https://www.pbctoday.co.uk/news/bim-news/cambridge-digital-twin/52581/>

<http://www.kiradigi.fi/en/experiments/ongoing-projects/kalasatama-digital-twins.html>

<https://www.hel.fi/static/liitteet->

[2019/Kaupunginkanslia/Helsinki3D_Kalasatama_Digital_Twins.pdf](#)

<https://kartta.hel.fi/3d/#/>

<https://cityplanneronline.com/helsinki/fiksukalasatama>
<http://www.eurocities.eu/eurocities/documents/Digital-3D-modelling-of-Rennes-Metropole-WSPO-A8JDUM>
<http://3d.rennes2030.fr/Rennes2030/>
<https://eu-smartcities.eu/news/rotterdams-digital-twin-redefines-our-physical-digital-social-worlds>
<https://en.idate.org/product/digital-twin-cities/>
<https://www.3drotterdam.nl/#/>
<https://www.esri.com/about/newsroom/blog/3d-gis-boston-digital-twin/>
<https://www.techwire.net/news/automation-data-among-focuses-for-digital-cities-winners.html>
https://www.youtube.com/watch?v=Gd_kB5TxEb8&feature=youtu.be
<https://www.governing.com/blogs/bfc/col-digital-twin-maps-guide-changing-city.html>
<https://www.connectedremag.com/das-in-building-wireless/siemens-showcases-test-bed-for-digital-twins-smart-city-infrastructure/>
<https://www.meed.com/dubai-expo-2020-digital-twin/>
https://www.huffingtonpost.in/2018/11/04/how-jaipur-is-building-a3d-virtual-twin-city-for-better-planning-and-governance_a_23577773/
<https://accommodationtimes.com/3d-city-jaipur-project/>
<https://www.3ds.com/customer-stories/single/virtual-singapore/>
<https://www.nrf.gov.sg/programmes/virtual-singapore>
<https://www.huawei.com/en/press-events/news/2019/11/Huawei-Customers-Win-Awards-SCEWC>
<https://newcities.org/the-big-picture-digital-twins-for-greenfield-smart-cities/>
<https://www.sidewalktoronto.ca/innovations/digital-innovation>
<https://www.ft.com/content/9cd15bcc-fbff-11e9-a354-36acbbb0d9b6>
<https://www.esri.com/en-us/what-is-gis/history-of-gis>
https://en.wikipedia.org/wiki/Geographic_information_system#History_of_development
https://en.wikipedia.org/wiki/OpenStreetMap#Software_for_editing_maps
<http://lidecc.cs.uns.edu.ar/~nbb/ccm/downloads/Literatura/OVERVIEW%20AND%20DEFINITION%20OF%20GIS.pdf>
https://books.google.it/books/about/GIS_and_Geostatistical_Techniques_for_Gr.html?id=d5WaDwAAQBAJ&printsec=frontcover&source=kp_read_button&redir_esc=y#v=onepage&q&f=true

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_geographic_information_systems_software#GIS_as_a_service

<https://gisgeography.com/free-gis-software/>

<https://gisgeography.com/commercial-gis-software/>

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_geographic_information_systems_software#GIS_as_a_service

<https://www.archdaily.com/302490/a-brief-history-of-bim>

http://news.bbc.co.uk/2/hi/business/2522537.stm?utm_medium=website&utm_source=archdaily.com

<https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/pdfs/autodesk-bring-together-bim-gis-ebook.pdf>

<http://www.museotorino.it/view/s/5431e6fb4be949bfb79fc973c6576165>

https://en.wikipedia.org/wiki/Fiat_Mirafiori

<https://www.panorama.it/news/economia/lo-stabilimento-fiat-mirafiori-compie-80-anni-storia-foto>

<http://www.torinotoday.it/economia/produzione-auto-2019-fiat-mirafiori.html>

<http://geoportale.comune.torino.it/geocatalogocoto/?sezione=catalogo>

https://www.google.com/search?q=openstreetmap&rlz=1C1EJFA_enIT773IT778&oq=o&aqs=chrome.1.69i59l2j69i61j69i60j69i61j69i65l3.1999j1j1&sourceid=chrome&ie=UTF-8

http://www.lartu.polito.it/dove_siamo

<https://archsmarter.com/what-is-dynamo-revit/>

Desidero ringraziare la Prof.ssa Anna Osella e la Dott.ssa Daniela De Luca per la costante disponibilità e per il prezioso aiuto prestatomi durante lo svolgimento e la stesura di questa tesi.

Un caro pensiero alla mia famiglia e ai miei amici, per avermi accompagnato in questo percorso universitario.