

CANDIDATO **NICOLA ORLACCHIO**

XXXVII CICLO
DATA 17/06/2025

TUTOR **PROF. LIVIO SACCHI**

COTUTOR **PROF. MAURIZIO UNALI**

TESI DI DOTTORATO

Integrazione di dati e tecnologie per lo sviluppo del digital twin urbano.

Un approccio sistematico per le smart cities.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI "G.D'ANNUNZIO" CHIETI PESCARA
DOTTORATO CULTURE DEL PROGETTO: CREATIVITÀ, PATRIMONIO, AMBIENTE

*“Il nostro futuro sarà un mondo ibrido in cui si verrà a creare un nuovo
equilibrio tra il fisico e il digitale.”*

Carlo Ratti

Università degli Studi “G. d’Annunzio” Chieti – Pescara

University of Study “G. d’Annunzio” Chieti – Pescara

Scuola Superiore G. d’Annunzio

School of Advanced Studies G. d’Annunzio

Dottorato di Ricerca in Culture del Progetto: Creatività, Patrimonio, Ambiente

PhD Course in Design Cultures: Creativity, Heritage, Environment

Coordinatore Anno Accademico 2021-2024

Coordinator Accademic Year 2021-2024

Prof. Claudio Varagnoli

Coordinatore Anno Accademico 2024-2027

Coordinator Accademic Year 2024-2027

Prof. Maurizio Unali

Collegio dei Docenti

Teaching staff Proff.

Massimo Angrilli

Federico Bilò

Sebastiano Carbonara

Stefano D’Avino

Giuseppe Di Bucchianico

Valter Fabietti

Filomena Adele Fiadino

Raffaele Giannantonio

Michele Lepore

Antonio Marano

Lorenzo Pignatti

Donatella Radogna

Livio Sacchi

Lucia Serafini

Maurizio Unali

Claudio Varagnoli

CANDIDATO **NICOLA ORLACCHIO**

XXXVII CICLO
DATA 17/06/2025

TUTOR **PROF. LIVIO SACCHI**

COTUTOR **PROF. MAURIZIO UNALI**

TESI DI DOTTORATO

Integrazione di dati e tecnologie per lo sviluppo del digital twin urbano.

Un approccio sistematico per le smart cities.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI "G.D'ANNUNZIO" CHIETI PESCARA
DOTTORATO CULTURE DEL PROGETTO: CREATIVITÀ, PATRIMONIO, AMBIENTE

SOMMARIO

CONTESTO TEORICO E OBIETTIVI DELLA RICERCA. EVOLUZIONE DEL CONCETTO DI DIGITAL TWIN E SUA RILEVANZA NEL CONTESTO URBANO E INFRASTRUTTURALE.

1 | PARTE PRIMA: TECNOLOGIE ABILITANTI PER I DIGITAL TWIN URBANI

19 1.1 INDUSTRIA 4.0: VERSO L'INTEGRAZIONE TRA FISICO E DIGITALE

ANALISI DEL PARADIGMA DELL'INDUSTRIA 4.0 E DELLE SUE APPLICAZIONI NEL CONTESTO URBANO E INFRASTRUTTURALE

24 1.2 BIM E IOT: STRUMENTI PER LA MODELLAZIONE E IL MONITORAGGIO INTELLIGENTE

DESCRIZIONE DEL RUOLO DI BIM E IOT NELLA CREAZIONE DI MODELLI DINAMICI E INTEROPERABILI

39 1.3 BIG DATA: GESTIONE E ANALISI DEI FLUSSI INFORMATIVI

APPROFONDIMENTO SUL VALORE DEI BIG DATA PER LA SIMULAZIONE, L'OTTIMIZZAZIONE E LA PREVISIONE NEL DIGITAL TWIN

43 1.4 INTELLIGENZA ARTIFICIALE: APPRENDIMENTO AUTOMATICO E CAPACITÀ PREDITTIVA NEI SISTEMI URBANI

FUNZIONE DELL'AI NEL POTENZIARE I DIGITAL TWIN ATTRAVERSO SIMULAZIONI E DECISIONI BASATE SUI DATI

47	1.5 CYBERSECURITY E BLOCKCHAIN: PROTEZIONE E TRACCIABILITÀ DEI DATI NEI DIGITAL TWIN ESAME DELLE TECNOLOGIE A SUPPORTO DELLA SICUREZZA, TRASPARENZA E AFFIDABILITÀ DEI SISTEMI DIGITALI COMPLESSI
----	--

2 | PARTE SECONDA: DIGITAL TWIN

57	2.1 ORIGINE E DEFINIZIONI: EVOLUZIONE DEL CONCETTO DI GEMELLO DIGITALE ANALISI STORICA E TEORICA DEL CONCETTO DI DIGITAL TWIN, DAI PRIMI SVILUPPI INDUSTRIALI ALL'AMBITO URBANO
61	2.2 STATO DELL'ARTE RASSEGNA CRITICA DELLE APPLICAZIONI ATTUALI E DELLE PRINCIPALI RICERCHE NEL CAMPO DEI DIGITAL TWIN URBANI.

3 | PARTE TERZA: APPROCCIO METODOLOGICO ALLA VALUTAZIONE DEI DIGITAL TWIN URBANI

71	3.1 METRICHE E INDICATORI PER LA VALUTAZIONE DEI DIGITAL TWIN URBANI DEFINIZIONE DEI CRITERI OGGETTIVI PER LA VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA, SOSTENIBILITÀ E INTEROPERABILITÀ DEI MODELLI DIGITALI
----	---

4 | PARTE QUARTA: CASI STUDIO

86	4.1 AMSTERDAM – QUARTIERE ZUIDOOST: PARTECIPAZIONE E PIANIFICAZIONE DIGITALE
----	---

92	4.2 CAMBRIDGE: INNOVAZIONE E GESTIONE ACCADEMICA DELLA CITTÀ
96	4.3 DUBLINO – AREA DOCKLANDS: INFRASTRUTTURE INTELLIGENTI E DATI GEOSPAZIALI
101	4.4 MONACO DI BAVIERA: EFFICIENZA ENERGETICA E MODELLAZIONE PREDITTIVA
116	4.5 TAMPERE – QUARTIERE HERVANTA: SPERIMENTAZIONE URBANA SU SCALA INTERMEDIA
119	4.6 HELSINKI – QUARTIERE KALASATAMA: SMART DISTRICT E SERVIZI INTEGRATI
127	4.7 ROTTERDAM: RESILIENZA URBANA E INFRASTRUTTURE DIGITALI COMPLESSE
135	4.8 SINGAPORE: DIGITAL TWIN NAZIONALE E GOVERNANCE AVANZATA
150	4.9 STOCCARDA – HERRENBERG: MONITORAGGIO IN TEMPO REALE E MOBILITÀ SOSTENIBILE
158	5.0 ZURIGO: OTTIMIZZAZIONE DELLA RETE URBANA ATTRAVERSO I DATI

5 | PARTE QUINTA: CASO STUDIO: TIRANA

167	5.1 IL CASO STUDIO DI TIRANA: DIGITAL TWIN E MOBILITÀ URBANA PROGETTO APPLICATIVO, VOLTO ALLO STUDIO DELLE CRITICITÀ DEL TRAFFICO URBANO E ALLA PROGETTAZIONE DI UN DIGITAL TWIN PER LA GESTIONE INTELLIGENTE DELLA MOBILITÀ.
-----	---

207	CONCLUSIONI
-----	--------------------

221	BIBLIOGRAFIA
-----	---------------------

245	GLOSSARIO
-----	------------------

INTRODUZIONE

Contesto teorico e obiettivi della ricerca

Evoluzione del concetto di digital twin

e sua rilevanza nel contesto urbano e infrastrutturale

Il concetto di *digital twin* (gemello digitale) rappresenta una delle innovazioni tecnologiche più promettenti nel panorama globale, in grado di rivoluzionare il modo in cui affrontiamo la gestione, l'analisi e la simulazione di sistemi complessi. Un *digital twin* può essere definito come un modello digitale dinamico e autoevolutivo di un sistema fisico o un processo reale, che ne riflette accuratamente lo stato in tempo reale grazie a uno scambio bidirezionale di dati. Come sottolineato da Singh M. et al.¹ nell'articolo *digital twin*: dall'origine al futuro.

“Un gemello digitale è un modello digitale/virtuale dinamico e autoevolutivo o una simulazione di un soggetto o oggetto della vita reale (parte, macchina, processo, essere umano, ecc.) che rappresenta lo stato esatto del suo gemello fisico in un dato punto di tempo, scambiando i dati in tempo reale e mantenendo i dati storici.”

Questo concetto, inizialmente sviluppato per il settore aerospaziale, si è rapidamente espanso verso molteplici ambiti applicativi, tra cui il manifatturiero, l'automotive e, più recentemente, il settore delle costruzioni, l'architettura, l'urbanistica e la gestione delle città. L'adozione di *digital twin* nell'ambito urbano ha il potenziale di trasformare il modo in cui progettiamo e gestiamo le nostre città, rendendole più intelligenti, sostenibili e resilienti.

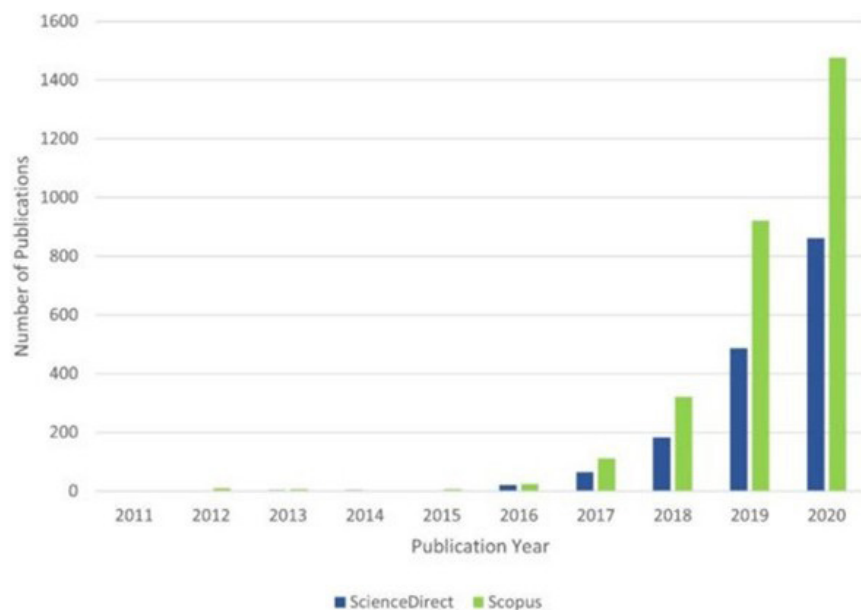
La crescita esponenziale dell'interesse per i *digital twin* è evidente dall'aumento delle pubblicazioni scientifiche sull'argomento. Un'analisi di database come Scopus e science direct rivela una crescita significativa delle ricerche a partire dal 2016, con una vera e propria esplosione di studi nell'ultimo decennio, come si evince dal grafico in figura 1. Questo entusiasmo è riflesso anche da istituzioni e aziende di rilievo: Gartner² ha classificato il *digital twin* come una delle

1 Singh M. et al. 2021.

2 Gartner Inc. è una società per azioni multinazionale che si occupa di consulenza strategica, ricerca e analisi nel campo della tecnologia dell'informazione.

tecnologie strategiche più rilevanti per tre anni consecutivi (2017-2019); Lockheed Martin³ lo considera una tecnologia chiave per il futuro dell'aerospazio⁴; Forbes⁵ lo ha definito una delle innovazioni fondamentali del prossimo decennio⁶. Inoltre, il mercato globale dei *digital twin* è destinato a crescere del 58% annuo, raggiungendo un valore di 48,2 miliardi di dollari entro il 2030⁷.

Figura 1.
Numero di pubblicazioni
relative al digital twin per
anno dal 2011 al 2020 su
scopus e science direct.



Nonostante il crescente interesse, l'implementazione dei *digital twin* nel settore AEC (Architettura, Ingegneria e Costruzioni) e nel contesto urbano rimane una sfida. Sebbene siano state sviluppate tecnologie avanzate per supportare il loro utilizzo, come l'*Internet of Things* (IoT), il *Building Information Modeling* (BIM), i *Big Data* e l'intelligenza artificiale (AI) il settore continua a essere ostacolato da una serie di problematiche, tra cui la frammentazione degli standard, la mancanza di competenze tecniche consolidate e la confusione terminologica e metodologica. In particolare,

³ Lockheed Martin impresa statunitense attiva nei settori dell'ingegneria aerospaziale e della difesa.

⁴ Tao, F., et al. 2019.

⁵ Forbes è una rivista statunitense di economia e finanza.

⁶ Marr, B., 2020.

⁷ Fortune Business Insights., 2023.

emerge una mancanza di chiarezza su cosa sia esattamente un *digital twin* urbano, quali siano le sue applicazioni pratiche e quali benefici possa apportare.

Questa ricerca si propone di esplorare il potenziale dei *digital twins* urbani attraverso un'analisi sistematica delle loro tecnologie abilitanti, dei casi studio e delle metodologie di valutazione. L'obiettivo è quello di identificare metriche oggettive per definire e implementare i *digital twins* nel contesto urbano, evidenziandone i punti di forza, le criticità e le opportunità future. In particolare, si intende indagare come questa tecnologia possa contribuire alla sostenibilità economica e ambientale, migliorando al contempo la pianificazione e la gestione delle città.

Lo studio è articolato in due parti principali. La prima parte, di natura qualitativa, esplora le origini e lo sviluppo del *digital twin*, concentrandosi sul ruolo delle tecnologie abilitanti. Attraverso una revisione critica della letteratura e una panoramica dello stato dell'arte, si analizzano le implicazioni tecnologiche e sociali di questa innovazione. La seconda parte, di carattere quantitativo, si focalizza sull'analisi di casi studio in città pionieristiche come Rotterdam, Singapore, Zurigo, Dublino, Amsterdam, Helsinki, Cambridge, Monaco di Baviera, Tampere e Stoccarda.

Queste città sono state individuate perché, ognuna secondo le proprie specificità, offrono esempi emblematici e innovativi nell'uso del *digital twin* per la gestione urbana.

L'attenzione si è concentrata in particolare sul contesto europeo, dove queste esperienze offrono modelli differenziati ma avanzati di applicazione della tecnologia.

Al tempo stesso, si è ritenuto essenziale includere Singapore, considerata una delle realtà più all'avanguardia a livello mondiale nella sperimentazione e implementazione dei *digital twins*, offrendo così uno sguardo comparativo e globale.

Un'attenzione particolare è dedicata al caso studio della città

di Tirana, che assume una rilevanza strategica all'interno della ricerca. In collaborazione con l'Università Politecnica di Tirana, è stato condotto uno studio approfondito sul traffico urbano. La scelta di Tirana è motivata non solo dal rapporto di collaborazione accademica, ma anche dal fatto che vi era già da parte delle istituzioni locali l'intenzione di affrontare le problematiche legate alla mobilità attraverso lo strumento del *digital twin*. Questo lavoro ha incluso un rilievo dettagliato delle dinamiche del traffico cittadino, con l'obiettivo di proporre una soluzione concreta e creare una solida base di dati per la futura implementazione di un *digital twin*. Tale modello sarà finalizzato a supportare l'ottimizzazione della mobilità urbana e a fornire strumenti avanzati per la gestione sostenibile del traffico.

La tesi si propone di fornire una base metodologica per la loro implementazione pratica, identificando metriche di valutazione e approfondendo casi studio significativi. La ricerca mira a promuovere un approccio sistematico e interdisciplinare per lo sviluppo di città intelligenti, sostenibili e resilienti, contribuendo a colmare le lacune esistenti nel settore e aprendo la strada a futuri studi e applicazioni.

1 | PARTE PRIMA TECNOLOGIE ABILITANTI PER I DIGITAL TWIN URBANI

1.1 INDUSTRIA 4.0: VERSO L'INTEGRAZIONE TRA FISICO E DIGITALE

Analisi del paradigma dell'Industria 4.0 e delle sue applicazioni nel contesto urbano e infrastrutturale

Il panorama industriale e tecnologico contemporaneo è attraversato da una profonda trasformazione che prende il nome di industria 4.0. Questo concetto, nato nei primi anni del XXI secolo, si riferisce a un nuovo paradigma produttivo caratterizzato dalla fusione tra mondo fisico e digitale, grazie all'integrazione di tecnologie avanzate come l'*Internet of Things* (IoT), l'intelligenza artificiale, la robotica collaborativa, il cloud computing e l'analisi dei *big data*. La quarta rivoluzione industriale rappresenta dunque un punto di svolta nel modo in cui vengono progettati, gestiti e controllati i processi industriali, ma la sua influenza non si limita alle fabbriche e alle linee di produzione. I principi dell'Industria 4.0 trovano applicazione in numerosi settori, tra cui quello delle infrastrutture, dell'architettura e della pianificazione urbana, segnando un passaggio epocale nella gestione delle costruzioni e delle città.

L'Industria 4.0 nasce come naturale evoluzione delle precedenti rivoluzioni industriali, che hanno segnato tappe fondamentali nello sviluppo tecnologico e socioeconomico. Se la prima rivoluzione industriale del XVIII secolo è stata segnata dall'introduzione della macchina a vapore e dall'automazione dei processi produttivi, la seconda ha portato all'elettrificazione delle fabbriche e all'organizzazione del lavoro su larga scala, con la terza rivoluzione, a partire dagli anni '70 del novecento, l'informatica e l'elettronica hanno fatto il loro ingresso nei processi industriali, aprendo la strada alla digitalizzazione e all'automazione avanzata.

La quarta rivoluzione industriale, si distingue per la capacità di connettere macchine, sistemi e persone attraverso un flusso continuo di dati, generando ambienti produttivi

intelligenti e adattabili. L'introduzione dell'intelligenza artificiale e delle reti di comunicazione avanzate ha portato a un modello di produzione basato su sistemi *cyber*-fisici, ovvero infrastrutture in cui le componenti fisiche e digitali interagiscono tra di loro in tempo reale, migliorando l'efficienza, la sicurezza e la capacità predittiva dei processi. Il principio fondamentale dell'Industria 4.0 è la connettività. Grazie alla diffusione dei sensori IoT, le macchine e le infrastrutture possono raccogliere, elaborare e trasmettere enormi quantità di dati, creando un flusso informativo costante tra il mondo fisico e quello digitale. Questa capacità di interconnessione consente di sviluppare modelli predittivi basati sull'analisi dei *big data*, i quali permettono non solo di ottimizzare la produzione e la manutenzione degli impianti industriali, ma anche di prevenire guasti e migliorare la gestione delle risorse, argomento che approfondiremo nel prossimo paragrafo. L'Industria 4.0 si caratterizza inoltre per l'utilizzo della robotica avanzata e della stampa 3D, strumenti che trasformano il modo in cui vengono progettati e realizzati manufatti e infrastrutture. L'impiego di sistemi automatizzati, in grado di operare in autonomia o in collaborazione con gli esseri umani, consente di aumentare la precisione e la qualità della produzione, riducendo al contempo i costi e i tempi di realizzazione. Un altro elemento chiave dell'Industria 4.0 è l'integrazione del *cloud computing* e la *blockchain* che hanno rivoluzionato il modo in cui i dati vengono archiviati, condivisi e analizzati. Le piattaforme digitali basate su *cloud* permettono di gestire in tempo reale informazioni provenienti da diverse fonti, rendendo possibile un coordinamento più efficace tra i vari attori coinvolti nei processi produttivi e gestionali. Questa capacità di elaborazione distribuita si estende anche al settore delle infrastrutture e delle costruzioni, dove il coordinamento tra progettisti, ingegneri, operatori e amministratori è essenziale per garantire efficienza e

sicurezza. In questo contesto, la gestione dei dati diventa un fattore determinante per il successo di progetti complessi, come la realizzazione di edifici intelligenti o di intere città connesse. La *blockchain* è invece, un registro digitale di transazioni che viene distribuito su una rete di computer. Ogni blocco nella catena contiene un insieme di transazioni e, una volta che un blocco viene aggiunto alla catena, non può essere manomesso. Ciò rende la *blockchain* un sistema molto sicuro per la registrazione e il tracciamento delle transazioni.

Nel mondo delle costruzioni, delle infrastrutture, degli immobili e delle città, la *blockchain* può essere utilizzata per tracciare la proprietà e il trasferimento di beni, gestire i contratti e garantire la sicurezza dei dati. Ad esempio, la *blockchain* può essere utilizzata per registrare la proprietà di un edificio o di un terreno, tracciare la cronologia della manutenzione di un'infrastruttura o gestire i contratti di costruzione, argomento che verrà approfondito nel paragrafo "2.5 cybersecurity e *blockchain*".

L'Industria 4.0 non si limita a introdurre nuove tecnologie, ma implica anche una trasformazione dei modelli organizzativi e decisionali. Il passaggio dalla produzione di massa a un sistema più flessibile e personalizzato ha portato le aziende e le istituzioni a ripensare le proprie strategie operative. La possibilità di raccogliere ed elaborare dati in tempo reale ha modificato profondamente il concetto di manutenzione e gestione delle infrastrutture. Grazie ai sistemi di monitoraggio avanzato, è possibile intervenire prima che si verifichino guasti o criticità, riducendo così i costi di manutenzione e aumentando la sicurezza e l'affidabilità delle strutture.

Questa rivoluzione tecnologica ha avuto un impatto significativo anche sulla progettazione e gestione delle città. Il concetto di *smart city* è strettamente legato ai principi dell'Industria 4.0, poiché si basa sull'integrazione di

tecnologie digitali per migliorare la qualità della vita urbana. La raccolta e l'analisi dei dati provenienti da infrastrutture, edifici, veicoli e dispositivi mobili consentono di ottimizzare la gestione delle risorse e di sviluppare servizi più efficienti e sostenibili. In questo scenario, il digital twin emerge come una delle tecnologie più innovative e promettenti, permettendo la creazione di modelli virtuali dinamici delle città e delle loro infrastrutture, che possono essere utilizzati per simulare e ottimizzare il funzionamento degli ambienti urbani.

In tale contesto si inseriscono in modo significativo le teorie dei flussi proposte da Domenico De Masi e Massimo Cacciari, che aiutano a comprendere i cambiamenti strutturali della città contemporanea. De Masi, analizzando la società post-industriale, evidenzia come la centralità della fabbrica sia stata sostituita da una nuova economia fondata sulla conoscenza, sulla creatività e sull'informazione, valori immateriali che si muovono attraverso reti globali.⁸ Cacciari, dal canto suo, interpreta la città come un luogo attraversato da flussi ininterrotti di dati, persone, merci e capitali che dissolvono i confini fisici tradizionali e trasformano lo spazio urbano in un'entità dinamica e reticolare. Le smart city, nella loro essenza, riflettono proprio questa trasformazione: non più spazi chiusi e statici, ma ambienti intelligenti e interconnessi, in cui il flusso di informazioni diventa la risorsa principale per la pianificazione, la gestione e la resilienza urbana.⁹

Il passaggio dall'Industria 4.0 alla gestione intelligente delle città e delle infrastrutture rappresenta quindi una continuità logica e necessaria, in cui il digital twin assume un ruolo chiave nella trasformazione digitale dei contesti urbani. La possibilità di creare copie digitali fedeli degli

8 De Masi D., 2000.

9 Cacciari M., 2004.

edifici, delle reti di trasporto e degli impianti energetici permette di migliorare la pianificazione, la manutenzione e l'efficienza operativa, riducendo al contempo i costi e l'impatto ambientale. La connessione tra mondo fisico e digitale sta ridefinendo il concetto stesso di costruzione e gestione degli spazi, aprendo la strada a soluzioni sempre più avanzate per affrontare le sfide della sostenibilità e della resilienza urbana.

L'Industria 4.0 non è solo un nuovo modello di produzione, ma un paradigma che sta ridefinendo il modo in cui interagiamo con l'ambiente costruito. La capacità di integrare dati, intelligenza artificiale e simulazioni avanzate sta trasformando settori fondamentali come le infrastrutture, l'architettura e la pianificazione urbana. Questo processo, ancora in evoluzione, segna l'inizio di una nuova era, in cui la digitalizzazione e l'automazione non sono più semplici strumenti di supporto, ma i pilastri di un nuovo modo di concepire e gestire lo sviluppo delle città e delle infrastrutture.

In questa prospettiva, le riflessioni di De Masi e Cacciari assumono un valore ancora più attuale. La città, da oggetto fisico delimitato, si trasforma in nodo di una rete globale, attraversata da flussi immateriali che ne ridefiniscono la struttura e le funzioni. Il paradigma post-industriale, come osserva De Masi, spinge verso modelli organizzativi flessibili, decentralizzati e orientati al sapere, mentre Cacciari mette in luce l'emergere di una spazialità aperta e frammentata, regolata più dal movimento che dalla permanenza. L'Industria 4.0, fondandosi sulla raccolta e sull'analisi in tempo reale dei dati, rende possibile questa nuova forma di urbanità fluida, in cui la dimensione digitale non affianca semplicemente quella fisica, ma la trasforma radicalmente, promuovendo città più reattive, sostenibili e interattive.

1.2 BIM E IOT: STRUMENTI PER LA MODELLAZIONE E IL MONITORAGGIO INTELLIGENTE

Descrizione del ruolo di BIM e IoT nella creazione di modelli dinamici e interoperabili

BIM

La digitalizzazione del settore edile è stata innescata dai progressi nella tecnologia dell'informazione che hanno creato possibilità senza precedenti per lo sviluppo di innovazioni e applicazioni per l'edilizia. È ormai ben noto l'acronimo BIM *building information modeling*, vale a dire quel sistema di lavoro che si occupa di strutturare informazioni durante il processo di modellazione progettuale di un edificio. Per essere più precisi, Angelo Ciribini, uno dei maggiori esperti italiani nel settore e uno dei primi a incentivare iniziative BIM nelle scuole di architettura, promuovendo BIM Academic Forum Italy a Roma, definisce il BIM un processo che, supportato da un metodo e unitamente al computational design, permette di effettuare simulazioni progettuali di un manufatto edilizio in ambito digitale, quindi computabili, tese ad assicurare la coerenza tra i diversi elementi che lo compongono, secondo un approccio in grado di anticipare e rispondere ai possibili fenomeni che potrebbero verificarsi in ogni fase del suo ciclo di vita¹⁰, come definisci nell'enciclopedia Treccani.

È bene precisare che il BIM non deve essere considerato solo uno strumento di rappresentazione avanzata di un modello tridimensionale. Tale sistema di dati, infatti, prevede che diversi agenti operino in stretta relazione tra loro, con una condivisione di informazioni che possa unire il progettista, il disegnatore, lo strutturista, il tecnologo, l'impiantista, ma anche il committente, l'impresa e chi opera nel cantiere, senza escludere coloro che si dovranno occupare della

manutenzione futura dell'edificio. Con il BIM tutte le figure che partecipano alla progettazione e alla realizzazione di un'opera sono, a vario titolo coinvolte, simulando in digitale un sistema costruttivo molto simile alla realtà, favorendo così l'emergere di errori e omissioni prima della realizzazione, diminuendo in questo modo tempi e costi in fase di esecuzione. L'obiettivo è quello di ridurre il gap tra progetto e realizzazione, mettendo a sistema quello che in un certo modo è sempre avvenuto nel processo progettuale: una cooperazione tra tutte le figure coinvolte nel progetto. Questo metodo progettuale non vede più la figura dell'architetto, ingegnere o comunque di un progettista al centro del progetto, ridisegna la scala piramidale come un cerchio, dove al centro c'è il progetto e intorno ci sono tutte le figure che partecipano alla progettazione, integrando competenze e meriti. È evidente che ciò ha senso nella misura in cui tutti i protagonisti si adeguano al BIM. La tradizionale separazione delle competenze viene rimpiazzata dalla loro integrazione, partendo dalla committenza chiamata a svolgere un ruolo chiave, ad assumere maggiore responsabilità e partecipazione per la realizzazione dell'opera, fornendo fin da subito esigenze e requisiti ben chiari occupando un ruolo di grande rilievo.

Il BIM impone quindi un sostanziale cambiamento di mentalità e modus operandi, alterando profondamente pratiche e modi di fare ben consolidati nelle prassi progettuali, impone ad esempio, alle figure coinvolte nella progettazione, di lavorare fianco a fianco, sullo stesso piano gerarchico, sin dalla fase di ideazione del progetto, combinando in questo modo le varie competenze al fine di ottenere un risultato di maggiore qualità, performante e coerente con la realtà.

Il BIM ha quindi inciso fortemente nel mondo dell'architettura, dell'edilizia, delle costruzioni e dell'ambiente costruito, è ed è stato oggetto di notevole interesse nel mondo della ricerca, ritenuto protagonista di un cambiamento

radicale, dimostrato sia da parte degli ordini professionali, per quanto riguarda l'aggiornamento degli studi, sia dal mondo accademico, che vede in questo ambito di lavoro un potenziale da sviluppare nella ricerca scientifica.

Bisogna però ricordare che il BIM è frutto di un lungo lavoro di sperimentazione avvenuto a piccoli passi che, pur essendo stato definito in dettaglio solo nell'ultimo ventennio, pone le sue basi tra gli anni Sessanta e Settanta del secolo scorso. Nell'articolo di Robert Aish del 1986, troviamo per la prima volta il termine *building information modeling* con il significato che gli attribuiamo noi oggi, ma è Chuck Eastman, direttore del *Building Lab* di *Georgia Tech*, precursore del concetto di base del BIM, attraverso il *Building Description System* (BDS), un sistema di modellazione parametrica basato su di un database collegato direttamente al modello digitale generato, capace di essere interrogato e di fornire analisi quantitative in base alle informazioni inserite al suo interno. Attraverso questo sistema introdusse la centralità del modello nel processo costruttivo e progettuale. Si tratta, di un processo che avvalendosi di tecnologie digitali basate su logiche parametriche in grado di coniugare dati geometrici e alfanumerici, sovrapponendo immagini e informazioni, e di assicurare coerenza progettuale grazie alla verifica delle dimensioni finanziaria (costi) e cronologica (tempi) ha assunto, negli anni, una grande importanza all'interno dei processi di ideazione, progettazione, realizzazione, gestione e manutenzione degli edifici¹¹.

Nel 1986 l'Ungherese Graphisoft lanciò il primo software BIM, denominato Archicad, da allora altre aziende, come Autodesk con *revit*, Bentley con *Aecosim* e Allplan con *Nemetschek* hanno sviluppato software in grado di gestire una grande mole di dati, controllare in modo simultaneo

11 Sacchi L. 2021.

elaborati bidimensionali e tridimensionali, gestire in modo coerente il progetto e la realizzazione, attraverso laser scanner monitorare cosa e quando è stato fatto, consentendo di avere costantemente il polso tra progetto, cronoprogramma (tempo) e computo metrico (costi), per poi definire i cosiddetti *as built*, elaborati che descrivono l'opera come è stata effettivamente costruita, a seguito di modifiche progettuali in corso d'opera o di difformità fra progetto e realizzazione.

Abbiamo visto come la grande differenza rispetto ai modelli tridimensionali sia la quantità di dati, di informazioni. Il termine *information* nell'acronimo *building information modeling* è la parola che più riassume la peculiarità del BIM, vale a dire aggiungere grande quantità di dati all'interno del progetto digitale (*virtual building*).

In base a quali e quante informazioni vengono inserite abbiamo diverse dimensioni del BIM, ad esempio ai fini della modellazione geometrica introdotta dai software sono sufficienti le 3 dimensioni ma per rappresentare gli altri ambiti di informazione è stato introdotto un nuovo approccio che fa riferimento ad altre dimensioni creando un vero e proprio sistema di classificazione.

Le dimensioni BIM fanno dunque riferimento ai diversi livelli di informazione di un modello: 3D modellazione tridimensionale, 4D gestione della programmazione (analisi dei tempi), 5D gestione informativa economica (analisi dei costi), 6D valutazione della sostenibilità (sociale, economica e ambientale), 7D gestione e *facility management*.

La modellazione tridimensionale 3D è la prima delle dimensioni, la quale consente di visualizzare il modello digitale dell'opera nelle tre dimensioni.

La possibilità di sviluppare un modello digitale del progetto consente di anticipare alla fase di progettazione molte analisi

di verifica che, come anticipato, con metodi di progettazione tradizionale, avvenivano solo nella fase esecutiva.

Il modello BIM si arricchisce di nuovi dati e informazioni provenienti dalle diverse discipline. Nasce quindi la necessità di una gestione dell'attività nota come "*model checking*" che si formalizza in due operazioni distinte: il code checking, ossia la verifica dell'aderenza del modello alle richieste progettuali e normative e la clash detection, ovvero l'analisi preventiva dei conflitti geometrici (e non) presenti nel modello.

Il 4D (quarta dimensione del BIM) è l'organizzazione delle attività relative alla pianificazione dei tempi del modello e di estrarre e visualizzare il progresso delle attività durante il ciclo di vita del progetto. I metodi tradizionali per la gestione della durata di un cantiere o più in generale di una commessa (diagramma di Gantt e Pert, ecc.) hanno alcuni limiti e criticità: la perdita informativa nella trasmissione dei dati da progettista ad impresa, l'effettiva presenza e la precisa collocazione dei materiali in cantiere, lo stato dell'esecuzione dell'opera. Questi sono solo alcuni dei motivi che causano ritardi e inefficienze con la conseguente necessità di dover rivedere quanto programmato fino a quel momento.

Per evitare tali problematiche è opportuno costruire una "*WBS – Work Breakdown Structure*" che consente di riorganizzare i tempi di una commessa in maniera dinamica. Il progetto viene scomposto in parti elementari appositamente pensate per essere collegate a quanto modellato. In questo modo è possibile visualizzare agevolmente il progredire dell'opera (cronoprogramma dei lavori).

Con un *software* BIM i dati sono legati alla rappresentazione grafica dei componenti e diventa più facile consultare e comprendere le informazioni di progetto ottenendo una serie di vantaggi, coordinare in modo efficiente progettisti,

appaltatori e team e gestire le informazioni relative allo stato del cantiere, visualizzando l'impatto delle modifiche apportate durante tutto il ciclo di vita.

La modellazione 5D BIM riguarda l'attività di stima e analisi dei costi, il cosiddetto "Quantity Take Off" è possibile creare un legame diretto tra gli elementi del modello digitale, le quantità e la stima dei costi. Per i quantity surveyor l'utilizzo di tale tecnologia determina una maggiore precisione e prevedibilità della stima dei costi del progetto, delle variazioni delle quantità, dei materiali, delle attrezzature e manodopera, consente inoltre di visualizzare il progresso delle attività e dei relativi costi nel tempo.

Il BIM 6D è associato all'efficienza energetica e allo sviluppo sostenibile di un edificio nuovo o già esistente. Il concetto di sostenibilità può essere esaminato sotto tre diversi punti di vista, si parla infatti di sostenibilità (i) ambientale, in termini di capacità di riproduzione e mantenimento delle risorse naturali, (ii) economica, intesa come facoltà di generare reddito e lavoro, (iii) sociale, come generatrice di benessere per l'uomo. La simulazione 6D consente quindi un'analisi in termini di sostenibilità (economica, ambientale, energetica, ecc.) dell'intervento. L'analisi delle prestazioni energetiche sin dalla fase di progettazione fornisce al progettista le informazioni per assumere scelte più consapevoli, soluzioni, tecniche idonee da adottare per garantire minori consumi energetici, maggiore qualità e comfort garantendo così la sostenibilità del progetto, determinando attraverso metodi di valutazione come LEED¹² e ITACA¹³ una classificazione

12 La *Leadership in Energy and Environmental Design* è il sistema statunitense di classificazione dell'efficienza energetica e dell'impronta ecologica degli edifici, sviluppato dallo U.S. Green Building Council, fornisce un insieme di standard di misura per valutare le costruzioni ambientalmente sostenibili.

13 Il Protocollo Itaca è uno strumento di valutazione del livello di sostenibilità energetica e ambientale degli edifici. Il Protocollo permette di verificare le prestazioni di un edificio in

energetica e l'impatto sull'ambiente.

Con l'utilizzo di un software per l'analisi e la simulazione energetica, è possibile valutare diverse soluzioni in tempi rapidi e in modo accurato, analizzando l'impatto delle diverse soluzioni sugli aspetti economici e operativi durante l'intero ciclo di vita dell'opera.

Infine, il 7D riguarda la gestione operativa e la manutenzione dell'edificio e delle sue componenti per tutto il ciclo di vita. Nel momento in cui si parla di ciclo di vita non si può prescindere dal considerare gli aspetti di manutenzione e di dismissione tenendo traccia di tutti i dati relativi ai componenti, alle specifiche, ai manuali di manutenzione e installazione e alle garanzie dei prodotti e materiali impiegati. È possibile ottimizzare la gestione operativa del bene edilizio durante l'intero ciclo di vita. Il *facility manager* attraverso il 7D è in grado di facilitare le verifiche, garantire efficienza, sicurezza e conformità agli standard delle costruzioni durante il loro *lifecycle*, ottimizzare infine risorse e costi di manutenzione grazie a sistemi di monitoraggio continui come sensori e IoT (aspetti che approfondiremo nel prossimo paragrafo).

Oltre alle sette dimensioni citate, il dibattito è aperto su tre “nuove dimensioni del BIM”, 8D sicurezza in fase di progettazione e realizzazione dell'opera, 9D lean construction e 10D industrializzazione delle costruzioni.

Altri protagonisti sono HBIM, *Heritage BIM* o *Historic BIM*, vale a dire quella metodologia BIM applicata al patrimonio esistente sia in scala urbana che architettonica.

Il termine HBIM viene utilizzato nell'articolo di Maurice Murphy per la prima volta nel 2009, riferendosi a modelli digitali tridimensionali arricchiti da informazioni di vario genere di manufatti esistenti, con la possibilità di apportare modifiche e aggiornamenti dal modello reale a quello

riferimento ai consumi dell'edificio.

virtuale, riuscendo ad ottenere un modello parametrico intelligente.

Il BIM nasce per edifici di nuova realizzazione, molte informazioni che inseriamo all'interno del progetto digitale vengono successivamente verificate e rispecchiate nella realtà, nel caso del BIM applicato al patrimonio esistente vengono prima raccolti una grande quantità di dati, geometrici e morfologici attraverso laser scanner, droni e fotogrammetria ottenendo immagini tridimensionali, nuvole di punti da utilizzare come base per la realizzazione dei manufatti digitali.

Il BIM svolge un ruolo da protagonista sia per le nuove costruzioni che per quelle già esistenti, assumendo un ruolo fondamentale nell'intero processo del settore AEC (*architecture, engineering e construction*).

Osservando il BIM nel contesto italiano ci limitiamo a riflettere una chiara intenzione da parte del governo di disciplinare l'uso attraverso la normativa UNI 11337, la quale con il decreto 2 agosto 2021, n. 312 al decorrere del primo gennaio 2025 impone l'utilizzo del BIM per opere pubbliche con un importo lavori superiore a 1 milione di euro.

Inoltre, attraverso ICMQ¹⁴ vengono riconosciute tre figure professionali, *BIM specialist*, *BIM coordinator* e *BIM manager*. Per *BIM specialist* si intende l'operatore della modellazione informativa, competente in una delle diverse discipline, che opera all'interno delle singole commesse in grado di utilizzare la documentazione tecnica e i *software* dedicati per la modellazione degli oggetti e la produzione degli elaborati.

14 ICMQ Istituto di certificazione e marchio qualità per prodotti e servizi per le costruzioni è un'associazione senza fini di lucro alla quale aderiscono numerose associazioni di categoria di tutta la filiera delle costruzioni.

Per BIM *coordinator* si intende il coordinatore dei flussi informativi e del team di BIM *specialist* dell'azienda, che opera in qualità di garante della efficienza e della efficacia dei processi digitalizzati con riferimento alla specifica commessa. Ha una competenza multidisciplinare e supporta il BIM *manager* nella redazione del capitolato informativo o offerta di gestione informativa.

Infine, il BIM *manager* è il gestore dei processi digitalizzati al livello dell'organizzazione, e ha la supervisione generale delle commesse aziendali. Definisce e assicura le regole per l'implementazione dei processi dell'organizzazione per la gestione dei flussi informativi per ogni singola commessa. Redige il capitolato informativo, l'offerta di gestione informativa, e ogni aspetto contrattuale relativo alla gestione della commessa. Anche ordini professionali e mondo accademico hanno riconosciuto l'importanza di formare i nuovi professionisti con metodologia BIM, promuovono da tempo formazione all'interno dei percorsi universitari di interesse (architettura e ingegneria), avviando corsi e master sulla metodologia BIM.

L'Italia ha al momento un coinvolgimento marginale per quanto riguarda l'adozione di questo protocollo di lavoro da parte degli studi professionali.

I paesi nordeuropei e gli Stati Uniti, da anni ormai hanno adottato codifiche tecniche sulla metodologia BIM, in base a richieste specifiche provenienti da parte dei rispettivi organi istituzionali, al fine di migliorare la qualità del lavoro legato al mondo dell'edilizia, e nell'ottica di una generale riduzione dei costi di costruzione.

Abbiamo visto come e in che modo il BIM sta influenzando il settore AEC, uno strumento ancora in fase di sviluppo e oggetto di ricerca. Non mancano le sfide, l'identificazione di ruoli e responsabilità, la protezione della proprietà intellettuale, l'allocazione del rischio, la sicurezza di terze

parti e la disponibilità di intermediari tecnologici¹⁵. I problemi di interoperabilità a causa di specifiche insufficienti quando il modello è condiviso tra vari partecipanti al progetto. Inoltre, vi sono ruoli e responsabilità sovrapposti, protezione della proprietà intellettuale, delega delle responsabilità di mitigazione del rischio, riservatezza e sfide di responsabilità¹⁶. Le piattaforme BIM sono anche esposte a vulnerabilità come conseguenza della manipolazione dei dati, dell'*hacking* e di attacchi informatici che richiedono aggiornamenti e modifiche che possono produrre ritardi del progetto ed avere effetti sui costi.

Al fine della ricerca il BIM acquista importanza nel momento in cui viene integrato con l'Iot (*Internet of Things*) e riesce ad acquisire dati in tempo reale. La combinazione delle tecnologie BIM e IoT può soddisfare le esigenze di elaborazione dei gemelli digitali e di gestione delle informazioni a livello di edificio e in scala urbana. Ad esempio, il BIM combinato con la tecnologia IoT può formare un sistema di componenti per l'edilizia stabilendo una piattaforma, integrando le informazioni sui dati e costruendo un modello di dati secondo il formato IFC (*Industry Foundation Class*). Inoltre, la tecnologia IoT può essere utilizzata per costruire la piattaforma informativa del componente dell'edificio in modo che progettisti, utenti, produttori, governi e altre parti di costruzione ingegneristica possano interrogare, recuperare, accedere ed estrarre le informazioni sul prodotto richieste da un *database*¹⁷.

L'integrazione del *Building Information Modeling* connesso a dispositivi *Internet of things* (IoT) presenta un potente paradigma per le applicazioni volte a migliorare la costruzione e l'efficienza progettuale. Il collegamento di flussi di dati

15 Sacks et al. 2018.

16 Nawari, 2021.

17 Saieg P. et al., 2018.

in tempo reale dal set in rapida espansione di sensori IoT ai modelli BIM fornisce numerose applicazioni. Tuttavia, la ricerca sull'integrazione di BIM e IoT è ancora in fase nascente; è necessario comprendere la situazione attuale dell'integrazione dei dispositivi BIM e IoT al fine di favorire l'integrazione dei gemelli digitali. Ma cosa si intende per *internet of things*? In che modo riesce a integrarsi al BIM? E ancora, quali sono i suoi sviluppi in merito ai *digital twins*?

IoT

A oggi, internet è diventato onnipresente, ha raggiunto ogni parte del mondo e sta influenzando sempre di più la vita umana. Tuttavia, è un campo tutt'altro che saturo. Stiamo entrando, o forse siamo già entrati, in un periodo storico in cui essere collegati alla rete è diventato progressivamente inevitabile dove un'ampia varietà di macchine e oggetti è, e sarà correlata al web.

L'acronimo IoT, *internet of things* è descritto dall'organizzazione internazionale per la standardizzazione (ISO 2018) come “un'infrastruttura composta da sistemi, persone e risorse informative collegate, insieme a servizi intelligenti che consentono loro di gestire e rispondere alle informazioni provenienti sia dal mondo reale che il mondo virtuale”. In altre parole, tutti quegli strumenti e applicazioni che permettono agli oggetti di collegarsi e dialogare tra loro. Pertanto, l'IoT combina stati fisici e virtuali che incorporano parti fisiche come sensori, attuatori, servizi cloud, comunicazioni e protocolli con progetti diversi per fornire una struttura e una spiegazione per i sistemi IoT¹⁸. I rapidi progressi nella tecnologia dei sensori e della comunicazione negli ultimi anni hanno alimentato l'espansione dell'IoT, portando all'uso diffuso di dispositivi e sensori connessi

in campi diversi come trasporti, sicurezza, salute, edifici intelligenti e produzione automobilistica¹⁹.

L'internet of things si sta evolvendo velocemente, rivoluzionando il mondo moderno segnando una svolta nel campo dell'intelligenza artificiale²⁰. È una grande tecnologia che collega molti oggetti che ci circondano, dagli elettrodomestici, agli apparecchi telecomandati, ai veicoli che ci forniscono il percorso più breve e sicuro agli smartphone, dispositivo universale che ha numerosi tipi di sensori installati al suo interno, modificando i nostri comportamenti, pensieri e modi di fare, tangibili nella vita quotidiana (David R. 2014). Il cellulare, in particolar modo, è un dispositivo estremamente comodo e facile da usare, riesce, per la sua versatilità e diffusione di utilizzo, ad acquisire un gran numero di dati e informazioni ben precise, definito come 'scatole nere delle persone', il quale proietta l'IoT verso ambiziosi obiettivi.

Difatti con la crescente importanza degli smartphone tra gli individui, gli scienziati stanno indicando interesse nella costruzione di dispositivi IoT intelligenti che utilizzano gli smartphone grazie ai sensori installati²¹.

L'internet delle cose è quindi una grande rete composta da dispositivi ad essa collegati; questi ultimi raccolgono dati, condividono il modo in cui vengono gestiti ed eseguono le attività assegnate. Un ecosistema IoT coinvolge dispositivi intelligenti abilitati al Web che utilizzano sistemi incorporati, come processori, sensori e *hardware* di comunicazione, per assemblare, inviare e agire sui dati che ottengono²². Questi dispositivi comunicano con altri dispositivi connessi e agiscono in base alle informazioni che ottengono gli uni dagli altri. Tali sensori svolgono la maggior parte del lavoro

19 Lin, Y.C. et al. 2020.

20 Tao et al., 2014.

21 Bradai A. et al. 2019.

22 Medhat G. et al. 2019.

senza l'intervento umano, sebbene le persone possano interagire con i dispositivi, ad esempio, per configurare, istruire o accedere ai dati²³. I protocolli di connettività, rete e comunicazione utilizzati con questi dispositivi abilitati per il web dipendono fortemente dalle specifiche applicazioni IoT implementate.

Come ogni grande tecnologia che nell'ultimo decennio ha influenzato le nostre vite sono inevitabili dubbi e interrogativi: a chi spetta la tutela della *privacy*? chi gestisce grandi quantità di dati? Saranno le grandi aziende *hi-tech*, capaci di influenzare sempre più le nostre passioni, gusti e pensieri, o governi e amministrazioni intendono disciplinare in modo chiaro ed esaustivo l'uso e i modi di come reperire e gestire dati? oltre a quesiti di natura sociale, politica e culturale anche interrogativi di natura tecnica non mancano, i diritti di proprietà dei *software* di gestione, la creazione di piattaforme open source, l'interconnessione costante dei dispositivi alla rete.

L'IoT emerge quando la tecnologia viene fornita con la capacità di controllo intelligente, vari dispositivi fisici in tutto il mondo connessi a Internet per condividere e ricevere dati. Dong et al. ha definito l'IoT come “più di una parola d'ordine; un sistema che fornisce un nuovo modo di interagire con la tecnologia e il comportamento di un essere umano²⁴.”

La tecnologia è integrata con *software* digitale, sensori e altri sistemi informatici per lo scambio di dati con dispositivi distinti in modalità *wireless* su Internet. Dall'altro lato, il progresso tecnologico e l'evoluzione dell'hardware informatico e della comunicazione *wireless*, come la

23 Rafiq, M., Jalal, A. 2025.

24 Xuebing D. 2017.

generazione 6 (6G)²⁵ consentono di controllare ogni dispositivo fisico, ad esempio, da uno piccolo come un *chip* ormai onnipresente a uno enorme come un veicolo aereo senza pilota.

Queste tecnologie soddisfano l'enorme esigenza della popolazione mondiale di fornire comunicazioni rapide e sicure con la promettente soluzione della abilitazione del trasferimento di energia *wireless*, il 6G gestisce anche una frequenza più elevata e una larghezza di banda più ampia²⁶. I sensori IoT sono disponibili in un'ampia varietà di forme e l'industria AEC utilizza spesso dispositivi come GPS, sensori di immagini, sensori di prossimità, sensori di identificazione a radiofrequenza, sensori di movimento e biosensori²⁷.

Le applicazioni IoT cercano di apportare cambiamenti importanti nei nostri stili di vita²⁸. Le aziende *hi-tech* della tecnologia IoT (come Google, Apple, Microsoft, DJI, IBM, Huawei) stanno già collegando le nostre vite, con lo scopo di raccogliere e analizzare un gran numero di dati e capire, anticipare e indirizzare i nostri gusti, passioni, tendenze e orientare in un certo senso le nostre vite.

BIM e IoT

Il BIM può supportare la sincronizzazione dei dati raccolti dai dispositivi dell'*internet of things* attraverso standard di comunicazione (ad esempio, modelli IFC). Il valore del BIM dal punto di vista dell'integrazione IoT risiede nella sua potente capacità di creare un ciclo di informazioni tra diversi sistemi e fasi partecipanti. L'uso efficace dell'integrazione BIM-IoT è evidenziato da molti studi, nel migliorare l'efficienza costruttiva e operativa, facendo emergere potenzialità e capacità di fornire *feedback*, elaborare una pianificazione

25 Qiao Q. 2020.

26 Saad W. 2019.

27 Lee D. 2021.

28 Guizani M. 2018.

predittiva e altri aspetti che approfondiremo nel prossimo paragrafo^{29 30}. Tuttavia, la maggior parte di queste ricerche sono ancora allo stadio concettuale³¹.

Va riscontrato che l'integrazione BIM-IoT può fornire un afflusso di dati ricchi e costantemente aggiornati sulle caratteristiche funzionali e prestazionali di una struttura, ma il BIM stesso non dispone di capacità di manipolazione dei dati per valutare e prevedere lo stato in tempo reale delle risorse, processi, sistemi o persino servizi. È noto che l'integrazione BIM-IoT apre un nuovo modo di raccogliere, archiviare e scambiare dati: i gemelli digitali. L'integrazione di BIM e IoT può archiviare e aggiornare una varietà di informazioni, tra cui proprietà dell'oggetto, condizioni del sito e della struttura, misurazioni fisiche, dati di serie temporali sullo stato di avanzamento e altro, che offre ricche fonti di dati per i digital twin supportando l'apprendimento delle conoscenze e il processo decisionale.

La piattaforma BIM ha la potenziale sinergia con l'IoT per sincronizzare e archiviare vari dati. Dopo che una grande quantità di dati è stata interpretata ed elaborata nella struttura corretta, può essere utilizzata per costruire il gemello digitale eseguendo il mirroring del sistema fisico in uno spazio virtuale. La differenza sostanziale tra BIM integrato all'IoT e un digital twin è la presenza di una mappatura dinamica bidirezionale, che associata a una AI (Artificial Intelligence) rende i gemelli digitali in grado di recepire informazioni, elaborarle, e sulla base di un algoritmo programmato, eseguire un output, far compiere un'azione al variare delle informazioni in entrata (input). Ossia, da un lato i dati di input, raccolti nella parte fisica verranno inviati alla parte virtuale per l'elaborazione e l'analisi. D'altra

29 JC Cheng, W. 2020.

30 J. Teizer. 2017.

31 Tang S. 2019.

parte, il modello virtuale simulerà il comportamento del mondo reale in modo digitale per produrre intuizioni e/o azioni utilizzabili da una varietà di algoritmi, assimilando in questo modo il valore pratico nell'adattare dinamicamente il sistema fisico all'ambiente in evoluzione.

Si può considerare di stabilire un quadro ben definito di un gemello digitale basato su BIM, IoT e AI, che può essere presentato come un paradigma “fisico-dati-virtuale” per una maggiore interoperabilità, automazione e intelligenza³². L'obiettivo principale è sviluppare un *framework* basato su *digital twin* attraverso l'integrazione di BIM, IoT e AI, che funga da metodo pratico per controllare e ottimizzare il complesso processo di costruzione, gestione, manutenzione e controllo, con un alto grado di automazione e intelligenza. Mira a colmare il divario tra la scienza dei dati e l'analisi del processo di costruzione.

In altre parole, tecniche di machine learning integrate ai dati IoT possono offrire una vasta gamma di approfondimenti digitali sui dati raccolti per prendere decisioni più consapevoli e proattive, previsione e miglioramenti delle condizioni, che non si basano più su giudizi soggettivi dati dall'esperienza dell'individuo con pregiudizi e incertezza. Il BIM integrato all'IoT pone le basi per il gemello digitale, raccoglie molti dati con conoscenze e potenzialità ancora nascoste.

1.3 BIG DATA: GESTIONE E ANALISI DEI FLUSSI INFORMATIVI

Approfondimento sul valore dei big data per la simulazione, l'ottimizzazione e la previsione nel digital twin

L'efficacia dei *digital twin* dipende fortemente dalla gestione e dall'analisi dei big data, che costituiscono la base informativa necessaria per la creazione e il funzionamento di

un *digital twin*. La crescente disponibilità di dati, provenienti da sensori IoT, sistemi informativi e altre fonti digitali, ha contribuito a rendere possibile la modellazione dettagliata e dinamica dei sistemi fisici in ambienti virtuali.

L'integrazione tra big data e *digital twin* ha aperto nuove prospettive e opportunità in diversi settori, tra cui la produzione industriale, la sanità, la gestione delle infrastrutture e la pianificazione urbana.

I big data sono caratterizzati da cinque proprietà fondamentali, note come le "5V" (Volume, Velocità, Varietà, Veridicità e Valore). A queste si aggiungono concetti emergenti come la variabilità e la viscosità dei dati, che indicano rispettivamente l'incoerenza temporale delle informazioni e la difficoltà nel trasporto e nell'elaborazione di dati complessi.

Volume: la quantità di dati generati e raccolti è enorme e in continua crescita.

Velocità: i dati vengono prodotti, acquisiti ed elaborati in tempo reale o quasi.

Varietà: le fonti dei dati sono molteplici (testi, immagini, video, dati strutturati e non strutturati).

Veridicità: la qualità e l'affidabilità dei dati devono essere garantite per evitare analisi errate.

Valore: i dati devono essere trasformati in informazioni utili per supportare decisioni strategiche.

Variabilità: la forma e il significato dei dati possono cambiare nel tempo.

Viscosità: rappresenta la difficoltà nell'estrazione delle informazioni rilevanti.

L'integrazione dei big data con i digital twin consente di sfruttare al massimo queste proprietà, migliorando la capacità predittiva e l'ottimizzazione dei processi, con applicazioni sempre più sofisticate in vari ambiti.

I big data offrono un potenziale significativo per la creazione di digital twin più accurati, efficienti e scalabili.

Ad esempio, i big data sono utilizzati per addestrare algoritmi di apprendimento automatico (*machine learning*), che a loro volta vengono utilizzati per creare modelli virtuali più accurati e realistici. Inoltre, i big data possono essere utilizzati per ottimizzare le prestazioni dei digital twin, riducendo i tempi di elaborazione e migliorando l'efficienza complessiva.

L'importanza dei big data per i *digital twin* è stata evidenziata in diverse pubblicazioni scientifiche. Ad esempio, “Tao et al. 2019”³³ hanno discusso il ruolo dei big data nel guidare la progettazione, la produzione e la manutenzione di prodotti basati su *digital twin*. Allo stesso modo, “Rathore et al. 2021”³⁴ hanno evidenziato il ruolo dei big data nell'integrazione di analisi avanzate e capacità di apprendimento automatico nei *digital twin*.

Come definito il *digital twin* è una rappresentazione virtuale di un sistema fisico che si aggiorna dinamicamente attraverso lo scambio bidirezionale di dati in tempo reale. Questa tecnologia si basa su tre componenti principali: (i) il gemello fisico, l'oggetto o il sistema reale, (ii) il gemello digitale, la replica virtuale che riceve e analizza i dati, (iii) il flusso di dati, la connessione tra il fisico e il digitale, abilitata dai big data³⁵.

L'integrazione tra big data e *digital twin* permette di ottenere numerosi benefici. In primo luogo, il monitoraggio in tempo reale, reso possibile dalla continua acquisizione di dati e informazioni, permette di identificare eventuali anomalie nel funzionamento del sistema e di intervenire prontamente per ottimizzare le operazioni. In secondo luogo, l'uso di algoritmi di machine learning e modelli predittivi, alimentati dai big data raccolti, consente di anticipare possibili guasti

33 Tao, F., et al. 2019.

34 Rathore M., 2021.

35 Tao, F., et al., 2018.

e malfunzionamenti, aprendo la strada alla manutenzione predittiva. In terzo luogo, la simulazione di scenari basata sui dati raccolti consente di prendere decisioni più informate e consapevoli.

Inoltre, nei contesti urbani, come vedremo nei capitoli seguenti, i *digital twin* consentono di personalizzare i servizi offerti ai cittadini in base alle loro esigenze e preferenze. La combinazione tra dati in tempo reale e modelli predittivi, inoltre, consente di simulare scenari futuri con maggiore accuratezza. Infine, l'interoperabilità e la scalabilità dei *digital twin* sono aspetti fondamentali per garantire la loro efficacia e versatilità.

L'integrazione tra big data e *digital twin* è resa possibile da una sinergia di diverse tecnologie chiave:

Internet of Things (IoT): consente la raccolta continua di dati da sensori e dispositivi connessi.

Cloud computing: fornisce l'infrastruttura necessaria per archiviare ed elaborare le enormi quantità di dati generate dai big data e dai *digital twin*.

Intelligenza artificiale e *machine learning*: svolgono un ruolo fondamentale nell'analisi dei dati raccolti, consentendo di estrarre informazioni utili, identificare modelli e tendenze e migliorare le capacità predittive dei *digital twin*.

Blockchain: contribuisce a garantire la sicurezza e la tracciabilità dei dati condivisi tra sistemi fisici e digitali.

Edge computing: permette di elaborare i dati direttamente nei dispositivi connessi, riducendo la latenza e migliorando l'efficienza operativa.

L'integrazione tra big data e *digital twin* rappresenta un cambio di paradigma in diversi settori, come la produzione industriale e la gestione delle città. Nell'industria, l'utilizzo dei big data nei *digital twin* consente di ottimizzare la produzione, migliorare la qualità dei prodotti e ridurre gli sprechi. Nella gestione delle città, i *digital twin* possono essere utilizzati per modellare e simulare il flusso del

traffico, prevedendo la congestione e ottimizzando i tempi di percorrenza. Questo approccio *data-driven* all'innovazione consente di simulare scenari futuri, prevedere gli esiti e ottimizzare i processi, con un impatto significativo sulla qualità, l'efficienza e la sostenibilità.

I big data non sono solo una fonte di informazioni per il presente, ma anche una chiave per comprendere e plasmare il futuro. Le grandi aziende *hi-tech* stanno investendo massicciamente nell'analisi dei big data per anticipare le tendenze del mercato, personalizzare i servizi offerti e sviluppare nuove tecnologie. Allo stesso modo, i big data possono essere utilizzati per alimentare i digital twin e migliorare la loro capacità predittiva, consentendo di simulare scenari futuri e di prendere decisioni più informate in diversi ambiti. In conclusione, i big data sono un elemento fondamentale per lo sviluppo e l'applicazione dei *digital twin*. La loro capacità di fornire informazioni dettagliate e aggiornate in tempo reale consente di creare modelli virtuali più accurati, efficienti e scalabili. In futuro, possiamo aspettarci che i big data svolgano un ruolo di primaria importanza nei *digital twin*, contribuendo a creare sistemi più intelligenti, efficienti e sostenibili.

1.4 INTELLIGENZA ARTIFICIALE: APPRENDIMENTO AUTOMATICO E CAPACITÀ PREDITTIVA NEI SISTEMI URBANI

Funzione dell'AI nel potenziare i digital twin attraverso simulazioni e decisioni basate sui dati.

L'intelligenza artificiale (IA) rappresenta una tecnologia trasformativa nel panorama dei *digital twin*, permettendo a questi ultimi di evolvere da semplici rappresentazioni digitali a strumenti dinamici e intelligenti per l'analisi, la gestione e l'ottimizzazione dei sistemi fisici. L'intelligenza artificiale ha molteplici declinazioni, quelle ritenute maggiormente utili sono il *machine learning* (ML) e il *deep learning* (DL),

le quali offrono un supporto fondamentale per estrarre valore dai dati, fornire previsioni accurate e migliorare i processi decisionali in tempo reale. In questo contesto, l'integrazione dell'intelligenza artificiale nei digital twin non solo amplifica le capacità operative, ma ridefinisce il modo in cui si affrontano le sfide della gestione urbana e delle infrastrutture.

L'intelligenza artificiale svolge un ruolo chiave nei *digital twin*, consentendo di sfruttare al massimo i dati raccolti tramite sensori, IoT e altre fonti. Attraverso modelli di apprendimento automatico, i *digital twin* acquisiscono la capacità di interpretare informazioni complesse, identificare schemi ricorrenti e prevedere il comportamento del sistema fisico associato. Ad esempio, in un contesto urbano, l'intelligenza artificiale permette di analizzare enormi volumi di dati sul traffico per suggerire percorsi alternativi, ridurre i tempi di viaggio e diminuire le emissioni. Questa sinergia tra intelligenza artificiale e *digital twin* si traduce in sistemi in grado di adattarsi dinamicamente ai cambiamenti e di migliorare costantemente grazie ai dati che ricevono.

Un caso significativo riguarda l'uso dell'intelligenza artificiale nei sistemi di manutenzione predittiva, dove i modelli di *machine learning* analizzano i dati sensoriali in tempo reale per anticipare i guasti. Questo approccio non solo riduce i costi operativi, ma migliora anche l'affidabilità delle infrastrutture. Studi recenti evidenziano come l'intelligenza artificiale applicata ai *digital twin* abbia migliorato la resilienza delle reti elettriche urbane, ottimizzando la distribuzione dell'energia e riducendo le interruzioni^{36 37}.

Il *machine learning* (ML) con le promettenti tecniche di *deep learning* (DL) rappresentano un pilastro fondamentale per

36 Papadonikolaki, E. et al. 2024.

37 Van der Schaar M. 2024.

l'evoluzione tecnologica dei *digital twin*.

Il *machine learning* è una tecnologia che consente ai computer di apprendere dai dati senza essere programmati esplicitamente, applicando algoritmi per identificare schemi e fare previsioni accurate³⁸, il *deep learning* invece è una sua branca più avanzata, utilizza reti neurali per processare informazioni complesse e identificare schemi³⁹. Questi strumenti non solo ampliano le capacità analitiche dei *digital twin*, ma consentono di affrontare sfide intricate come la previsione di eventi e l'ottimizzazione di risorse in ambienti dinamici e ad alta variabilità, tipici delle città e delle infrastrutture moderne. Proseguendo, esamineremo come il *machine learning* e il *deep learning* siano concretamente applicati nei *digital twin* per creare soluzioni innovative e sostenibili nei contesti urbani.

Il *machine learning*, con algoritmi capaci di apprendere dai dati passati, è essenziale per identificare tendenze e anomalie in tempo reale. Per esempio, nei progetti legati allo sviluppo di *smart city*, il *machine learning* è stato utilizzato per monitorare il consumo idrico e identificare perdite nelle reti di distribuzione, garantendo interventi tempestivi e risparmi significativi.

Il *deep learning*, sfrutta reti neurali per analizzare dati complessi, trova applicazione in ambiti come il riconoscimento delle immagini satellitari per il monitoraggio dell'espansione urbana o l'analisi di dati climatici per prevedere eventi estremi⁴⁰. Queste capacità consentono ai *digital twin* di generare modelli sempre più precisi e di simulare scenari futuri con un elevato grado di accuratezza,

38 Bibri S., et al. 2024.

39 Hayou, S. 2024.

40 Mohamadiazar, N. 2024.

come evidenziato da diverse ricerche sull'ottimizzazione delle reti di trasporto in città densamente popolate.

Le applicazioni dell'intelligenza artificiale nei *digital twin* sono vaste e diversificate, ma uno degli ambiti più promettenti è la gestione delle città intelligenti. Grazie all'intelligenza artificiale, i *digital twin* possono fornire una visione completa e dinamica del funzionamento urbano, integrando dati provenienti da traffico, energia, acqua e rifiuti. Questo permette alle amministrazioni di prendere decisioni più informate e di migliorare l'efficienza complessiva del sistema urbano.

Un esempio concreto è lo studio di Hassan e Alaliyat, il quale presenta un *framework* di *digital twin* per il monitoraggio e l'ottimizzazione in tempo reale delle rotte di trasporto pubblico in città intelligenti. Il sistema utilizza dati aggiornati continuamente da sensori IoT per simulare e adattare dinamicamente i percorsi degli autobus. Questo approccio riduce i tempi di viaggio, migliora la puntualità e ottimizza l'efficienza delle risorse di trasporto pubblico.⁴¹

Figura 2.
Nell'immagine è rappresentata una sintesi dello studio di Hassan e Alaliyat, dove si rappresenta un sistema che raccoglie dati in tempo reale da sensori IoT per creare gemelli digitali di infrastrutture urbane. Sono evidenziati i flussi di dati attraverso processi di protezione, come crittografia e anonimizzazione, per garantire la sicurezza e la privacy. L'architettura scalabile del sistema mostra come diversi asset urbani vengano modellati, simulati e visualizzati, migliorando la gestione e la pianificazione delle città intelligenti. (fonte: Ieee xplore. "Verso la creazione di uno strumento di creazione di gemelli digitali: una prospettiva di mobilità intelligente nelle città intelligenti").



Inoltre, l'intelligenza artificiale contribuisce in modo determinante alla transizione verso città sostenibili. I *digital twin* alimentati da algoritmi guidati da forme di intelligenza artificiale possono simulare e valutare l'impatto ambientale di interventi urbanistici, come la costruzione di nuove infrastrutture o la riqualificazione energetica degli edifici. Questo approccio *data-driven* è fondamentale non solo per conseguire gli obiettivi di neutralità climatica stabiliti da iniziative come il green deal europeo, piano d'azione per l'energia sostenibile e il clima (PAESC) e dal piano europeo 2030 ma anche per affrontare sfide trasversali come la gestione sostenibile delle risorse e l'adattamento ai cambiamenti climatici.

1.5 CYBERSECURITY E BLOCKCHAIN: PROTEZIONE E TRACCIABILITÀ DEI DATI NEI DIGITAL TWIN

Esame delle tecnologie a supporto della sicurezza, trasparenza e affidabilità dei sistemi digitali complessi

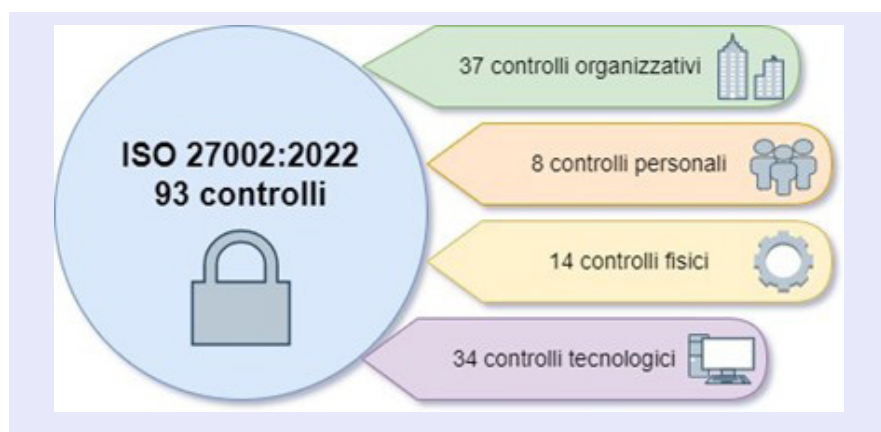
L'efficacia e l'affidabilità dei *digital twin* dipendono fortemente dalla capacità di garantire la sicurezza dei dati e la loro integrità. Qui entrano in gioco la cybersicurezza, essenziali per proteggere i flussi di informazioni e consentire un corretto e sicuro funzionamento.

I *digital twin*, essendo interconnessi con una moltitudine di dispositivi IoT e sistemi fisici, sono esposti a una vasta gamma di minacce informatiche. I dati raccolti possono diventare bersaglio di *hacker* o soggetti malintenzionati. Una compromissione potrebbe causare gravi problemi come, furto di dati sensibili, interruzioni operative che possono bloccare la gestione o il funzionamento di un sistema fisico, e la manipolazione dei dati, con conseguenze sul controllo e sull'ottimizzazione del sistema reale.

Per affrontare queste minacce e garantire il funzionamento sicuro dei *digital twin*, è essenziale adottare un approccio

strutturato, la cybersicurezza rappresenta quindi una priorità per i digital twin. Gli standard internazionali, come quelli definiti dall'ISO 2700042, offrono un quadro di riferimento per identificare, proteggere, rilevare, rispondere e ripristinare eventuali problemi legati alla sicurezza informatica. Questi standard sono fondamentali per gestire i rischi, implementare controlli appropriati e mantenere la fiducia nei sistemi basati sul *digital twin*.

Figura 3.
Struttura dei controlli
previsti dalla ISO
27002:2022. Fonte: Luca
Gugliermetti.



Tra le soluzioni tecnologiche che giocano un ruolo strategico in questo ambito, la *blockchain* emerge come un alleato prezioso per garantire trasparenza, tracciabilità e protezione dei dati all'interno dei sistemi di *digital twin*, la tecnologia *blockchain* si presenta come una soluzione complementare e innovativa, offrendo un livello aggiuntivo di protezione grazie alla sua trasparenza, tracciabilità e resistenza alle manomissioni.

La tecnologia *blockchain* è un meccanismo che si basa

42 La serie ISO/IEC 27000 *Information Security Management Systems (ISMS) Family of Standards* (anche nota, in Italia, come famiglia di norme SGSI, Sistemi di Gestione per la Sicurezza delle Informazioni) è uno standard di sicurezza informatica https://it.wikipedia.org/wiki/Standard_di_sicurezza_informatica redatto dalla ISO. Raggruppa un insieme di norme internazionali che si prefiggono di proteggere le informazioni che vengono mantenute ed elaborate da un'organizzazione. Attraverso questa famiglia di norme, le organizzazioni possono sviluppare ed implementare un proprio sistema per la gestione della sicurezza informatica per le informazioni finanziarie, la proprietà intellettuale ed i dati degli addetti, di clienti o di terzi. Le informazioni vengono protette da possibili attacchi informatici, errori umani, calamità naturali o da qualsiasi altra vulnerabilità che si può presentare durante l'utilizzo di un sistema informatico.

su tecnologie di database avanzato e che permette la condivisione trasparente di informazioni all'interno di una rete. La *blockchain* fa parte della più ampia famiglia delle tecnologie di *distributed ledger*, ossia sistemi che si basano su un registro di dati distribuito, che può essere letto e modificato da più nodi di una rete⁴³.

Per spiegare semplicemente il concetto di *blockchain* e di *distributed ledger* si può far riferimento alla figura 4 dove una serie di nodi (computer) scambiano dati tra di loro connessi su di una rete. Il dato è condiviso tra i diversi nodi e sincronizzato in modo che il database contenente le informazioni sia accessibile e verificabile su ogni nodo, indipendentemente dalla sua posizione dentro la rete (topologia).

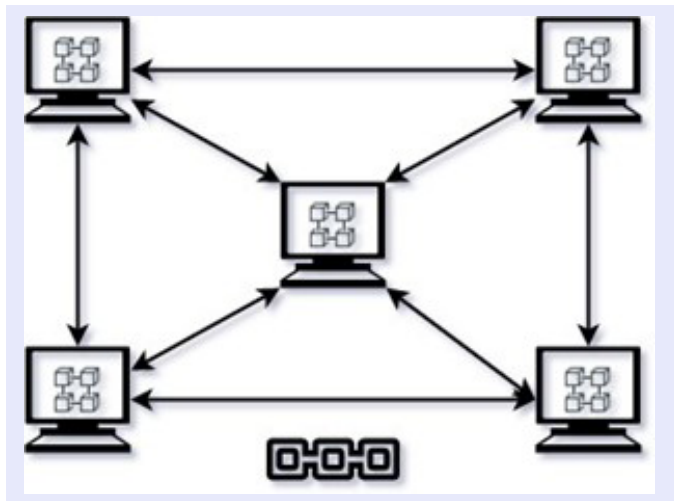


Figura 4.
Blockchain concettuale.
Fonte: Luca Guigliermetti.

Un *database blockchain* archivia i dati in blocchi collegati tra loro come in una catena.

I diversi anelli della catena sono coerenti cronologicamente e non è possibile eliminare o modificare la catena senza il consenso della rete in quanto, una volta scritti i dati in un blocco, non possono essere retroattivamente alterati senza che vengano modificati tutti i blocchi di dati successivi e ciò, per la natura del protocollo e dello schema di validazione, necessiterebbe

del consenso della maggioranza della rete⁴⁴. Grazie a questa struttura condivisa è possibile utilizzare la tecnologia *blockchain* per creare un libro mastro virtuale inalterabile per tracciare procedure come ordini, pagamenti, transazioni di dati e file e ogni altra tipologia di operazione che necessiti di verifiche temporali. La *blockchain*, per natura, è resistente all'inserimento di transazioni non autorizzate che creerebbero incoerenze tra i dati presenti sui vari nodi. Inoltre, i dati nella rete sono sincronizzati tramite algoritmi crittografici.

Ogni blocco di dati scambiato all'interno della rete contiene un *hash* crittografico del blocco precedente, un "timestamp" (marca temporale) e i dati delle transazioni, che vengono condivisi tra i membri della rete. I nodi di un sistema *blockchain* vengono anche detti "miner" in quanto sono incaricati di "minare" (calcolare) i blocchi necessari al funzionamento della rete aggiungendo le nuove transazioni e verificandone il contenuto. Inoltre, ogni nodo nel sistema decentralizzato ha una copia completa della *blockchain* e la qualità dei dati è mantenuta grazie a una massiva replicazione del *database*. Non esiste infatti nessuna copia ufficiale centralizzata del *database* e nessun utente è più credibile di altri, tutti sono allo stesso livello di credenziali.

Di seguito riportiamo in modo concettuale e semplificato il processo di funzionamento di una *blockchain*:

1. Registrare la transazione

Quando viene effettuata una transazione ad essa sono incluse alcune informazioni come:

- Le parti coinvolte nella transazione
- In cosa consiste la transazione
- Quando è avvenuta la transazione
- Dove è avvenuta la transazione

- Perché è avvenuta la transazione
- Quante risorse sono state scambiate
- I prerequisiti della transazione

2. Ottenere il consenso

Una volta registrata la transazione, la rete deve ottenere il consenso da parte dei partecipanti al fine di validare la transazione registrata. Le norme di consenso possono variare, ma di solito sono stabilite durante la creazione della rete.

3. Collegare i blocchi

Una volta raggiunto il consenso, le transazioni vengono scritte su blocchi come se fossero riportate su un libro mastro. Quindi al blocco creato viene associato un hash crittografico. L'hash ha il compito di collegare i blocchi tra loro. Se i contenuti del blocco vengono modificati, il valore dell'hash cambia, dando modo di rilevare la manomissione dei dati. Ogni blocco aggiunto va quindi ad incrementare la sicurezza della rete in quanto i blocchi successivi dipendono dal precedente.

4. Condividere il database

Collegati i blocchi, il *database* aggiornato viene condiviso nella rete aggiornandosi su tutti i partecipanti.

Il processo di creazione di un blocco e sincronizzazione è riportato per convenienza anche nella figura 5.



Figura 5. Processo di creazione di un blocco nella blockchain. Fonte: Luca Gugliermetti.

Nel contesto dei *digital twin*, la *blockchain* può essere integrata per affrontare alcune delle sfide più complesse come:

- Integrità dei dati: I dati scambiati tra il gemello fisico e quello digitale sono protetti da algoritmi crittografici, riducendo il rischio di alterazioni non autorizzate.
- Tracciabilità: Ogni operazione è registrata in modo permanente, consentendo di monitorare l'origine e il percorso delle informazioni.
- Autenticità: La *blockchain* garantisce che i dati siano autentici, eliminando la possibilità di falsificazioni o duplicazioni.
- Decentralizzazione: L'assenza di un database centralizzato riduce il rischio di un singolo punto di vulnerabilità, aumentando la resilienza del sistema.

L'adozione della *blockchain* nei *digital twin* non è solo una scelta tecnica, ma una necessità per garantire efficienza e sicurezza. La *blockchain* può migliorare i *digital twin*, assicurando che i dati provenienti siano affidabili e protetti. Alcuni esempi di ambiti dove può trovare applicazione e migliorare lo strumento del *digital twin* sono i seguenti:

- Monitoraggio dei trasporti: La *blockchain* può garantire la tracciabilità e l'integrità dei dati raccolti dai sensori sui flussi di traffico, permettendo una gestione ottimizzata e sicura.
- Energia e acqua: Sistemi intelligenti per la distribuzione di energia e la gestione dell'acqua possono beneficiare della trasparenza offerta dalla *blockchain*, riducendo sprechi e migliorando l'affidabilità.

- Gestione delle emergenze: In caso di incidenti o guasti, l'utilizzo combinato di *digital twin* e *blockchain* consente di risalire rapidamente alle cause, garantendo interventi più rapidi e precisi.

Con l'aumento dell'interconnessione tra dispositivi e l'integrazione di IoT, i requisiti di sicurezza informatica stanno diventando sempre più stringenti. La protezione dei dati non si limita alla tutela della riservatezza, ma include anche l'assicurazione che i sistemi operino in modo continuo e senza interruzioni. Per questo motivo, è fondamentale implementare misure di sicurezza che vadano in parallelo con la *blockchain*.

A seguire vengono illustrate alcune delle principali misure di sicurezza che è possibile adottare per garantire la protezione dei dati, la continuità operativa dei sistemi e la mitigazione dei rischi legati a potenziali vulnerabilità.

- Protezione dei sensori: Applicando algoritmi crittografici avanzati, come l'AES (*Advanced Encryption Standard*), per proteggere i dati raccolti.
- Comunicazione sicura: Utilizzando reti private virtuali (VPN) per trasferire dati tra dispositivi e *cloud*.
- Gestione degli accessi: Implementando meccanismi di autorizzazione che limitano l'accesso ai dati riservati.

Gli strumenti menzionati rappresentano solo una selezione delle molteplici soluzioni disponibili per affrontare le sfide legate alla sicurezza. Va sottolineato che l'elenco proposto non intende essere esaustivo, né fornisce una spiegazione dettagliata di ciascuno strumento. Ogni tecnologia o misura di sicurezza richiede infatti un'analisi approfondita per comprenderne appieno il funzionamento, i vantaggi e i limiti. In questo contesto, la nostra attenzione si concentra maggiormente sugli aspetti rilevanti per architetti e progettisti, piuttosto che su quelli strettamente tecnici

o informatici. Questo approccio consente di focalizzarsi sull'applicabilità pratica delle soluzioni e sulla loro integrazione nei processi progettuali e gestionali, lasciando gli approfondimenti tecnici agli specialisti del settore informatico.

Nonostante i chiari vantaggi, l'implementazione della *blockchain* nei *digital twin* presenta alcune sfide, come i tempi di sincronizzazione e la complessità nella gestione di grandi volumi di dati in tempo reale. Inoltre, con l'avvento dei computer quantistici, alcune tecniche di crittografia tradizionali potrebbero diventare vulnerabili. Per questo motivo, tecnologie emergenti come la crittografia quantistica rappresentano un passo avanti nella protezione dei dati.

La *cybersicurezza* e la *blockchain* sono ritenuti elementi imprescindibili per il successo dei *digital twin*, non solo per proteggere i dati, ma anche per favorire innovazione e fiducia nei sistemi digitali, rendendoli sicuri e affidabili.

2 | PARTE SECONDA **DIGITAL TWIN**

2.1 ORIGINEEDEFINIZIONI:EVOLUZIONEDEL CONCETTO DI GEMELLO DIGITALE

Analisi storica e teorica del concetto di digital twin, dai primi sviluppi industriali all'ambito urbano

Il *digital twin* ha visto le sue origini nell'industria aerospaziale e sta già rivoluzionando altri settori. Le principali applicazioni del gemello digitale in diversi settori sono molteplici, la progettazione, la pianificazione, l'ottimizzazione, la manutenzione, la sicurezza, il processo decisionale, l'accesso remoto e la formazione, questo strumento ha la capacità di collegare mondi fisici e virtuali in tempo reale, il che fornisce una misurazione realistica e olistica di scenari imprevisti e imprevedibili⁴⁵. Il concetto di gemello digitale è nato in relazione al *Product Lifecycle Management* (PLM) nel 2002 presso l'Università del Michigan da Michael Grieves. Il modello proposto ha tre componenti: spazio reale, spazio virtuale e meccanismo di collegamento per il flusso di dati/informazioni tra i due; è stato quindi denominato «Modello di spazi speculari»⁴⁶. Un concetto simile in cui i modelli software imitano la realtà dall'input di informazioni dal mondo fisico è stato immaginato da David Gelernter nel 1991 ed è stato chiamato “*Mirror Worlds*”⁴⁷. Nel 2003, Kary Främling ha anche proposto “un architettura basata su agenti in cui ogni prodotto ha una corrispondente “controparte virtuale” o agente ad esso associato come soluzione all'inefficienza del trasferimento delle informazioni di produzione via carta per il *Product Lifecycle Management*”⁴⁸. Nel 2006, il nome del modello concettuale proposto da Grieves è stato cambiato da “Modello di spazi speculari” a ‘Modello di *mirroring* delle informazioni’. Il modello pone l'accento sul meccanismo di

45 Kritzinger, W., 2018.

46 Grieves, M., 2005.

47 Gelernter, D., 1993.

48 Främling, K., et al. 2006.

collegamento tra due spazi che sono bidirezionali e hanno più spazi virtuali per un unico spazio reale in cui è possibile esplorare idee o progetti alternativi. A causa dei limiti delle tecnologie, come bassa potenza di calcolo, connettività ridotta o assente dei dispositivi, archiviazione e gestione dei dati, algoritmi obsoleti, macchine sottosviluppate, ecc., il gemello digitale non aveva applicazioni pratiche all'epoca. Il nome “*digital twin*” appare per la prima volta nella bozza della roadmap tecnologica della NASA nel 2010,⁴⁹ anche chiamato ‘*Virtual Digital Fleet Leader*’. La NASA aveva già utilizzato un concetto simile per il programma Apollo 13, in cui due veicoli spaziali identici sono stati costruiti per rispecchiarsi l'un l'altro⁵⁰. Ben presto, la US Air Force seguì le orme della NASA, così come General Electric, Siemens e Rolls Royce progettavano rotori, turbine e motori con l'ausilio del *digital twin* per la progettazione, la manutenzione e la previsione dei propri velivoli⁵¹. L'idea era di utilizzare il *digital twin* per simulare le proprietà fisiche e meccaniche dell'aeromobile per prevedere eventuali errori progettuali o crepe nella struttura, prolungandone così la vita utile. Tuegel e Gockel nei loro articoli definivano *digital twin* solo per l'aereo e lo chiamavano ‘*Airframe digital twin*’ o ADT, che era un modello computazionale per gestire l'aereo durante il suo intero ciclo di vita⁵².

È chiaro che il gemello digitale è diverso dai modelli informatici (CAD/CAE) e dalle simulazioni 3D. Anche se molte organizzazioni usano il termine ‘*digital twin*’ come sinonimo di modello 3D, un modello tridimensionale è solo una parte di *digital twin*⁵³, l'aspetto che contraddistingue fortemente un gemello digitale da un semplice modello

49 Shafto, M., 2010.

50 Boschert, S., 2016.

51 Tuegel, E., 2012.

52 Gockel, B. T., 2012.

53 LaGrange, E., 2019.

virtuale è la mancanza di dati in tempo reale la quale rende statici questi modelli o simulazioni, il che significa che non cambiano o non possono fare nuove previsioni a meno che non vengano fornite loro nuove informazioni⁵⁴. Il *digital twin* utilizza i dati per riflettere il mondo reale in un dato momento, una rappresentazione virtuale di un gemello reale interconnessa da un continuo scambio di dati, con un flusso bidirezionale che va dal fisico al digitale.

Di seguito alcune definizioni di *digital twin* che esprimo lo stesso concetto di base ma con diverse declinazioni. Per la NASA un gemello digitale completa la simulazione ad altissima fedeltà con la salute del veicolo integrata a bordo attraverso il sistema di gestione, cronologia di manutenzione e tutti i dati storici della flotta disponibili per rispecchiare la vita del suo volo gemellare e consentire livelli di sicurezza e affidabilità senza precedenti. Per IBM un gemello digitale è una rappresentazione virtuale di un oggetto fisico o di un sistema durante il suo ciclo di vita, utilizzando dati in tempo reale per consentire la comprensione, l'apprendimento e il ragionamento. Siemens⁵⁵, un gemello digitale è una rappresentazione virtuale di un prodotto o processo fisico, utilizzato per comprendere e prevedere le caratteristiche prestazionali della controparte fisica. Per Microsoft il gemello digitale è un modello virtuale di un processo, prodotto, asset di produzione o servizio. Connesso a sensori e *internet of things* (IoT), combinati con l'apprendimento automatico e l'analisi avanzata, possono essere utilizzati per visualizzare lo stato del dispositivo in tempo reale. Se combinato con le informazioni di progettazione 2D e 3D, un gemello digitale può visualizzare il mondo fisico e fornire un metodo per simulare risultati dal modello virtuale direttamente a quello reale. Michael Grieves lo definisce un insieme di costrutti

54 Maloney, A., 2019.

55 Siemens Aktiengesellschaft è una multinazionale tedesca, fondata nel 1847, leader nei settori delle tecnologie, della mobilità e dei servizi.

di informazioni virtuali che descrivono pienamente il potenziale di un prodotto fisico, reale, di un fabbricato, dal micro (livello atomico) alla macro (livello geometrico). Caratterizzato da tre parti, elemento fisico, reale, elemento virtuale e l'insieme di dati e informazioni che forniscono le connessioni tra il sistema fisico e virtuale⁵⁶.

Sebbene le caratteristiche delle sopra citate definizioni siano relativamente coerenti, gli scopi dichiarati dei gemelli digitali possono variare ampiamente. È probabile che ciò che viene percepito come lo scopo principale vari a seconda degli interessi del ricercatore o dell'impresa coinvolta, dall'aumento del ritorno sull'investimento, alla garanzia della sicurezza, all'efficientamento energetico, piuttosto che garantire alti standard di manutenzione.

Una cosa che lega la maggior parte delle definizioni di *digital twin* oltre ad essere una rappresentazione virtuale di un oggetto fisico è il trasferimento bidirezionale o la condivisione di dati tra la controparte fisica e quella digitale, compresi i dati quantitativi e qualitativi (relativi a materiale, produzione, processo, ecc.), dati storici, dati ambientali e, soprattutto, dati in tempo reale. Una definizione di digital twin che può essere applicata indipendentemente dal settore o dalla sua applicazione è la seguente:

“Un gemello digitale è un modello digitale/virtuale dinamico e auto-evolutivo o una simulazione di un soggetto o oggetto della vita reale (parte, macchina, processo, essere umano, ecc.) che rappresenta lo stato esatto del suo gemello fisico in un dato punto di tempo scambiando i dati in tempo reale e mantenendo i dati storici. Non è solo il gemello digitale che imita il suo gemello fisico, ma qualsiasi cambiamento nel gemello digitale viene imitato anche dal gemello fisico”⁵⁷. Ci deve essere una connessione tra il sistema fisico e quello

56 Buscher V. 2019.

57 Maulshree S. 2021.

digitale, ciò richiede uno scambio di dati bi-direzionale, nonché l'inclusione dell'essere umano, il quale assume un ruolo centrale nella triplice veste, progettista, occupante e fruitore. In altre parole, la maggior parte delle definizioni esistenti evitano di riconoscere il ruolo chiave dell'uomo e dell'intelligenza artificiale.

2.2 STATO DELL'ARTE

Rassegna critica delle applicazioni attuali e delle principali ricerche nel campo dei *digital twin* urbani

Il motivo principale per cui la tecnologia dei gemelli digitali è considerata la pietra angolare dell'Industria 4.0 è la sua pletora di vantaggi, di seguito quelli ritenuti determinanti in campo architettonico, urbanistico, edilizio.

- Concept e progettazione: le simulazioni consentono l'analisi di una serie di scenari, i cicli di progettazione e analisi si accorciano, rendendo l'intero processo di progettazione più semplice e veloce. Una volta implementato, il *digital twin* può essere utilizzato in diverse fasi del processo di progettazione, dalla concettualizzazione dell'idea al suo test⁵⁸. Oltre a ciò, crea anche un'opportunità in cui è possibile la personalizzazione di ciascun progetto in base alle esigenze degli utenti e ai dati di utilizzo⁵⁹. Poiché il gemello digitale è collegato al suo gemello fisico per tutta la sua vita, è possibile effettuare il confronto tra le prestazioni effettive e quelle previste, consentendo ai progettisti di riconsiderare le loro ipotesi effettuate in fase di progettazione⁶⁰.

58 Tao F. 2018.

59 Liu Q., Zhang, H. et al. 2019.

60 Tao F. 2018.

- Economicamente sostenibile: nella progettazione tradizionale, riprogettare un'opera è dispendioso in termini di tempo oltre che costoso a causa dell'uso di materiali fisici e manodopera, mentre utilizzando il digital twin possiamo simulare e testare progetti in un ambiente virtuale con diversi scenari, evitando di commettere errori progettuali e prolungare il ciclo di vita di un edificio o infrastruttura. Coinvolge principalmente risorse virtuali per la sua creazione, il costo complessivo della prototipazione viene ottimizzato nel tempo.
- Manutenzione predittiva e sicurezza: i metodi tradizionali di manutenzione si basano sull'esperienza euristica e sugli scenari peggiori piuttosto che sul progetto specifico, sulla configurazione strutturale e sull'utilizzo che ne fanno gli utenti, il che li rende reattivi anziché proattivi⁶¹. Tuttavia, il *digital twin* può prevedere difetti e danni nel progetto e quindi programmare in anticipo la manutenzione. Simulando diversi scenari il gemello digitale fornisce la migliore soluzione o strategia di manutenzione possibile che semplifica notevolmente la manutenzione del prodotto/sistema, rendendolo più sicuro. Inoltre, il ciclo di *feedback* costante tra digital twin e la sua controparte fisica può essere utilizzato per convalidare e ottimizzare continuamente il processo di manutenzione.

I *digital twins* possono inoltre essere classificati in diversi tipi in base a diversi criteri, ad esempio il livello di integrazione, le sue applicazioni, la gerarchia e il livello di maturità. Diversi autori hanno elaborato la propria nomenclatura dei tipi di

61 Glaessgen E. 2012.

digital twins sulla base di questi criteri: il tempo di creazione, Grieves, indica due tipi di *digital twin* in base a quando viene sviluppato durante il ciclo di vita del prodotto: prima della creazione del prototipo, ovvero nella fase di progettazione, o dopo che il prodotto è pronto, ovvero, in fase di produzione. Entrambi i tipi di *digital twin* sono integrati e gestiti per molteplici usi su una piattaforma chiamata *digital twin environment* (DTE). Sulla base del livello di integrazione dei gemelli digitali, Kritzinger et al.⁶² li ha suddivisi in tre sottocategorie (i) modello digitale, in questo tipo di *digital twin* i dati tra l'oggetto fisico e quello digitale vengono scambiati manualmente, per cui eventuali cambiamenti nello stato dell'oggetto fisico non si riflettono direttamente in quello digitale e viceversa. (ii) Ombra digitale: i dati dall'oggetto fisico fluiscono automaticamente al digitale, ma è ancora manuale il contrario. Di conseguenza, qualsiasi cambiamento nell'oggetto fisico può essere visto nella sua copia digitale, ma non viceversa. (iii) *Digital twin*, in questo tipo di *digital twin* c'è un flusso bidirezionale automatico di dati tra l'oggetto fisico e quello digitale. Pertanto, i cambiamenti nell'oggetto, fisico o digitale, portano direttamente a cambiamenti nell'altro.

I *digital twins* possono anche essere classificati in base alle loro applicazioni. Le due grandi applicazioni di un *digital twin* sono la predizione e l'interrogazione. Un gemello digitale predittivo, come suggerisce il nome, prevede il comportamento futuro e le prestazioni della sua controparte fisica; mentre un *digital twin* interrogativo viene utilizzato per interrogare lo stato attuale o passato della sua controparte fisica indipendentemente dalla sua posizione. Sulla base del livello di sofisticazione del gemello digitale, cioè la quantità e la qualità dei dati ottenuti dal gemello fisico e dal suo ambiente, i *digital twin* possono essere

62

Kritzinger, W., et al. 2018.

raggruppati in:

- *Digital twin* parziale: contiene un numero ridotto di punti dati, ad esempio pressione, temperatura, umidità, ecc., utile per determinare la connettività e la funzionalità di *digital twin*.
- *Clone digital twin*: contiene tutti i dati significativi e rilevanti del progetto/sistema che possono essere utilizzati per realizzare prototipi e categorizzare le fasi di sviluppo e realizzazione.
- *Augmented digital twin*: utilizza i dati dell'asset insieme ai suoi dati storici e allo stesso tempo deriva e correla i dati utili utilizzando algoritmi e analisi.

La ricerca ha inoltre sviluppato una differenziazione in base al progressivo sviluppo di automazioni e intelligenza artificiale dei gemelli digitali applicati all'uso del patrimonio esistente, differenziandoli in cinque livelli. Il primo livello è costituito da un *digital twin* molto simile a un modello concettuale, risulta collegato al sistema del mondo reale ma privo di intelligenza e capacità di apprendimento. Descrive un modello di una risorsa che ha dettagli ingegneristici incorporati e coordinati al suo interno e che consente alle imprese di costruzioni di eseguire attività di progettazione, coordinamento e manutenzione in modo più semplice ed efficace ottimizzando costi e tempi. Questa è un'interpretazione semplice e base di un gemello digitale che considera solo i dati statici di un singolo processo, area o struttura. Il compito di controllare e gestire gli aspetti del *digital twin* spetta all'utente.

Passando a un gemello digitale di secondo livello si acquisisce capacità di *feedback* e controllo. Il gemello raccoglie dati del manufatto, in che modo questo viene utilizzato e monitora

come reagisce, fornendo dati per realizzare scenari che potrebbero apportare miglioramenti alla risorsa fisica o prevedere cosa accadrà, in modo che, rischi, problemi e sprechi possano essere mitigati in anticipo. Questo consentirebbe alla figura che si occupa di gestire il modello, di costruire uno scenario di previsione e prevenzione ben dettagliato, progettando soluzioni ai bisogni effettivi piuttosto che ai bisogni percepiti, estendendo potenzialmente la vita del bene. Anche in questo caso la figura dell'utente è chiamata a decidere sulla base dei dati forniti dal gemello in quanto privo di funzioni che gli consentono di acquisire esperienze pregresse ed imparare da loro.

Un modello di livello tre può aggiungere dati e ipotesi progettuali in base ai requisiti prioritari programmati dall'utente, questo in tempo reale, passando da uno stato di fatto a uno stato di progetto, evidenziando i cambiamenti, positivi o negativi. Lo scopo è quello di inserire soluzioni progettuali all'interno del gemello virtuale per poter esaminare e analizzare in che modo si integrano in un determinato contesto, come gli usufruttori, e quindi gli esseri umani che vivono determinati spazi e territori si relazionano con esso, in modo da valutarne il grado di realizzabilità considerando il maggior numero di aspetti prima di intraprendere processi progettuali difficilmente reversibili.

Questi tre livelli sono la base per iniziare a costruire un modello più complesso e realistico, iniziando ad aggiungere set di dati collegati con enti pubblici, imprese e associazioni che in qualche modo influenzano e condizionano i progetti di un edificio o territorio.

Studiando un modello digitale di livello quattro, dando per assodato le caratteristiche viste nei precedenti livelli, viene

implementata una capacità di apprendimento dall'ambiente costruito, grazie al contributo di più set di dati provenienti da diverse fonti. Il modello è in grado di utilizzare tale apprendimento ai fini di un processo decisionale autonomo all'interno di un determinato dominio, capace di mutare le proprie decisioni in base ai dati raccolti. Per essere più chiari facciamo un banale esempio di malfunzionamento di un impianto di riscaldamento, il gemello digitale non solo notifica l'avvenuto guasto, ma detta delle precise istruzioni su come e in che modo intervenire, memorizzando tale processo e riadattandolo ai futuri interventi. In altre parole, il gemello impara dai *feedback* e dalle esperienze per acquisire una sua capacità decisionale.

Dal livello quattro al livello cinque si evidenzia una completa assenza dell'utente. Il gemello sviluppa un'autonomia decisionali dettata dalla capacità di ragionare autonomamente, si assume la responsabilità dei compiti che spetterebbero ad un operatore umano, gestione, manutenzione, sicurezza, sostenibilità e perfezionamento delle risorse di un edificio o territorio. Il segno distintivo che più di altri caratterizza il livello cinque è l'incorporazione di gemelli di livello inferiore, ad esempio, ragionando su scala urbana, in una *smart city* dove abbiamo numerosi sistemi indipendenti che lavorano in parallelo per elaborare dati e *feedback*, possono essere interconnessi a un unico gemello digitale di livello cinque.

Questo gemello ha quindi la capacità di ricevere più dati da fonti alternative, le quali lo collocano in un contesto più ampio, iniziando a considerarlo come un sistema in tempo reale. Ciò potrebbe inoltre includere le persone e il loro comportamento, come queste si relazionano con il territorio, le interazioni che creano con edifici e infrastrutture, sviluppando continui scambi di informazioni

con i diretti interessati.

Il vero potere del gemello digitale, tuttavia, deriva dalle sue capacità di apprendimento automatico e dalla possibilità di spostare un edificio o una risorsa operativa in un insieme di risorse connesse e quindi combinare set di dati tra pianificazione, sicurezza, costruzione e manutenzione per fornire una ricca rappresentazione virtuale dell'ambiente fisico. È qui che un modello a livello di città potrebbe davvero iniziare a offrire un valore aggiunto per comprendere le interazioni sfumate tra parti di una città ed essere utilizzato per offrire soluzioni progettuali ottimizzate. Il concetto di *digital twin* pone al centro l'uomo, analizzando e raccogliendo dati su come esso vive gli spazi, entra nell'essenza degli spazi, fornisce in tempo reale una chiara situazione uomo, edificio, infrastrutture e territorio, anticipando in una certa misura decisioni future.

3 | PARTE TERZA

APPROCCIO METODOLOGICO ALLA VALUTAZIONE DEI DIGITAL TWIN URBANI

3.1 METRICHE DI VALUTAZIONE DEL DIGITAL TWIN

Definizione dei criteri oggettivi per la valutazione dell'efficacia, sostenibilità e interoperabilità dei modelli digitali

Di seguito analizzeremo le metriche utilizzate per indagare e capire come funzionano alcuni dei gemelli digitali esistenti. L'obiettivo delle varie metriche di definizione dei *digital twin* che seguono, originate da vari studi e quindi provenienti da fonti eterogenee, è di fornire un linguaggio comune che sia comprensibile per la comunità degli addetti ai lavori e che permetta loro di comunicare in maniera sintetica una valutazione sulle varie caratteristiche, livelli di sviluppo e capacità del *digital twin* esaminato. La tipologia di *digital twin* su cui sono basati tali studi è quella del *Construction digital twin*. Si parla quindi di industria delle costruzioni e di ambiente costruito, il che rende tali metriche compatibili e coerenti con l'oggetto di questa tesi, il *digital twin* a scala urbana, che tuttavia non è preso direttamente in considerazione. La scala cui è fatto riferimento è infatti quella dell'edificio. Esistono altre metriche descritte in letteratura, ma nell'ambito di questo lavoro si sono selezionate le più usate e che potessero essere compatibili, o quanto meno, che non perdessero significato qualora prefigurate in una loro applicazione alla scala superiore a quella dell'edificio. La ricerca e le applicazioni sui *digital twin* urbani non hanno ancora generato metriche dedicate, purtuttavia dalla lettura delle classificazioni di seguito proposte sarà possibile evincere che esse si basano su concetti applicabili anche alle scale più ampie. Per queste ultime, saranno necessari studi specifici che possano calibrare le varie classificazioni mirando in maniera più precisa alla dimensione della città come oggetto del *digital twin*.

Le metriche prese in considerazioni sono le seguenti:

- Dominio
- Livello di integrazione
- Grado di automazione
- Livelli di maturità
- Livelli di sviluppo (o Livelli di complessità)
- Livelli chiave
- Acquisizione dati
- Attuazione
- Simulazione
- Esperienza utente
- Intelligenza artificiale
- Stakeholders coinvolti

Dominio

Con il termine dominio si intende il motivo specifico per cui viene realizzato il *digital twin*, ovvero l'area di applicazione o l'obiettivo principale che guida la creazione del modello digitale. Il dominio definisce il contesto operativo e le finalità del *digital twin*.

Livello di integrazione

I livelli di integrazione sono stati teorizzati da “Kritzinger et al. 2018”⁶³ a proposito del *digital twin* nel settore manifatturiero, ma sono poi stati adottati anche nel campo *Architecture, Engineering, and Construction*. (AEC). I livelli di integrazione sono in ordine crescente: i digital model digitali sono quelli meno integrati mentre i *digital twin* rappresentano il livello

63 Kritzinger, W., et al. 2018.

di integrazione maggiore. Si mantengono le definizioni in lingua inglese poiché oramai sono condivise ed utilizzate ampiamente anche in Italia.

- *Digital model*: nella sua versione di base, il modello non integra alcun flusso automatico di informazioni dal mondo fisico a quello virtuale. Ciò significa che l'ambiente virtuale e quello fisico non sono collegati automaticamente; quindi, ogni cambiamento deve essere riflesso attraverso una modifica manuale.

- *Digital shadow*: integra il flusso automatico unidirezionale di informazioni tra ambiente fisico e ambiente virtuale, ma non viceversa. Si tratta di un sistema in cui i sensori misurano le informazioni generate dal modello fisico e trasferiscono i segnali al modello virtuale. Indipendentemente dal fatto che il flusso di informazioni avvenga in modalità polling o interrupt, purché sia automatico, questo livello di integrazione può essere identificato come *digital shadow*.

- *Digital twin*: un gemello completamente integrato, in cui l'ambiente virtuale e quello fisico interagiscono con un flusso bidirezionale. Un gemello completamente integrato in cui il mondo virtuale e quello fisico interagiscono in modo bidirezionale, in cui le informazioni passano automaticamente da e verso entrambi gli ambienti. In questo caso, le informazioni provenienti dal mondo virtuale saranno utili per apportare modifiche al modello fisico o per istruire gli attuatori a eseguire un'operazione. Al contrario, i dati provenienti dal gemello fisico possono influenzare automaticamente il gemello virtuale in modo tale che quest'ultimo rappresenti accuratamente lo stato attuale e l'evoluzione della sua controparte fisica.

Grado di automazione

Recentemente, c'è una convergenza di diversi autori riguardo a una visione che porta ad un *city digital twin* (CDT)

incrementale. Ciò è congruente con la pratica di settore che finisce per implementare processi di digitalizzazione in fasi. Pertanto, è possibile convalidare un concetto di *city digital twin* che cresce nel tempo. Il grado di automazione il quale può essere impostato su quattro spettri, come segue: (i) *input*, (ii) *output*, (iii) sottoprogrammi e regole di attuazione, (iv) accesso e sicurezza.

- *Input* - (a) manuale, (b) semi-automatico, e (c) automatico.
- *Output* - (a) manuale, completamente personalizzato, (b) semi-automatico, mista - (c) automatico, completamente personalizzato.
- Sottoprogrammi e regole di attuazione: (a) manuale, completamente personalizzato, (b) semi-automatico, misto e (c) automatico, completamente predefinito.
- Accesso e sicurezza: (a) accesso completo e (b) limitato.

Livelli di maturità

Il modello proposto si basa principalmente sul lavoro di Fjeld⁶⁴, la cui matrice concettuale, essendo ampia, copre tutti i diversi approcci applicati dagli altri autori considerati. Trattandosi di un modello incrementale, i livelli più avanzati integrano gli elementi dei livelli più bassi. La classificazione proposta da Mêda, P. Calveti, D., et al.⁶⁵ ha il merito di tenere assieme in una matrice i diversi fattori descrittivi e che influiscono sulla maturità di un *digital twin*. Ogni livello viene dettagliato come segue sulla base della ricerca e sulla documentazione a disposizione:

Static twin: Il gemello statico rappresenta il primo approccio della maggior parte degli attori dell'industria delle

64 Fjeld, T. M. B. 2020.

65 Mêda P. et al., 2021.

costruzioni alla digitalizzazione. Essa avviene attraverso il BIM, concentrandosi principalmente sulla modellazione 3D. A questo livello, non c'è integrazione tra l'ambiente fisico e quello virtuale. Questo *digital twin* statico è una rappresentazione grafica dal fisico al virtuale. In questa fase, è essenziale concentrarsi maggiormente sulle informazioni, cercando dati *machine-readable* ai fini dell'interoperabilità, arricchendo i dettagli delle informazioni per passare al livello successivo. I risultati attesi sono rappresentazioni 3D degli asset fisici, dove il software utilizzato per eseguire il modello può fornire formati IFC da utilizzare da altri tipi di *software*. Ad esempio, un'azienda dispone di un modello 3D di una singola casa in Autodesk Revit ed è in grado di esportarlo in formato IFC. Tuttavia, il modello conterrà informazioni geometriche di una parete, ma non informazioni alfanumeriche sul tipo di parete, ad esempio muratura, calcestruzzo o muro a secco. A questo livello i dati si riferiscono solo alla progettazione dell'edificio.

Detailed twin: nel gemello dettagliato l'applicazione del BIM si arricchisce puntando a un approccio di gestione delle informazioni, appunto, più dettagliato. Avviene una integrazione parzialmente unidirezionale dall'ambiente fisico a quello virtuale basata sull'inserimento dei dati delle specifiche dei prodotti del progetto. A questo livello è possibile estrarre una *bill of quantities* (BoQ), ovvero il computo metrico estimativo, dal quale è possibile definire il costo di costruzione di un'opera edilizia, in maniera completa o parziale sulla base delle informazioni dettagliate degli asset. Inoltre, è possibile eseguire metodi di valutazione della sostenibilità degli edifici (ad esempio, LEED, DGNB o BREEAM⁶⁶). Inoltre, con questi dati dettagliati, è possibile

⁶⁶ LEED, DGNB e BREEAM: i principali standard di certificazione per edifici sostenibili** Nel contesto della sostenibilità edilizia, le certificazioni **LEED, DGNB e BREEAM** rappresentano tre tra i più importanti standard a livello internazionale per la valutazione delle prestazioni ambientali, energetiche e di qualità degli edifici. Questi sistemi forniscono linee guida e criteri per la progettazione, la costruzione e la gestione di edifici più efficienti e un basso

stimare le emissioni di CO₂ del progetto per il suo intero ciclo di vita. A questo livello i dati sono relativi non solo alla geometria ma anche ai prodotti che verranno usati per costruire l'edificio.

As-built twin: nel livello dell *as-built*⁶⁷ twin esiste ancora la sola integrazione unidirezionale dall'ambiente fisico a quello virtuale. In questo caso, le informazioni *as-built* basate sulla fase di costruzione vengono adattate ai modelli. Convenzionalmente, tali informazioni vengono ratificate o corrette manualmente. Tutte le informazioni relative ai prodotti e ai processi della fase di costruzione devono essere catalogate. Nella maggior parte dei casi, queste informazioni sono parzialmente archiviate in formato fisico (carta) e digitalizzate (file contenenti, ad esempio, file pdf). Anche in questo caso, utilizzando i dati digitali, sarà possibile rivedere il DDT e creare un registro digitale dell'edificio (DBL). Il risultato principale a questo livello è un database di informazioni aggiornato sul progetto. La redazione di “*as-built*” è un'attività regolare che deve essere eseguita una volta terminata la fase di costruzione, per poi consentire le successive fasi d'uso, quindi la gestione e manutenzione del manufatto. A questo livello, ad esempio, è possibile misurare le emissioni prodotte *cradle to handover* e stimare le emissioni previste per le fasi successive, di uso e di fine del ciclo di vita.

Sensored twin: il gemello “sensorizzato” permette di aggiungere al gemello virtuale popolato di dati digitali relativi agli elementi che compongono l'edificio (specifiche e “*as-built*”) i sistemi IoT. Questo consente di monitorare edifici e

impatto ambientale. - **LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) è un sistema di certificazione sviluppato dal **US Green Building Council (USGBC)***, ampiamente utilizzato a livello globale. Valutare edifici nuovi ed esistenti sulla base di criteri come il risparmio energetico, l'efficienza idrica, la riduzione delle emissioni di CO₂ e la qualità degli ambienti interni. LEED assegna punteggi su una scala che va da **Certified** fino a **Platinum***, il livello più alto di certificazione.

⁶⁷ Grafici che registrano la configurazione finale di un progetto e le sue eventuali, successive modificazioni.

luoghi, abilitando la dimensione dello *smart building* (e *smart city*). Nei primi tre livelli, la raccolta e l'elaborazione dei dati è affidata a persone che gestiscono i sistemi e forniscono informazioni. Grazie ai sensori e ai sistemi IoT, diventa possibile un'integrazione bidirezionale più autonoma dall'ambiente fisico a quello virtuale. L'implementazione dell'IoT consente di ottenere un gran numero di dati. Maggiore è il numero di elementi rilevati (ad esempio, lavoratori, utenti, prodotti, attrezzature e condizioni ambientali), maggiore è la quantità di informazioni e le possibilità di analisi. In questo livello, i dati sono relativi all'edificio (beni), alle persone, alle prestazioni del progetto e alle condizioni ambientali. Per i livelli successivi, i dati raccolti sono sempre della stessa dimensione. Tuttavia, in ogni livello aumenta l'elaborazione e l'autonomia del gemello.

Responsive twin: nel gemello "reattivo" i dispositivi IoT raccolgono dati dall'ambiente fisico in modo autonomo ed in tempo quasi reale. È possibile una limitata integrazione bidirezionale dall'ambiente fisico a quello virtuale: a seguito di input provenienti dall'ambiente virtuale, diventa possibile operare azioni sul gemello fisico sulla base di regole prestabilite o per iniziativa di un operatore. L'interazione tra gemello fisico e gemello virtuale consente, ad esempio, di calibrare la temperatura o il consumo di elettricità, di gestire l'apertura e la chiusura di porte e finestre e l'accensione o lo spegnimento di apparecchiature e sistemi. Questa fase è il punto di partenza per lo sviluppo di regole e algoritmi per un gemello più avanzato e più intelligente.

Adaptive twin: il gemello "adattivo" si avvantaggia di una quantità di dati più significativa e le operazioni di analisi o apprendimento delle azioni e delle operazioni svolte nella fase precedente è condotta attraverso algoritmi più sicuri e precisi, nonché regole per l'autonomia. In questo contesto, è possibile sviluppare un sistema in grado di simulare scenari

e un'elevata capacità di automazione dei processi. Tuttavia, la valutazione umana è ancora necessaria per verificare il processo decisionale della macchina, soprattutto per calibrare il sistema. È quindi possibile un'integrazione semi-bidirezionale dall'ambiente fisico a quello virtuale.

Intelligent twin: nel gemello “intelligente”, infine, l'apprendimento incrementale rende possibile lo sviluppo di una piattaforma gemella del tutto autonoma, dove avviene un'integrazione completamente bidirezionale dall'ambiente fisico a quello virtuale. Questo sviluppo evolutivo genera e testa algoritmi affidabili per evitare errori e distorsioni, aumentando la sicurezza e l'accuratezza. In quanto il *digital twin* autoapprendente e autoregolante, è in grado di svolgere azioni correttive e preventive per aumentare le prestazioni degli edifici. L'interazione umana non è richiesta, anche se di tanto in tanto è necessario eseguire un controllo di conformità per verificare le prestazioni del sistema.

Livelli di sviluppo o livelli di complessità

I livelli di sviluppo (o complessità) danno conto e si focalizzano sul livello delle capacità espresse dal digital twin; quindi, su quali sono le operazioni che può svolgere e le informazioni che è in grado di fornire.

I 5 livelli di sviluppo di un *digital twin*, partendo dal più semplice fino al più complesso, sono:

- Descrittivo: si tratta di rappresentazioni virtuali che possono essere modificate e analizzate con la modellazione 3D del software BIM (*Building Information Modeling*) o 2D con il GIS (*Geographic Information System*).
- Informativo: converte i dati in informazioni per generare conoscenza e trarre indicazioni; il *digital twin* usa dati in tempo reale per effettuare predizioni su stati futuri; il *digital twin* ricava i dati fisici e operativi dai sensori IoT e aggiorna la replica virtuale in tempo reale

per farla corrispondere alla controparte del mondo reale;

- **Predittivo:** combina i dati in tempo reale utilizzati per creare *digital twin* informativi con ulteriori dati contestuali e analisi predittive. Ciò consente di creare modelli e simulazioni basate sul presente, in grado di identificare o prevedere problemi di prestazioni future;
- **Comprensivo:** combina i primi tre livelli; simula situazioni future e considera scenari “*what-if*”. Le analisi prescrittive utilizzate per questo tipo di *digital twin* possono fornire raccomandazioni sulle azioni da intraprendere successivamente (ad esempio, manutenzione, progettazione del prodotto).
- **Autonomo e connesso:** utilizza l'intelligenza artificiale e l'apprendimento automatico (AI/ML) per ridurre la dipendenza dall'intervento umano, per prendere decisioni, per rispondere a condizioni ambientali mutevoli o improvvise sulla base delle risposte passate e delle prestazioni della controparte fisica.

Livelli chiave

Il *framework* si muove attraverso cinque livelli concettuali, iniziando con un modello digitale che rappresenta in maniera più o meno fedele la realtà fisica dell'ambiente, per poi evolversi ai livelli superiori dove entrano in gioco la capacità di apprendimento automatico, la generalità del dominio e il potenziale di scalabilità, particolarmente rilevante nel caso di *digital twin* a scala urbana.

L'obiettivo di livelli chiave è valutare le capacità dei *digital twins* esprimendosi attraverso un linguaggio descrittivo comune agli operatori del settore sulla base della ricerca e sulla documentazione a disposizione, ogni livello chiave è suddiviso a sua volta in 5 livelli, come riportato nella seguente tabella.

Acquisizione di dati

Livelli chiave

	Livello 1	Livello 2	Livello 3	Livello 4	Livello 5
Fedeltà	Il digital twin ha bassa accuratezza e può essere considerato solo un modello concettuale.	Il digital twin ha un range medio-basso di accuratezza e può essere usato per estrarre misurazioni.	Il digital twin ha una media accuratezza e può essere usato come rappresentazione affidabile dell'ambiente fisico.	Il digital twin può produrre misurazioni precise.	Il digital twin ha un elevato livello di accuratezza e può essere usato in caso di life safety e di decisioni operative cruciali.
Apprendimento	Il digital twin non ha componenti dedicate all'apprendimento.	Il digital twin viene programmato utilizzando un lungo elenco di comandi.	Il digital twin viene addestrato con un approccio di apprendimento supervisionato (utilizzando dati etichettati in grado di fornire feedback e previsioni) Il DT viene addestrato con un approccio di apprendimento supervisionato (utilizzando dati etichettati in grado di fornire feedback e previsioni)	Il digital twin viene addestrato utilizzando un apprendimento non supervisionato (il gemello non utilizza etichette e cerca di dare un senso all'ambiente da solo)	Il digital twin utilizza il reinforcement learning interagendo con l'ambiente. Il DT impara dai feedback e dalle esperienze passate per trovare il modo ottimale di migliorare le prestazioni
Intelligenza	Il digital twin non ha nessuna intelligenza	Il digital twin ha intelligenza reattiva (il gemello risponde solo agli stimoli, non può utilizzare le esperienze acquisite in precedenza per informare le proprie azioni attuali)	Il digital twin utilizza l'apprendimento per migliorare la propria risposta ed è anche capace di apprendere dai dati storici per prendere decisioni	Il digital twin comprende le esigenze di altri sistemi intelligenti	Il digital twin è autoconsapevole, con un'intelligenza e una consapevolezza di sé simili a quelle umane
Autonomia	Completa assenza di autonomia, con l'utente che controlla tutti gli aspetti del digital twin.	Autonomia parziale, il digital twin ha la capacità di avvisare e controllare il sistema in alcuni modi.	Livello assistito dall'utente, in cui sono previsti avvisi e notifiche dell'attività del sistema, ma l'autonomia è limitata.	Alta autonomia, il digital twin è in grado di eseguire compiti critici e di monitorare le condizioni con un intervento umano minimo o nullo.	Può operare in sicurezza in totale assenza di intervento umano.

Indica dove e in che modo vengono reperiti i dati.

Dividendoli in:

- Dinamici: informazioni che variano con una frequenza alta, che si aggiornano in archi temporali di ore, giorni e settimane.
- Socioeconomici: aspetti di una data società considerati nell'insieme dei rapporti o delle interrelazioni sociali ed economiche, soggetti al cambiamento in archi temporali di circa dieci anni.
- Statici: dati che non variano nel tempo, o che variano in un intervallo di tempo non inferiore a circa 40 anni.

Attuazione

Parametro che indica se in qualche modo i dati recepiti ed elaborati tornano nell'ambiente reale, attraverso un'attuazione, in forma di provvedimento, delibera e/o decisione.

Simulazione

Indica se è presente la capacità di simulare scenari futuri.

Esperienza utente

Con questo indicatore si esplicita in che modo viene fruita l'interazione tra utente e il modello '*digital twin*'. Identificando una diffusione privata (priva di informazioni in nostro possesso), pubblica (indicando il tipo di piattaforma).

Intelligenza artificiale

Indica la presenza e l'uso dell'intelligenza artificiale. Al fine di indagare la capacità decisionale, quanto viene deciso dall'uomo e quanto dall'algoritmo a monte programmato. Questo indicatore sarà presente, nelle tabelle dei casi studio, solo quando viene utilizzata l'intelligenza artificiale.

Stakeholders coinvolti

Individui, gruppi o organizzazioni direttamente coinvolte e che hanno un ruolo attivo nella realizzazione del gemello digitale, interessi economici e/o sociali.

4 | PARTE QUARTA **CASI STUDIO**

Nei capitoli precedenti abbiamo definito i criteri e le modalità di catalogazione dei casi studio. Di seguito, ci concentreremo sull'analisi di alcune applicazioni rappresentative del concetto di *digital twin* applicato alle città. Prima, però, è fondamentale comprendere le motivazioni che stanno alla base dell'adozione di questo strumento e le necessità che ne hanno guidato lo sviluppo.

Le città moderne possono essere considerate veri e propri sistemi complessi. Questi sistemi sono influenzati da una moltitudine di dinamiche, come quelle economiche, ecologiche e demografiche, che generano sfide sempre più articolate. Negli ultimi anni, per affrontare tali sfide, si è fatto sempre più ricorso a tecnologie innovative e strategie avanzate, spesso riassunte sotto il termine di *smart city*. Tuttavia, è importante notare che non esiste una definizione universalmente accettata di *smart city*. Alcuni studi si concentrano sul rapporto tra istruzione, servizi urbani e attrattività per i cittadini, altri sottolineano il ruolo della “classe creativa” o l'importanza delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT) per migliorare la qualità della vita e promuoverne uno sviluppo sostenibile⁶⁸. In questo contesto, la sostenibilità riveste un ruolo centrale. Essa non riguarda solo l'efficienza economica, ma include anche la gestione responsabile delle risorse, la promozione dell'inclusione sociale e il rispetto degli equilibri ambientali. Le città sostenibili mirano a creare ambienti più accessibili, promuovendo, ad esempio, reti di mobilità efficienti, economia circolare e spazi che favoriscono la partecipazione di tutti i cittadini⁶⁹.

Tuttavia, nonostante i progressi, rimangono criticità. Ad esempio, molte città, soprattutto quelle di piccole e medie dimensioni, si trovano a dipendere fortemente da grandi

68 Batty, M., 2018.

69 Nazioni Unite, 2018.

aziende tecnologiche per la raccolta, l'analisi e la gestione dei big data. Questa dipendenza genera non solo costi significativi, ma anche una perdita di sovranità sui dati urbani e una maggiore disuguaglianza sociale. È evidente che, per costruire città veramente intelligenti e sostenibili, non basta affidarsi alla tecnologia: occorre mettere al centro le persone e i loro bisogni, promuovendo una pianificazione partecipativa e trasparente.

Attraverso i capitoli che seguiranno, analizzeremo come il *digital twin* urbano possa essere applicato in vari contesti europei, esplorando i suoi benefici e le sue implicazioni, con l'obiettivo di comprendere come queste soluzioni possano migliorare la qualità della vita e rispondere alle sfide del futuro urbano.

4.1 AMSTERDAM – QUARTIERE ZUIDOOST: PARTECIPAZIONE E PIANIFICAZIONE DIGITALE

Il distretto di Zuidoost, situato nella periferia sud-orientale di Amsterdam, rappresenta un contesto urbano di grande complessità, sia per le sue caratteristiche fisiche sia per le dinamiche sociali e politiche che lo contraddistinguono. Nato principalmente come area di espansione residenziale negli anni '60 e '70, Zuidoost si è progressivamente sviluppato seguendo i principi dell'urbanistica modernista, con ampi spazi aperti, edifici alti e distanti tra loro, e una netta separazione tra le funzioni abitative, lavorative e ricreative. Tuttavia, questo modello ha mostrato nel tempo significative criticità, contribuendo a plasmare un distretto che oggi si trova ad affrontare diverse problematiche.

L'urbanistica di Zuidoost è caratterizzata da grandi blocchi abitativi circondati da vaste aree verdi, spesso sottoutilizzate o mal gestite. Questo layout, pur pensato per promuovere una qualità della vita elevata, ha finito per creare una percezione di isolamento e frammentazione. La scarsità di

spazi pubblici vivi e ben collegati è uno degli elementi che contribuiscono a rendere il distretto meno attraente, sia per i residenti sia per i visitatori. Inoltre, la presenza di grandi infrastrutture, come l'Arena di Amsterdam e il vicino hub ferroviario di Bijlmer Arena, enfatizza il carattere di area di transito più che di destinazione.

Il distretto ha visto un significativo sviluppo immobiliare, con nuovi complessi residenziali e commerciali progettati per attrarre una popolazione più diversificata e abbiente.

Zuidoost rappresenta un esempio di applicazione delle tecnologie avanzate di *digital twin* in un contesto urbano. Questo progetto si inserisce nell'ambito delle iniziative della capitale olandese per consolidare il ruolo della città come *smart city*, valorizzando l'innovazione tecnologica per migliorare la qualità della vita e ottimizzare la gestione delle risorse. Il *digital twin* di Zuidoost non è soltanto una replica digitale del distretto, ma un ecosistema integrato di dati e modelli che interagiscono in tempo reale con il tessuto fisico della città.

Il cuore del *digital twin* di Zuidoost risiede in un modello tridimensionale ad alta precisione, ottenuto attraverso rilievi effettuati con tecnologie avanzate come laser scanner, droni e immagini satellitari. Il modello è arricchito da dati geospaziali e informazioni provenienti dai sistemi IoT, che consentono di monitorare vari parametri, tra cui traffico, consumo energetico, qualità dell'aria e dinamiche sociali.

Il formato di rappresentazione adottato è il CityGML, uno standard internazionale che permette di strutturare e organizzare i dati urbani in livelli di dettaglio (Levels of Detail, LoD), dai semplici contorni degli edifici (LoD1) alle rappresentazioni altamente dettagliate che includono facciate, interni e componenti architettonici (LoD4). Questo approccio consente di rappresentare gli edifici e le infrastrutture con un alto grado di precisione, includendo non solo le caratteristiche esterne, ma anche informazioni

funzionali e strutturali. I dati raccolti vengono integrati in una piattaforma interoperabile basata su tecnologie cloud, che garantisce un accesso sicuro e scalabile agli utenti.

Un elemento distintivo del modello è la capacità di aggiornarsi dinamicamente attraverso flussi di dati in tempo reale. L'integrazione con sensori distribuiti nel distretto consente di acquisire informazioni aggiornate, che vengono elaborate da algoritmi di machine learning per generare analisi predittive e supportare decisioni informate. Ad esempio, è possibile simulare scenari di sviluppo urbanistico o prevedere l'impatto di eventi climatici estremi sulle infrastrutture.

Il *digital twin* di Zuidoost è progettato per essere accessibile non solo agli esperti di pianificazione urbana, ma anche ai cittadini. Attraverso un portale web intuitivo, basato su tecnologie come WebGL per la visualizzazione interattiva, i residenti possono esplorare il modello tridimensionale del loro quartiere, visualizzando progetti in corso e modifiche previste nel piano regolatore.

Questo livello di trasparenza promuove una partecipazione attiva e consapevole della comunità. I cittadini possono esprimere opinioni e suggerimenti tramite sondaggi e strumenti di *feedback* integrati nella piattaforma, contribuendo alla definizione delle strategie di sviluppo urbano. Questo approccio non solo riduce le controversie, ma stimola un senso di appartenenza e responsabilità nei confronti del territorio.

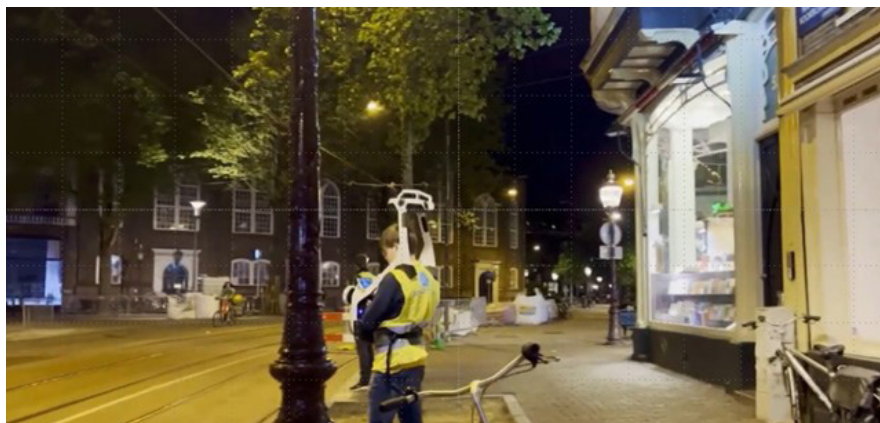
**Figura 6.**

Piattaforma web open data per la visualizzazione del digital twin del quartiere Zuidoost di Amsterdam.

Il rilievo del distretto di Zuidoost è stato realizzato combinando diverse tecnologie avanzate per garantire un'elevata accuratezza. Le principali tecniche includono:

- Laser scanner terrestre e mobile: utilizzati per acquisire dettagli architettonici e strutturali degli edifici.
- Fotogrammetria da drone: impiegata per generare modelli tridimensionali del paesaggio urbano e delle infrastrutture.
- Rilievo satellitare: utilizzato per integrare dati geospaziali su ampia scala e per monitorare i cambiamenti territoriali.

Figura 7.
Operatore con laser
scanner impegnato nel
rilievo del quartiere
Zuidoost.



I dati raccolti vengono elaborati attraverso *software* specifici per la modellazione urbana, che permettono di creare rappresentazioni digitali ad alta risoluzione e di integrare informazioni provenienti da diverse fonti.

Un aspetto cruciale del *digital twin* di Zuidoost riguarda la protezione dei dati sensibili e la gestione della *privacy*. Considerando l'ampio volume di informazioni raccolte dai sensori IoT e dalle piattaforme digitali, il progetto adotta protocolli avanzati per garantire la sicurezza e l'anonimizzazione dei dati, ma ci sono delle barriere legislative che rendono complicato il potenziale uso di dati raccolti, in particolare quello delle videocamere, presenti su quasi tutto il distretto di Zuidoost.

Figura 8.
L'immagine mostra un
cartello appeso a un palo
della luce nel quartiere
Zuidoost di Amsterdam,
con una telecamera di
sorveglianza installata
sopra di esso.



Gli standard internazionali, come l'ISO 27001⁷⁰, forniscono un quadro di riferimento per la protezione delle informazioni, mentre tecniche di crittografia e sistemi di gestione degli accessi provano a limitare il rischio di violazioni. Tuttavia, il bilanciamento tra trasparenza e tutela della *privacy* rimane una sfida aperta, che richiede un monitoraggio continuo e l'adozione di soluzioni innovative, tecnologiche e legislative. Il *digital twin* di Zuidoost rappresenta un modello avanzato di gestione urbana, che combina tecnologie di rilievo, analisi dei dati e coinvolgimento comunitario. Grazie alla sua struttura modulare e alla capacità di evolversi con l'ambiente urbano, offre un potente strumento per affrontare le sfide della pianificazione sostenibile e della resilienza urbana. La seguente tabella offre una panoramica delle caratteristiche tecniche secondo le metriche stabilite nel capitolo 4.1 del *digital twin* urbano analizzato.

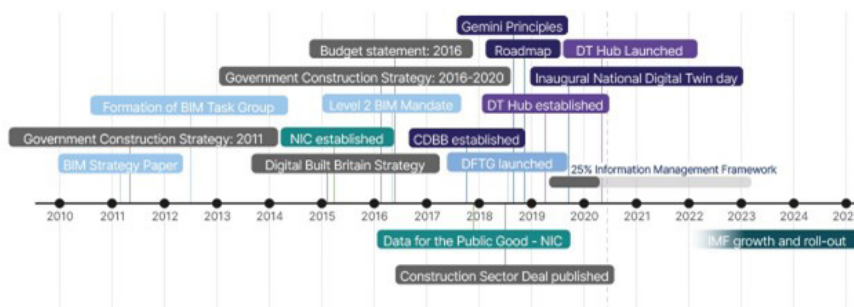
Zuidoost (Amsterdam)									
Dominio	Livello di integrazione	Grado di automazione	Livello di maturità	Livelli chiave	Acquisizione di dati	Attuazione	Simulazione	Esperienza utente	Stakeholders coinvolti
Energia Mobilità Sicurezza Governance	Digital Shadow	1 input automatico 2 output semi automatico, misto. 3 Sottoprogrammi e regole di attuazione manuale, completamente personalizzato. 4 accesso e sicurezza accesso completo.	Responsive twin	Fedeltà livello 4 Apprendimento livello 4 Intelligenza livello 3 Autonomia livello 3	- Agenzie governative Dati socio economici - Sensori - Dati dinamici	SI Cambio destinazione d'uso degli edifici, monitoraggio rifiuti.	SI Effetti delle nuove costruzioni. Flussi di traffico.	Pubblico Piattaforma web: https://3d.amsterdam.nl	City of Amsterdam Amministrazione comunale Amsterdam

⁷⁰ L'ISO 27001 è uno standard internazionale che definisce i requisiti per un Sistema di Gestione della Sicurezza delle Informazioni (SGSI). La sua implementazione aiuta le organizzazioni a proteggere le informazioni sensibili, garantendo che siano trattate in modo sicuro attraverso politiche, processi e controlli adeguati. Lo standard si concentra su aspetti come la riservatezza, l'integrità e la disponibilità delle informazioni, e supporta l'organizzazione nella gestione dei rischi legati alla sicurezza delle informazioni.

4.2 CAMBRIDGE: INNOVAZIONE E GESTIONE ACCADEMICA DELLA CITTÀ

Il progetto del *digital twin* di Cambridge è stato realizzato seguendo un approccio basato sulle Gemini Principles, un quadro di riferimento sviluppato dal *Centre for Digital Built Britain* (CDBB)⁷¹. Queste linee guida si concentrano su tre aspetti fondamentali: scopo, fiducia e funzionalità. Il progetto ha sfruttato una vasta gamma di tecnologie avanzate per creare un modello digitale complesso e multidimensionale, capace di integrare una molteplicità di dati provenienti da diverse fonti. L'obiettivo principale era quello di migliorare la gestione delle infrastrutture urbane e promuovere decisioni basate sui dati, garantendo allo stesso tempo un alto livello di trasparenza e coinvolgimento pubblico.

Figura 9. Cronologia del gemello digitale nazionale. Programma national digital twin, guidato dal centre for digital Built Britain e dal digital framework task group (DFTG).



Uno degli aspetti più innovativi del digital twin di Cambridge è la sua struttura gerarchica, che consente di rappresentare la città su differenti livelli di dettaglio, dai singoli asset infrastrutturali fino a una visione d'insieme a livello cittadino. Ad esempio, i dati relativi agli edifici, alle reti energetiche e ai flussi di traffico vengono raccolti e integrati in un unico sistema, che permette di analizzare interazioni e dipendenze tra i diversi componenti del tessuto urbano.

⁷¹ Centre for Digital Built Britain (CDBB) è un centro di ricerca e innovazione con sede nel Regno Unito, creato grazie a una collaborazione tra il governo britannico e l'università di Cambridge. La sua funzione principale è promuovere la trasformazione digitale del settore delle costruzioni, delle infrastrutture e dell'ambiente urbano attraverso l'uso di tecnologie avanzate come i gemelli digitali, il Building Information Modeling (BIM) e l'Internet delle cose (IoT).

Questo sistema è supportato da un'architettura tecnologica articolata in diversi livelli, che includono la raccolta dei dati tramite sensori, la modellazione digitale, l'integrazione delle informazioni e la loro visualizzazione attraverso interfacce interattive.

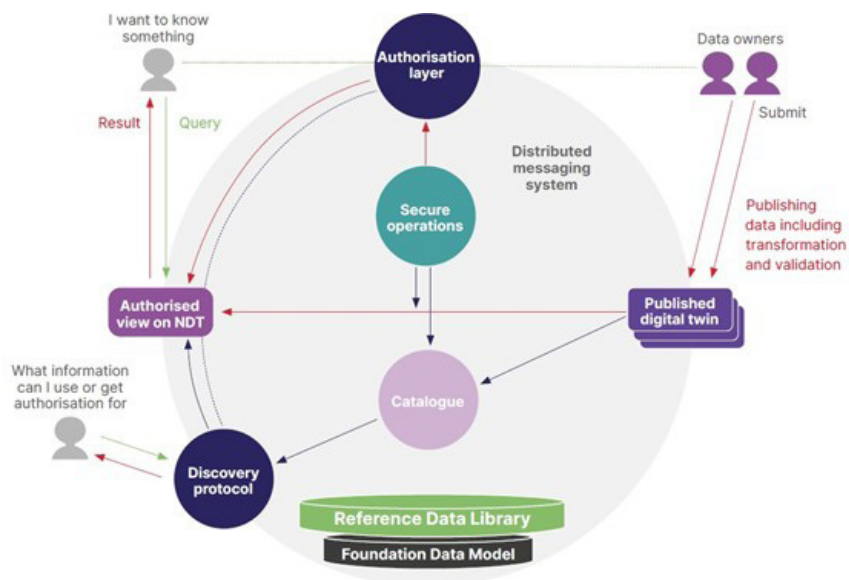
Il *digital twin* di Cambridge ha trovato applicazione in diversi ambiti della gestione urbana. Una delle sue principali funzioni è il monitoraggio di parametri ambientali come la qualità dell'aria e l'inquinamento acustico. Questo consente non solo di identificare aree critiche che richiedono interventi immediati, ma anche di sviluppare politiche a lungo termine per migliorare la sostenibilità ambientale della città. Un'altra applicazione importante riguarda la gestione delle infrastrutture, dove il *digital twin* permette di rilevare anomalie strutturali e di prevedere possibili guasti, ottimizzando così i processi di manutenzione.

In termini di pianificazione urbana, il *digital twin* offre la possibilità di creare scenari predittivi per nuovi sviluppi, valutando in anticipo gli impatti ambientali, economici e sociali delle diverse opzioni progettuali. Questo è reso possibile grazie alla capacità del modello di simulare l'interazione tra variabili complesse, come la densità del traffico, il consumo energetico e la distribuzione dei servizi pubblici. Inoltre, il sistema supporta una maggiore partecipazione dei cittadini nei processi decisionali, grazie all'utilizzo di strumenti di visualizzazione interattiva che rendono le informazioni accessibili e comprensibili a un pubblico non specializzato.

I benefici del *digital twin* di Cambridge sono molteplici e tangibili. Tra questi, spicca un miglioramento significativo dell'efficienza operativa nella gestione delle risorse urbane, che si traduce in una riduzione dei costi e in un utilizzo più sostenibile delle risorse disponibili. Inoltre, la capacità di monitorare e analizzare i dati in tempo reale contribuisce a rafforzare la resilienza della città, rendendola più

pronta a rispondere a eventi imprevisti, come condizioni meteorologiche estreme o emergenze infrastrutturali. Infine, il coinvolgimento attivo dei cittadini aumenta la trasparenza e la legittimità delle decisioni prese dalle autorità locali.

Figura 10.
La figura rappresenta una semplificazione della struttura e del funzionamento del national digital twin.



Un esempio particolarmente significativo dell'implementazione del *digital twin* a Cambridge è rappresentato dal progetto pilota sviluppato per il *West Cambridge Campus*. Questo progetto ha dimostrato come il *digital twin* possa essere utilizzato per migliorare la gestione energetica e la manutenzione delle infrastrutture in un contesto accademico. Il modello digitale del campus integra dati provenienti da diverse fonti, come sensori ambientali, sistemi di gestione degli edifici (*Building Management Systems*) e reti energetiche, creando una rappresentazione completa e aggiornata.

Grazie a questo approccio, il *digital twin* del *West Cambridge Campus* ha permesso di identificare inefficienze energetiche e di simulare interventi di retrofit, contribuendo a ridurre il consumo di energia e le emissioni di CO₂. Inoltre, il sistema è stato utilizzato per implementare un programma di manutenzione predittiva, basato sull'analisi dei dati raccolti in tempo reale. Questo ha consentito di prevenire guasti e di

ottimizzare l'allocazione delle risorse, migliorando la qualità del servizio e riducendo i costi operativi.

Un aspetto interessante di questo progetto è la sua capacità di collegare i dati raccolti a livello di edificio con una visione aggregata a livello cittadino. Questo non solo facilita la gestione delle risorse all'interno del campus, ma offre anche una base di conoscenza preziosa per supportare decisioni strategiche a livello urbano.

Nonostante i numerosi successi, l'implementazione del *digital twin* a Cambridge non è priva di sfide. Una delle principali è rappresentata dalla sicurezza dei dati, che richiede misure avanzate per proteggere le informazioni sensibili da accessi non autorizzati e attacchi informatici. Un'altra sfida riguarda l'interoperabilità dei sistemi, poiché è necessario standardizzare i formati dei dati per garantire un'integrazione fluida tra le diverse piattaforme tecnologiche.

Un ulteriore ostacolo è rappresentato dall'accessibilità del sistema, che deve essere progettato in modo tale da essere utilizzabile non solo dai decisori pubblici, ma anche dai cittadini e dagli altri *stakeholder*. Questo richiede lo sviluppo di interfacce intuitive e strumenti di formazione per facilitare l'adozione della tecnologia.

Guardando al futuro, le prospettive per il *digital twin* di Cambridge sono promettenti. Tra gli obiettivi principali vi sono l'estensione del modello per supportare politiche di decarbonizzazione e l'integrazione di dati climatici per migliorare la resilienza della città. Inoltre, si prevede di esplorare nuove applicazioni nel campo della mobilità sostenibile e della gestione delle risorse idriche, sfruttando le potenzialità offerte dall'intelligenza artificiale e dall'apprendimento automatico.

Cambridge									
Dominio	Livello di integrazione	Grado di automazione	Livello di maturità	Livelli chiave	Acquisizione di dati	Attuazione	Simulazione	Esperienza utente	Stakeholders coinvolti
Energia Mobilità Sicurezza Governance	Digital twin	1 input automatico 2 output semi automatico, misto. 3 Sottoprogrammi e regole di attuazione semi-automatico-misto. 4 accesso e sicurezza accesso completo.	Responsive twin	Fedeltà livello 4 Apprendimento livello 4 Intelligenza a livello 3 Autonomia a livello 3	-Agenzie governative Dati socio-economici -IoT - Sensori Dati dinamici	SI Pianificazione Mobilità intelligente	SI Effetti delle nuove costruzioni. Simulazione energetica/solare.	Privato	Center for Digital Built Britain (CDBB)

4.3 DUBLINO – AREA DOCKLANDS: INFRASTRUTTURE INTELLIGENTI E DATI GEOSPAZIALI

Il quartiere Docklands di Dublino, un tempo una zona portuale degradata e abbandonata, ha vissuto una straordinaria trasformazione negli ultimi decenni grazie a un ambizioso progetto di riqualificazione urbana promosso dal the Dublin Docklands development authority. Oggi, i Docklands sono un centro trendy e innovativo, soprannominato Silicon Docks per un mix di innovazione, design e vivibilità, attirando una popolazione giovane e dinamica. I Docklands sono diventati un punto di riferimento per il tessuto sociale ed economico della città. Diventando un centro di innovazione attraverso la sperimentazione del digital twin, con l'obiettivo di estendere successivamente questa tecnologia all'intera città.

Il *digital twin* del quartiere Docklands di Dublino si distingue per il suo approccio innovativo e il suo ruolo centrale nello sviluppo delle *smart cities*. Questo capitolo analizza l'evoluzione, le caratteristiche e le potenzialità del progetto, ponendo particolare attenzione alle implicazioni tecnologiche, sociali e urbanistiche.

I Docklands di Dublino rappresentano un banco di prova ideale per l'implementazione del *digital twin*. L'obiettivo principale è creare un modello digitale che integri dati provenienti da fonti diverse, come i sistemi informativi

geografici (GIS), i sensori IoT e i modelli tridimensionali delle infrastrutture, per supportare la pianificazione urbana, la partecipazione dei cittadini e la gestione sostenibile delle risorse.

Il progetto è stato sviluppato come parte dell'iniziativa *Smart Dublin* e si basa su una stretta collaborazione tra enti pubblici, aziende private e istituzioni accademiche, seguendo il modello della “quadrupla elica dell'innovazione”⁷². Tra i partner principali figurano il *Dublin City Council*, il centro di ricerca ADAPT presso il *Trinity College Dublin*, e aziende come Bentley Systems.

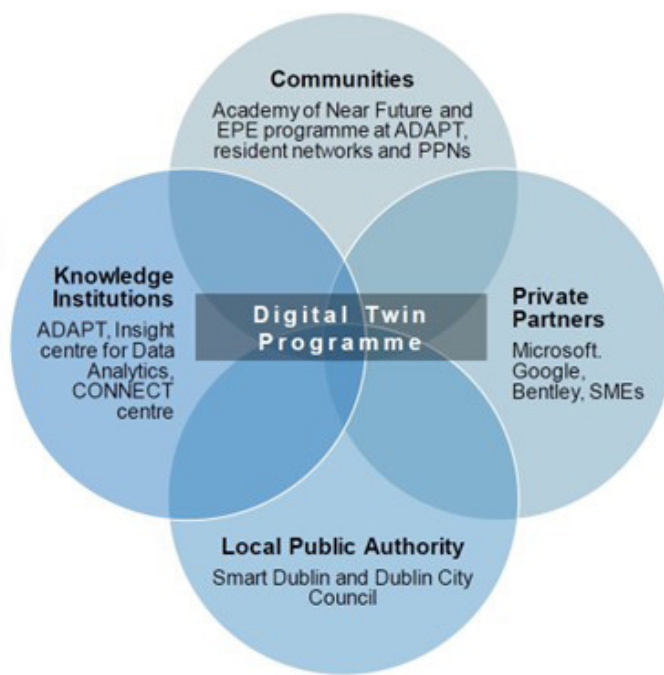


Figura 11 .

La figura illustra in modo schematico e sintetico la collaborazione e l'integrazione tra i diversi attori e istituzioni coinvolti nella realizzazione del digital twin del quartiere Docklands di Dublino.

Il *digital twin* dei Docklands è un modello tridimensionale dinamico che combina diverse tecnologie avanzate per rappresentare in tempo reale lo stato fisico e operativo dell'area. Il cuore del *digital twin* è rappresentato da un modello tridimensionale altamente dettagliato, creato utilizzando tecnologie come fotogrammetria, *laser scanning*

⁷² Con “quadrupla elica dell'innovazione” si intende un modello teorico che descrive la collaborazione tra quattro principali attori in un ecosistema innovativo: governo, università, imprese private e società civile. Questo approccio enfatizza l'interazione tra questi attori per stimolare l'innovazione, lo sviluppo tecnologico e il progresso sociale.

e rilievi geospaziali. Questo modello non è semplicemente una rappresentazione statica del quartiere, ma una piattaforma dinamica che integra dati in tempo reale raccolti da sensori distribuiti nell'area.

Il modello include una rappresentazione dettagliata dei principali edifici e infrastrutture che, attraverso la realtà virtuale consente agli utenti di esplorare l'area e simulare scenari futuri.

Attraverso l'istallazione di sensori (IoT) installati nell'area forniscono dati in tempo reale su parametri come la qualità dell'aria, il traffico, il consumo energetico e i livelli di rumore. Questi dati integrati nel *digital twin*, attraverso processi di *data analytics* e machine learning migliorano la gestione urbana, anticipando potenziali criticità e pianificando interventi efficaci.

Il *digital twin* del quartiere Docklands trova applicazione in molteplici ambiti, contribuendo a migliorare la gestione e la pianificazione urbana:

- Pianificazione urbana: la piattaforma è stata utilizzata per simulare diversi scenari di sviluppo, come l'introduzione di nuovi edifici o spazi verdi, aiutando a prevedere l'impatto visivo e ambientale delle modifiche pianificate.
- Gestione delle emergenze: modelli di risposta a eventi critici, come inondazioni o incendi, migliorano la capacità di risposta delle autorità locali grazie a simulazioni basate su dati.
- Monitoraggio e ottimizzazione delle infrastrutture: il *digital twin* supporta il monitoraggio della rete elettrica, dei trasporti pubblici e di altre infrastrutture esistenti, favorendo un uso più efficiente delle risorse.
- Promozione del turismo: applicazioni di realtà aumentata (AR) permettono ai visitatori di esplorare

i Docklands tramite percorsi interattivi arricchiti da informazioni culturali e visive.

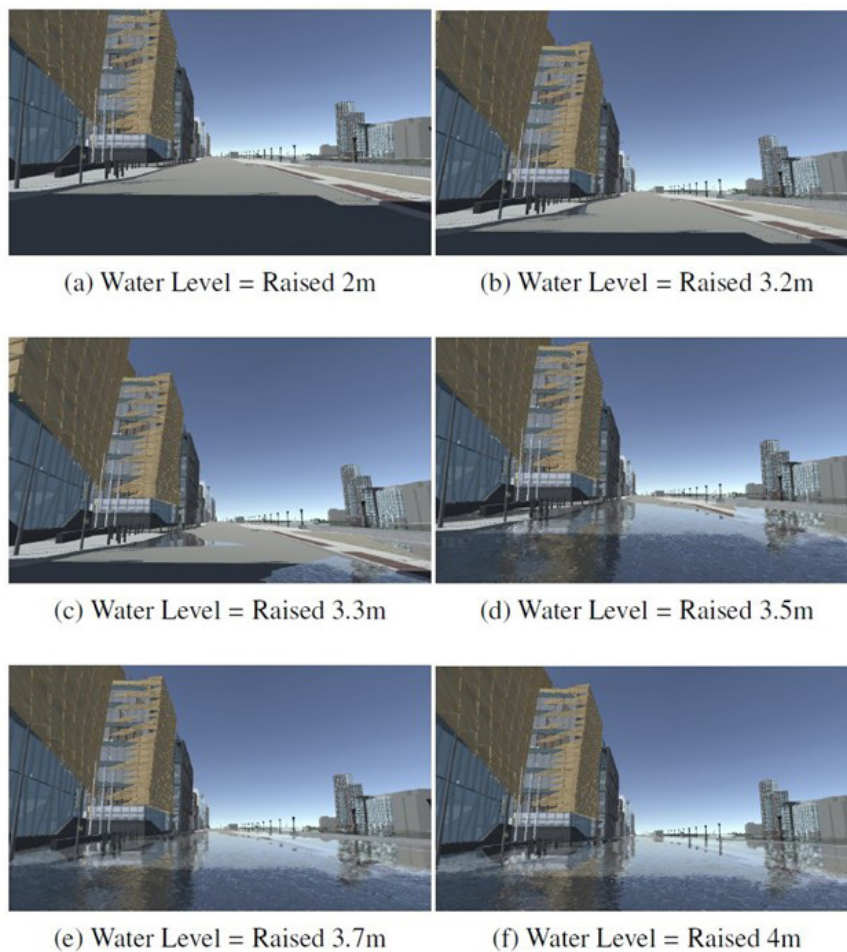


Figura 12.
Simulazione di
un'inondazione.

- Partecipazione e *feedback* dei cittadini: una piattaforma web intuitiva consente ai cittadini di esplorare il modello, fornire *feedback* e segnalare problemi specifici, promuovendo la trasparenza e il senso di responsabilità collettiva.

Il *digital twin* dei Docklands ha generato numerosi benefici:

- Sostenibilità ambientale: ha contribuito a ridurre le emissioni di carbonio grazie a una gestione più efficiente delle risorse energetiche e alla pianificazione di mobilità sostenibile.
- Attrazione di investimenti: il progetto ha consolidato i Docklands come hub tecnologico, attirando

investimenti significativi e stimolando l'innovazione.

- Ricerca e innovazione: la disponibilità di dati ha stimolato lo sviluppo di nuove tecnologie e soluzioni per la città.

Nonostante i successi, il progetto affronta diverse sfide:

- Privacy e sicurezza dei dati: la gestione di grandi volumi di dati sensibili richiede protocolli avanzati di crittografia e sistemi di gestione degli accessi.
- Scalabilità: l'espansione del modello a livello cittadino richiede risorse significative e un coordinamento efficace tra le parti interessate.

Le prospettive future includono l'integrazione di tecnologie emergenti, e l'espansione del *digital twin* a livello regionale. Il *digital twin* del quartiere Docklands di Dublino rappresenta un esempio pionieristico di come le tecnologie digitali possano trasformare la gestione e lo sviluppo urbano. Attraverso un approccio basato sui dati e il coinvolgimento della comunità, il progetto ha dimostrato il suo potenziale per affrontare le sfide del futuro e promuovere una città più sostenibile e resiliente.

Di seguito la tabella con le metriche descritte nel capitolo 3.1 riferita al *digital twin* del quartiere Docklands di Dublino.

Docklands (Dublino)										
Dominio	Livello di integrazione	Grado di automazione	Livello di maturità	Livelli chiave	Acquisizione di dati	Attenuazione	Simulazione	Esperienza utente	Intelligenza artificiale	Stakeholders coinvolti
Mobilità Governance Rifiuti Sicurezza idrica	Digital twin	1 input automatico 2 output semi-automatico, misto. 3 sottoprogrammi a regole di attuazione semi-automatico, misto. 4 accesso e sicurezza accesso completo.	Intelligent twin	Fedeltà livello 5 Apprendimento livello 4 Intelligenza livello 2 Autonomia livello 4	- Sensori -IoT -Dati dinamici	SI Pianificazione condivisa.	SI Effetti delle nuove costruzioni. Simulazione energetica totale.	Pubblico Piattaforma web: https://data.smartdublin.ie/	SI Processo di pianificazione urbana.	Dublin City Council Science Foundation Ireland Research Centre CONNECT. (Smart Docklands)

4.4 MONACO DI BAVIERA: EFFICIENZA ENERGETICA E MODELLAZIONE PREDITTIVA

Monaco di Baviera è la città più popolata dello stato tedesco che ospita tre milioni di persone, è la terza città più grande della Germania, dopo Berlino e Amburgo, e la dodicesima città più grande dell'Unione Europea.

Monaco è consapevole della responsabilità che comporta l'aumento incontrollato previsto della popolazione mondiale, pertanto in un'epoca di globalizzazione, la città ha sviluppato politiche basate sull'internazionalità, la sostenibilità e la solidarietà.



Figura 13.

Città di Monaco di Baviera.

Una pianificazione urbana sostenibile, con strutture rispettose dell'ambiente e dell'uomo per lo spazio e le abitazioni, nonché concetti completi per edifici a risparmio energetico e di risorse, saranno assolutamente essenziali per le città e l'architettura del futuro. La città di Monaco si è posta l'ambizioso obiettivo di essere carbon neutral entro il 2035. La pianificazione e lo sviluppo urbanistico giocheranno un ruolo chiave in tutte le sue misure: Monaco sta riqualificando le sue aree esterne, ridistribuendo il suo spazio pubblico e incoraggiando tutti i cittadini a partecipare al suo sviluppo. La città sta promuovendo la

mobilità sostenibile e sviluppando quartieri *carbon neutral*. Sta creando alloggi a prezzi accessibili, garantendo sedi per le imprese e garantendo un buon accesso all'istruzione e all'assistenza sanitaria. Monaco agisce con uno scopo reale, perché il tempo è essenziale. Potremo limitare il riscaldamento globale ben al di sotto dei 2°C, come previsto dall'accordo di Parigi, solo se tutti faranno la loro parte. Le economie sostenibili garantiscono la base per i mezzi di sussistenza delle generazioni future. Generano stabilità economica, ecologica e sociale e incoraggiano esperti economici innovativi ed ecologicamente avanzati.

La città mantiene i suoi obiettivi sulla sostenibilità, anche l'amministrazione comunale e le aziende municipali stanno facendo progressi con i propri progetti. Il cambiamento climatico, la scarsità di risorse e le mutevoli circostanze ambientali rappresentano un'enorme sfida per l'uomo e la natura, che dobbiamo affrontare con urgenza e sistematicamente. In Baviera, gli ecosistemi sensibili stanno già subendo un impatto significativo. Le città sono fortemente colpite, ma hanno anche un potenziale inutilizzato per mitigare gli impatti dei cambiamenti climatici e per adattarsi ad essi. A differenza della mitigazione dei cambiamenti climatici, in cui l'obiettivo è ridurre le emissioni di gas serra come obiettivo prioritario e quantificabile, l'adattamento agli effetti dei cambiamenti climatici riguarda l'obiettivo a lungo termine meno chiaramente focalizzato di ridurre la vulnerabilità delle risorse naturali, sociali ed economiche. sistemi e mantenere e migliorare la loro capacità di adattamento. Pertanto, l'obiettivo delle strategie eco-politiche è quello di mitigare il cambiamento climatico il più rapidamente e intensamente possibile mentre allo stesso tempo mirano ad adattarsi agli impatti già evidenti del cambiamento climatico, o reagire in modo preventivo⁷³.

La strategia tedesca crea un quadro per l'adattamento alle conseguenze del cambiamento climatico in Germania, fornisce principalmente una guida per i soggetti interessati e persegue un approccio integrato alla valutazione dei rischi e delle esigenze di azione, sostenendo lo sviluppo sostenibile. L'obiettivo della strategia di adattamento è ridurre la vulnerabilità alle conseguenze del cambiamento climatico, mantenere o migliorare l'adattabilità dei sistemi naturali, sociali ed economici e sfruttare ogni opportunità. Le precipitazioni sono un'area in cui si possono osservare cambiamenti in Germania. Rispetto all'inizio del XX secolo, la media regionale delle precipitazioni medie annue in Germania è aumentata di circa il 9%. Le precipitazioni in 11 degli ultimi 15 anni sono state superiori alla media. Inoltre, anche i ghiacciai montani e il manto nevoso mostrano una marcata diminuzione sia nell'emisfero settentrionale che in quello meridionale.

Un altro esempio è il livello del mare. Durante il XX secolo l'innalzamento mondiale del livello del mare è stato in media di circa 17 cm. Le ragioni di ciò sono l'espansione dell'acqua di mare dovuta al riscaldamento globale e allo scioglimento dei ghiacciai, delle calotte polari e delle calotte glaciali continentali. I possibili impatti dei cambiamenti climatici sul regime idrico si manifestano nelle tendenze a lungo termine, e anche nell'aumento della frequenza di eventi estremi ad esempio inondazioni, mareggiate e siccità. Gli effetti del cambiamento climatico intensificano anche le differenze regionali esistenti nella disponibilità di acqua. Il cambiamento climatico aumenta le sfide coinvolte nelle complesse interazioni degli usi dell'acqua e questo crea un'ampia gamma di esigenze di adattamento per la gestione delle risorse idriche, il controllo delle inondazioni e la protezione delle coste. Le precipitazioni più frequenti o più intense dovute ai cambiamenti climatici influiscono sul traffico stradale, ad esempio a causa di problemi di vista e

strade bagnate. Frane e sottosquadri portano alla destabilizzazione e alla distruzione di tratti stradali e ferroviari. I temporali possono causare ostacoli diretti o danneggiare strade, binari ferroviari e linee elettriche. Le ondate di calore durante i mesi estivi possono produrre un aumento del numero di incidenti, poiché la concentrazione generalmente diminuisce a temperature più elevate. Monaco sostiene progetti per la generazione di energie rinnovabili e opera sul campo per promuovere il business sostenibile. Per sostenere il raggiungimento di questo obiettivo di riduzione delle emissioni, nel 2008 è stato creato anche il programma d'azione integrato per la protezione del clima di Monaco con corrispondenti strutture organizzative all'interno dell'amministrazione. Per raggiungere obiettivi ambiziosi di protezione del clima compatibili con l'obiettivo nazionale di riduzione delle emissioni fino al 95% entro il 2050 rispetto al 1990 o con l'obiettivo globale di 1,5°, sono necessari sforzi molto maggiori rispetto a prima. In definitiva, si tratta di rimodellare la società e l'intero sistema energetico. La città è già stata premiata per i suoi sforzi, nel concorso nazionale, la capitale bavarese ha vinto un premio per il suo progetto München für Klimaschutz (Monaco per la protezione del clima)⁷⁴, in corso dal 2007. Il progetto è una rete per lo sviluppo di nuove idee e strategie applicative per la protezione del clima. L'esempio dell'amministrazione comunale di Monaco di una politica di approvvigionamento sostenibile è ora utilizzato da più di 150 altre città tedesche. Per aiutare a proteggere l'ambiente e il clima, la società di servizi municipali di Monaco Stadtwerke München (SWM)⁷⁵ ha avviato un'importante campagna di espansione per le

74

75 Stadtwerke München GmbH (SWM) è una delle più grandi società di servizi e servizi municipali, offre prodotti di elettricità e gas naturale a clienti privati e aziendali in tutta la Germania, è una componente centrale della strategia aziendale dal 2008 nell'espansione delle energie rinnovabili.

fonti di energia rinnovabile. Entro il 2025, SWM mira a produrre abbastanza elettricità verde nelle proprie centrali elettriche per coprire il 100% della domanda della città. Monaco sta lavorando per affermarsi come uno dei comuni più rispettosi del clima della Germania; un obiettivo che è stato convertito in legge dal governo della città nell'estate 2010, attraverso un progetto di azione integrata sulla protezione del clima a Monaco di Baviera Integriertes Handlungsprogramm Klimaschutz in München (IHKM)⁷⁶, la città sta affrontando questioni ambientali e climatiche a lungo termine, riducendo drasticamente anche le emissioni di CO₂. Come primo passo, sono state risparmiate oltre 500.000 tonnellate di CO₂ tra il 2010 e il 2012. Al più tardi entro il 2030, l'obiettivo è dimezzare le emissioni di CO₂ pro capite della città, rispetto ai dati del 1990. L'obiettivo a lungo termine della Germania e dell'Unione Europea è quindi quello di limitare l'aumento della temperatura media globale a 2°C al di sopra del livello preindustriale, il che richiede una sostanziale riduzione delle emissioni di gas serra. Anche con un aumento limitato della temperatura di questa portata, le conseguenze ambientali, sociali ed economiche del cambiamento climatico già in atto faranno sentire i loro effetti. Se viene raggiunto l'obiettivo di 2°C, ci si aspetta che sia possibile mitigare le conseguenze mediante misure di adattamento appropriate e tempestive, evitando così gravi conseguenze. Se non si riesce a limitare l'aumento della temperatura, si possono prevedere effetti dannosi sostanziali. I livelli di emissione dipendono da numerosi fattori, tra cui in particolare le tendenze di crescita della popolazione e i futuri cambiamenti nell'uso del suolo, il ritmo della futura crescita economica, le tendenze dell'energia e lo sviluppo e l'applicazione di tecnologie.

⁷⁶ Integriertes Handlungsprogramm Klimaschutz in München (IHKM), è un programma d'azione integrato di protezione del clima della città del monaco.

Inoltre, non è possibile al momento determinare l'impatto climatico delle varie emissioni di gas serra o dei complessi processi di feedback che avvengono nell'atmosfera. I ricercatori sul clima prevedono che il cambiamento climatico avrà un impatto crescente sul settore dell'edilizia. Le ondate di calore prolungate in estate, l'aumento delle piogge intense in particolare in inverno e i temporali più forti potrebbero rappresentare una minaccia per gli edifici, le strutture e le relative infrastrutture. Che si tratti di questioni residenziali, trasporti, sviluppo urbano, edifici, energia o approvvigionamento, tutte le aree dell'amministrazione della città vengono controllate per garantire che stiano facendo la loro parte per la protezione del clima. Si stanno sviluppando misure efficaci per ridurre la produzione di CO₂, con l'obiettivo di ancorare la protezione del clima nel modo in cui agisce il governo della città, aggiornando e monitorando costantemente tale azione. Tra gli altri aspetti, la città sta cercando di stabilire gli standard per l'efficienza energetica in edifici nuovi e ristrutturati, ad un livello significativamente superiore al minimo legale nazionale. Quasi metà delle emissioni di anidride carbonica di Monaco di Baviera oggi sono prodotte dal riscaldamento degli edifici. Ecco perché la ristrutturazione degli edifici per migliorarne l'efficienza energetica può contribuire notevolmente alla riduzione delle emissioni. Per garantire che quasi tutti gli edifici siano resi efficienti dal punto di vista energetico entro i prossimi 50 anni, la quota per le ristrutturazioni termiche sarà aumentata dallo 0,5 al 2,0 percento all'anno. Ciò ridurrà il fabbisogno di calore di edifici ristrutturati dall'attuale livello di circa 200 kWh/m²/anno ad un totale di 25-35 kWh/m²/anno. Per le nuove costruzioni, il fabbisogno termico potrebbe essere anche inferiore perché una grande percentuale di edifici sarà

effettivamente costruita secondo lo *standard plus energy*⁷⁷, tali edifici producono più energia di quanta ne consumano. Il fabbisogno termico per i nuovi edifici sarà ben al di sotto dello standard attuale. Allo stesso tempo, i nuovi edifici saranno dotati di energia solare, consentendo alla maggior parte di soddisfare il proprio fabbisogno energetico residuo, o anche di rimettere in rete l'energia in eccesso. Si presume inoltre che la maggior parte degli edifici, fino all'85% delle nuove costruzioni e fino all'80% degli edifici esistenti, sarà in grado di soddisfare questi rigorosi standard. In particolare, nelle aree di insediamento densamente edificate, gli effetti del cambiamento climatico sono oscurati dagli effetti del clima urbano. Rispetto all'area circostante, il clima nelle città, a seconda del grado di urbanizzazione, tende ad essere caratterizzato da periodi di sole più brevi, temperature più elevate, umidità relativa più bassa, maggiore copertura nuvolosa, velocità del vento medie inferiori e venti più forti, e anche aumento annuale pioggia. Gli effetti del clima urbano con ripercussioni sulla salute potrebbero essere intensificati dai cambiamenti climatici. Anche la pianificazione degli edifici e le strutture tecniche dovrebbero essere adattate per tenere conto dei cambiamenti indotti dal clima. Continuerà ad esserci bisogno di riscaldamento durante la stagione invernale, anche se questo fabbisogno mostrerà probabilmente una leggera riduzione a causa dell'aumento delle temperature. A Monaco di Baviera oggi, il traffico contribuisce per circa il 15 per cento delle emissioni di CO₂: di cui circa 2 punti percentuali provengono dal traffico passeggeri e tre punti percentuali dal traffico merci. La protezione del clima nel traffico è caratterizzata soprattutto dallo spostamento verso una modalità di trasporto rispettose dell'ambiente, dalla prevenzione del

77 Energy-plus-house è un termine che indica una casa che auto-produce energia da fonti rinnovabili.

traffico e dalla progettazione compatibile del traffico, nonché da strategie basate sulla tecnologia. Un importante esempio è la riduzione di 1.900 tonnellate all'anno di CO₂ della flotta di auto dell'amministrazione comunale. Gli spostamenti per affari in città dovrebbero essere effettuati principalmente con i mezzi pubblici o in bicicletta, mentre saranno acquistate auto con concetti di potenza innovativi, come i motori elettrici. I calcoli mostrano che anche oggi un uso sistematico della tecnologia a basso consumo di carburante potrebbe ridurre il consumo totale della flotta di autoveicoli di circa il 50 per cento. Il trasporto pubblico sarà reso più veloce e attraente, attraverso l'utilizzo di sistemi semaforici preferenziali e di corsie o binari speciali per autobus e tram. Nel 2012 sono stati ordinati 6.000 lampioni a risparmio energetico che consumano solo il 50 per cento dell'elettricità dei normali lampioni.

Anche ciò contribuirà anche a ridurre i livelli di inquinamento atmosferico in città. Inoltre, il 20% di tutti i gas serra sono prodotti dal cibo che mangiamo. La produzione di carne e alimenti freschi causano i maggiori danni, in quanto comportano una serie di azioni che possono aggiungere fino al 29% della produzione di gas. Nel luglio 2006, il consiglio comunale di Monaco ha approvato all'unanimità il progetto *Biostadt Munich: Eco-City Munich*, dove gli obiettivi sono una dieta ecologica nelle scuole e negli asili nido, più cibo biologico negli eventi della città e un aumento del numero di ristoranti e pensioni che servono cucina biologica sotto certificazione. Un altro ambito affrontato in Germania è la gestione dei rifiuti urbani che è la pietra angolare per lo smaltimento e il riciclaggio dei rifiuti in modo ecologicamente responsabile e a prezzi socialmente accettabili. Con un concetto di gestione dei rifiuti innovativo, ecologico e sostenibile, Monaco è un modello da oltre vent'anni. Il mantenimento della gestione dei rifiuti in mano pubblica è un tema per il quale Monaco continua a battersi

a livello nazionale.

Nella transizione delle linee guida dell'UE sulla gestione dei rifiuti nel diritto tedesco, la città esercita la sua influenza politica per garantire che i comuni continuino a mantenere la loro responsabilità per la sostenibilità. Il concetto ecologico di smaltimento e riciclaggio dei rifiuti di Monaco risale all'anno 1989. L'obiettivo allora, come lo è ora, era la protezione dell'ambiente attraverso il riutilizzo, il riciclaggio e l'attento smaltimento dei rifiuti, e garantire il mantenimento dell'elevato tenore di vita. Anche l'ambiente circostante è un punto fondamentale della progettazione sostenibile di Monaco: le foreste gestite in modo ecologico svolgono un ruolo fondamentale nella protezione del clima, in quanto durante la crescita, gli alberi assorbono anidride carbonica. La quantità di legno utilizzato nei vari settori corrisponde alla quantità di legno che può ricrescere naturalmente, secondo questo principio, ogni anno vengono tagliati circa 50.000 metri cubi massicci di legno. Il corpo forestale comunale si occupa di circa 5.000 ettari di foreste, che gestiscono un totale di 3,4 milioni di tonnellate di CO₂. La gestione idrica è un altro argomento che ha affrontato la città: i cittadini di Monaco di Baviera hanno bisogno di circa 320 milioni di litri d'acqua al giorno per vivere, per soddisfare questa domanda in modo ecologicamente corretto, la città e la sua società di servizi pubblici SWM hanno sviluppato, nel corso di decenni, tre aree di raccolta dell'acqua che si completano a vicenda e forniscono a Monaco di Baviera alcuni dei migliori prodotti per l'acqua potabile in Europa. La protezione del clima e una gestione sostenibile delle risorse naturali sono tra gli obiettivi più ambiziosi della nostra epoca, pertanto Monaco, con l'aiuto dell'azienda municipale di servizi pubblici ed energia, nel 2015, ha prodotto abbastanza elettricità ecologica nelle proprie strutture per soddisfare le esigenze di circa 800.000 abitazioni private. Ciò equivale a un consumo di circa due miliardi di chilowattora all'anno. Entro il 2025, SWM mira

a produrre così tanta energia verde, che l'intera domanda della città, 7,5 miliardi di kWh potrà essere soddisfatta. Per raggiungere questi obiettivi, è stata avviata una campagna di espansione per le energie rinnovabili. Con tutti i progetti attualmente in programmazione o già realizzati, è possibile che 800.000 famiglie potrebbero essere fornite molto prima del tempo. Con la sua campagna di espansione, SWM punta su un ampio spettro di fonti di energia rinnovabile, come l'eolico, l'energia idroelettrica, il solare, le biomasse e le tecnologie geotermiche. Inoltre, l'azienda investe solo in progetti finanziariamente autosufficienti e si ripaga da sola. Parallelamente alla sua campagna di espansione per le energie rinnovabili, l'azienda dei servizi pubblici e della società elettrica di Monaco sta facendo passi da gigante nel suo programma di riscaldamento. La rete di teleriscaldamento di Monaco di circa 600 chilometri è una delle più lunghe d'Europa. Nei prossimi dieci anni, SWM prevede un nuovo carico allacciato di circa 700 megawatt, compreso il consolidamento dei quartieri cittadini già serviti, ciò significa un aumento di circa il 25%, che consente ad altri 120.000 appartamenti e case di beneficiare di energia ecologica e di risparmiare circa 300.000 tonnellate di CO₂. Questa ambiziosa espansione è una chiara priorità per il prossimo futuro. Il teleriscaldamento⁷⁸ è stato utilizzato a Monaco dall'inizio del XX secolo, da allora, SWM ha costantemente ampliato la rete di teleriscaldamento. Con il pacchetto di stimolo al coronavirus, la Germania mette a disposizione un ampio pacchetto finanziario per lo sviluppo delle *smart city*⁷⁹.

⁷⁸ La rete di teleriscaldamento di Monaco di Baviera (in tedesco: *Fernwärmenetz München*) è un sistema di distribuzione del calore centralizzato, gestito principalmente dalla Stadtwerke München (SWM), la compagnia municipale dei servizi pubblici della città. Un sistema centralizzato per la distribuzione di calore destinato al riscaldamento degli edifici e alla produzione di acqua calda sanitaria in varie parti della città. Si tratta di una delle reti di teleriscaldamento più ampie e avanzate in Europa.

⁷⁹ D'Ambrosio, V., et al. 2023.

In totale, la Germania sta investendo 1.250 miliardi di euro per far progredire lo sviluppo e l'implementazione delle tecnologie urbane. Con il 77% dei tedeschi che vive in città e paesi limitrofi, l'importanza dello sviluppo urbano strategico attraverso soluzioni digitali è ampiamente riconosciuta. La tecnologia che oggi sconvolge la vita urbana ha il potenziale per migliorare la qualità della vita. Soluzioni innovative e un buon processo decisionale sono la chiave del successo. L'adozione più ampia del *Building Information Modeling* (BIM) e dell'open BIM nel settore delle risorse costruite è promettente, altre considerazioni come la crescita della popolazione, l'urbanizzazione e il cambiamento climatico aumentano ulteriormente la pressione per il miglioramento della produttività e della qualità. Una delle tecnologie che ha un enorme potenziale è il *digital twin*, ad esempio per la gestione dei trasporti e della logistica. Il progetto si concentrerà su casi d'uso innovativi e sulle modalità di partecipazione per approfondire e migliorare le esigenze integrative dei piani di sviluppo urbano. L'idea di un digital twin esiste già in un contesto industriale. La versione urbana assumerà la forma di un modello di città 3D virtuale e interattivo e di una piattaforma di dati urbani collaborativi. I residenti possono utilizzare i dati per aiutare a prendere decisioni migliori e con una tempistica elevata. Il *digital twin* è una rappresentazione digitale di una risorsa fisica. Può essere creato in parallelo alla sua controparte fisica e abbraccia tutte le fasi del ciclo di vita. Il *digital twin* esiste nella fase di pianificazione e progettazione di un progetto come metodo per una migliore pianificazione, progettazione e costruzione di un progetto. Tecnologie come l'intelligenza artificiale, l'apprendimento automatico, i sensori e l'IoT consentono la raccolta e lo scambio di dati dinamici tra gemelli fisici e digitali. Anziché disporre di aggiornamenti in tempo reale ad alta intensità di risorse, i diversi flussi di dati vengono scambiati a intervalli di tempo

corretti. Ciò può includere anche interventi a intervalli *just-in-time*. I *digital twins* possono apprendere, aggiornare e comunicare con la controparte fisica in qualsiasi momento e applicare l'apprendimento dei dati. Sebbene le rappresentazioni digitali di singole risorse fisiche siano preziose, l'idea dei gemelli digitali non è necessariamente limitata a singole istanze. L'integrazione di più *digital twin* consente la creazione di un ecosistema di *digital twin*. Questa versione estesa può fornire un contesto più ampio e di maggior valore dell'ambiente economico, sociale e naturale. Il gemello digitale diventerà il componente centrale dell'infrastruttura in rete e digitale della *smart city* Monaco di Baviera a impatto climatico zero. Ad esempio, con il gemello digitale, sarà possibile in futuro esaminare meglio come un cambiamento negli edifici o nello spazio stradale influenzerà la qualità dell'aria e il clima, quanto traffico viene generato e quanto rumore viene generato come risultato. Attraverso il necessario collegamento in rete delle procedure specialistiche, diversi reparti possono essere inclusi in modo più efficiente nelle analisi, ad esempio nella ristrutturazione edilizia efficiente dal punto di vista energetico o nella pianificazione e realizzazione di nuove aree di sviluppo. In questo modo è possibile simulare in anticipo come tali misure contribuiranno al raggiungimento di obiettivi per l'intera città, come la neutralità climatica. Insieme a Monaco di Baviera, Amburgo e Lipsia stanno sviluppando il *digital twin* nel progetto *connected urban twins* (CUT), con l'obiettivo di utilizzare i dati digitali per lo sviluppo urbano innovativo e la partecipazione dei cittadini. Nel 2020 Monaco si è aggiudicata contratto per finanziare il progetto congiunto *connected urban twins* e *urban data platforms* per lo sviluppo urbano integrato. L'obiettivo è sviluppare nuove applicazioni innovative per lo sviluppo urbano e forme di partecipazione.



Figura 14.
Modello di città 3D
e realtà aumentata a
Monaco di Baviera.

La base di questi progetti è il *digital twin*: si trattano di immagini digitali della città, ovvero controparti di oggetti o processi reali costituiti da dati e algoritmi. I *digital twins* sono collegati al mondo reale tramite sensori. In un contesto urbano, si tratta, ad esempio, di strade, edifici o specchi d'acqua, ma anche i processi amministrativi più astratti possono essere mappati. Da tutti i modelli viene quindi creato un modello di città 3D interattivo e una piattaforma dati di città, che possono essere utilizzati sia dagli esperti che dai cittadini come open source, ovvero come fonte di dati liberamente accessibile. Ciò consente a tutti gli attori coinvolti di prendere decisioni più rapide, migliori e ripensate. Un esempio comune associato al concetto di gemello digitale è il controllo dei flussi di traffico nel senso di mobilità intelligente. I gemelli digitali consentiranno alle città di comprendere meglio le cause degli ingorghi, dell'inquinamento e degli incidenti e di prevedere gli effetti dei cambiamenti al sistema di mobilità prima che vengano introdotti. Cooperazione interdisciplinare e standard intersettoriali tecnologici come l'apprendimento automatico possono aiutare. Sebbene attualmente non vi siano applicazioni mature per i gemelli digitali nel campo della qualità della vita e della salute, una serie di progetti rende possibili progetti di implementazione iniziale e

gettano le basi per espansioni e maturazioni successive. Lo sfruttamento di questo potenziale richiede la digitalizzazione e l'interazione di molti sistemi, attualmente indipendenti e spesso sviluppati manualmente o sviluppati storicamente, che sono composti da molte componenti tecnologiche e sociali. Il clima urbano e il suo noto fenomeno, l'isola di calore urbana (UHI), sono di grande interesse per diverse ragioni. Pertanto, negli ultimi anni sono state condotte numerose ricerche. Un focus principale è stato dato nell'analisi sulla quantificazione dell'isola di calore urbana e altri fenomeni correlati. Molti parametri giocano un ruolo significativo nella formazione del clima urbano, UHI e dell'arcipelago di calore urbano (UHA), se si analizzano le condizioni termiche interurbane. UHI e UHA sono principalmente causati da caratteristiche e flussi energetici, che dipendono fortemente dall'aumento delle superfici impermeabilizzate e dall'accumulo di calore nei materiali urbani. Due importanti fattori possono essere utilizzati per quantificare la morfologia urbana per le analisi UHI e UHA: il fattore di visibilità del cielo (SVF) e la relativa area delle superfici impermeabilizzate negli spazi urbani indicata dal fattore di impermeabilizzazione (F_v). L'impatto della SVF è particolarmente importante per quanto riguarda i tassi di raffreddamento notturno, in cui la radiazione a onde lunghe è intrappolata da superfici calde invece di essere rilasciata nell'emisfero del cielo freddo. Tale diminuzione della perdita di radiazioni a onde lunghe è direttamente correlata alla SVF e considerata una componente importante del fenomeno UHI.

Tuttavia, mentre la forma fisica della città è stata rappresentata in modelli 3D, fornendo una visualizzazione grafica degli elementi fisici della città, sono stati sviluppati altri impieghi dei modelli 3D delle città per ulteriori usi come la pianificazione delle infrastrutture, la gestione dei disastri e la domanda di energia. La città si è basata sul

GeoPortal esistente e per utilizzare molte informazioni che sono già state raccolte, attraverso queste tecnologie è possibile promuovere idee innovative e utilizzare sinergie attraverso casi d'uso specifici. Il *digital twin* può sviluppare un vantaggio completo solo se è pensato il più integrato possibile tra le varie aree di applicazione o se in una città vengono implementati diversi progetti in rete sulla base dei concetti del gemello digitale. Sebbene questo modello offra ovviamente un grande potenziale per il futuro, ci sono anche alcune limitazioni e sfide da considerare; la fattibilità è ancora in gran parte limitata a determinati campi di applicazione e una rappresentazione completa di un sistema complessivo grande e complesso (ad esempio un'intera città) in tutte le sue sfaccettature rimane per il momento visionaria. L'obiettivo è quello di essere in grado di sostenere la neutralità climatica per l'intera città di Monaco nel 2035 e sviluppare progetti per un futuro urbano e provare nella pratica soluzioni innovative per le smart city. Ridurre la domanda di energia, aumentare l'efficienza energetica e ampliare le reti di energia rinnovabile: l'approccio energetico a tre pilastri sta plasmando le azioni della città quando si tratta di pianificare nuovi quartieri e riqualificare le aree esistenti. Dopotutto, lo sviluppo urbano gioca un ruolo chiave nella lotta ai cambiamenti climatici, e Monaco vuole dare l'esempio.

Monaco di baviera									
Dominio	Livello di integrazione	Grado di automazione	Livello di maturità	Livelli chiave	Acquisizione di dati	Attuazione	Simulazione	Esperienza utente	Stakeholders coinvolti
Energia Mobilità Sicurezza Governance	Digital twin	1 input automatico 2 output semi automatico, misto. 3 Sottoprogrammi e regole di attuazione semi-automatico-misto. 4 accesso e sicurezza accesso completo.	Responsive twin	Fedeltà livello 4 Apprendimento livello 4 Intelligenza a livello 3 Autonomia a livello 3	-Agenzie governative Dati socio-economici -IoT - Sensori Dati dinamici	SI Pianificazione Mobilità intelligente	SI	Privato	Governo tedesco

4.5 TAMPERE – QUARTIERE HERVANTA: SPERIMENTAZIONE URBANA SU SCALA INTERMEDIA

Hervanta, quartiere situato a sud della città di Tampere in Finlandia, è riconosciuto come un polo di innovazione tecnologica e urbanistica. Originariamente progettato come un'area residenziale durante gli anni Settanta, Hervanta si è evoluto nel tempo fino a diventare un centro multifunzionale che ospita istituzioni accademiche, aziende tecnologiche e spazi abitativi moderni. Questo contesto dinamico ha reso Hervanta un luogo ideale per la sperimentazione e lo sviluppo di un digital twin urbano, con l'obiettivo di migliorare la pianificazione urbana e la qualità della vita.

Il progetto del *digital twin* di Hervanta è stato avviato per affrontare le sfide poste dalla crescente complessità urbana e per promuovere una gestione più sostenibile e resiliente del quartiere. Grazie alla stretta collaborazione tra il Comune di Tampere, l'Università di Tampere e numerose aziende private, il *digital twin* di Hervanta si configura come un modello avanzato per l'integrazione delle tecnologie digitali nella gestione urbana.

Il *digital twin* di Hervanta è una replica digitale dinamica del quartiere, progettata per integrare dati in tempo reale provenienti da fonti eterogenee. Utilizzando tecnologie come il *Building Information Modeling* (BIM), i sensori IoT e i modelli 3D ad alta risoluzione, questo sistema è in grado di monitorare, simulare e ottimizzare vari aspetti della vita urbana.

La piattaforma digitale è costruita attorno a un modello tridimensionale dettagliato del quartiere, che include edifici, strade, parchi e altre infrastrutture. La modellazione è stata realizzata utilizzando tecnologie di *laser scanning* e fotogrammetria, garantendo un'elevata fedeltà nella rappresentazione. I sensori IoT distribuiti nell'area raccolgono dati su traffico, consumo energetico, qualità

dell'aria e altri parametri, che vengono poi integrati nel sistema per fornire informazioni in tempo reale.

Un aspetto distintivo del *digital twin* di Hervanta è l'uso avanzato dell'intelligenza artificiale e degli algoritmi di *machine learning*. Questi strumenti consentono di analizzare grandi quantità di dati, identificare tendenze e prevedere scenari futuri, come l'impatto di nuove costruzioni o cambiamenti climatici. Inoltre, il sistema è progettato per essere interoperabile, utilizzando standard aperti che facilitano la collaborazione tra diversi attori. Particolare attenzione è stata rivolta all'ottimizzazione delle prestazioni del sistema, garantendo che il modello possa adattarsi rapidamente ai cambiamenti del contesto urbano. Il *digital twin* di Hervanta è stato implementato per supportare una vasta gamma di applicazioni pratiche, tra cui la pianificazione urbana, la gestione delle infrastrutture e la promozione della sostenibilità ambientale. Una delle applicazioni principali riguarda la simulazione di scenari futuri, che consente di valutare l'impatto di progetti infrastrutturali o politiche urbane prima della loro implementazione. Ad esempio, il sistema è stato utilizzato per ottimizzare i percorsi dei mezzi pubblici e ridurre le emissioni di carbonio, migliorando la mobilità sostenibile e riducendo la congestione del traffico.



Figura 15. Visualizzazione del quartiere Hervanta di Tampere, sulla piattaforma del digital twin. Monaco di Baviera.

Un altro aspetto fondamentale del progetto riguarda la gestione delle emergenze. Il *digital twin* permette di simulare scenari critici, come inondazioni o incendi, supportando le

autorità locali nella pianificazione di interventi tempestivi ed efficaci. Questo approccio proattivo non solo migliora la resilienza del quartiere, ma contribuisce anche a ridurre i rischi associati a eventi imprevedibili.

L'efficienza energetica è un ulteriore ambito di applicazione. Grazie ai dati raccolti dai sensori e alle simulazioni avanzate, è possibile monitorare il consumo energetico degli edifici e identificare soluzioni per ridurre gli sprechi.

La partecipazione dei cittadini è un altro elemento centrale del progetto. Attraverso una piattaforma interattiva, i residenti possono accedere al modello digitale del quartiere, fornire *feedback* e partecipare attivamente al processo decisionale. Questo approccio contribuisce a rafforzare il senso di comunità e a migliorare la trasparenza nella *governance* urbana. L'interazione tra cittadini e autorità locali rappresenta un esempio concreto di come il digital twin possa essere utilizzato per promuovere una pianificazione partecipativa.

Nonostante i successi ottenuti, il progetto del *digital twin* di Hervanta affronta diverse sfide. Una delle principali difficoltà riguarda la gestione dei dati, in particolare per quanto concerne la privacy e la sicurezza. La raccolta e l'analisi di grandi quantità di dati sensibili richiedono protocolli rigorosi e soluzioni tecnologiche avanzate per garantire la protezione delle informazioni. Inoltre, la complessità tecnica del sistema richiede competenze altamente specializzate per garantire il corretto funzionamento e l'aggiornamento continuo.

Un'altra sfida riguarda la scalabilità del modello. Sebbene il *digital twin* di Hervanta abbia dimostrato la sua efficacia a livello locale, l'espansione su scala cittadina richiede significativi investimenti in infrastrutture e risorse. Tuttavia, questa espansione rappresenta anche un'enorme opportunità per promuovere l'adozione di tecnologie innovative in altre aree di Tampere e oltre. Il successo del

modello di Hervanta potrebbe infatti servire da esempio per altre città che desiderano implementare soluzioni simili.

Le prospettive future del progetto sono entusiasmanti. L'espansione del *digital twin* a livello regionale potrebbe favorire la creazione di una rete interconnessa di gemelli digitali, aprendo nuove possibilità per la pianificazione e la gestione sostenibile. Argomento che riprenderemo nelle conclusioni, dove viene chiarita la prospettiva che si ha sulla connessione dei *digital twin*, da un livello provinciale a un gemello digitale nazionale ed europeo.

Hervanta (Tampere)									
Dominio	Livello di integrazione	Grado di automazione	Livello di maturità	Livelli chiave	Acquisizione di dati	Attuazione	Simulazione	Esperienza utente	Stakeholders coinvolti
Energia Mobilità	Digital shadow	1 input automatico. 2 output manuale, completamente personalizzato. 3 Sottoprogrammi e regole di attuazione semi-automatico, misto. 4 accesso e sicurezza accesso completo.	Responsive twin	Fedeltà livello 5 Apprendimento livello 4 Intelligenza livello 2 Autonomia livello 3	-IoT - Sensori -Dati dinamici	/	SI Test di veicoli autonomi.	Privato	Business Tampere City of Tampere VTT Tampereen Infra.

4.6 HELSINKI – QUARTIERE KALASATAMA: SMART DISTRICT E SERVIZI INTEGRATI

Helsinki, capitale della Finlandia, è una città rinomata per il suo approccio innovativo allo sviluppo urbano e per l'impegno verso la sostenibilità. Nel corso degli anni, la città ha sfruttato costantemente tecnologie avanzate, tra cui il *Building Information Modeling*, l'*Internet of Things* e l'*Artificial Intelligence*, per creare soluzioni che migliorano la qualità della vita urbana. Questi sforzi hanno trovato il loro culmine nell'implementazione della tecnologia del *digital twin*.

In particolare, l'iniziativa del *digital twin* di Helsinki nell'area di kalasatama rappresenta un esempio di come le città possano utilizzare tecnologie avanzate per affrontare

le complesse sfide urbane. Come laboratorio vivente, il distretto di Kalasatama fornisce una piattaforma per integrare dati, simulare dinamiche urbane e progettare interventi che ottimizzano l'uso delle risorse, migliorano il coinvolgimento dei cittadini e promuovono la sostenibilità ambientale.

Il *digital twin* di Kalasatama riflette l'impegno di Helsinki nell'adottare pratiche innovative per la pianificazione e lo sviluppo urbano. L'obiettivo di questa iniziativa è trasformare Kalasatama in uno dei distretti urbani più avanzati al mondo, combinando modelli virtuali con analisi di dati in tempo reale e simulazioni interattive.

Alla sua base, il *digital twin* è un modello 3D dettagliato e dinamico del distretto che integra dati provenienti da varie fonti, tra cui fotografie aeree, sistemi informativi geografici (GIS) e sensori IoT.

Tuttavia, non si limita a essere un semplice strumento di visualizzazione. Il *digital twin* di Kalasatama funge da piattaforma interattiva dove urbanisti, architetti, ingegneri e responsabili politici possono simulare scenari, testare interventi e ottimizzare progetti prima di implementarli nel mondo fisico. Questo approccio proattivo riduce i rischi, migliora l'efficienza e sostiene lo sviluppo urbano sostenibile. Uno degli aspetti più rivoluzionari del *digital twin* di Kalasatama è il suo focus sugli open data e sulla collaborazione dei cittadini. La città di Helsinki ha reso una parte significativa del modello accessibile al pubblico, consentendo a cittadini, ricercatori e sviluppatori di partecipare all'innovazione urbana. Questa apertura non solo promuove la trasparenza, ma garantisce anche che il digital twin evolva come una risorsa condivisa a beneficio di tutti gli attori coinvolti.

Il *digital twin* di Helsinki si distingue per la combinazione di sofisticazione tecnologica, applicazioni pratiche e progettazione incentrata sul cittadino. Le innovazioni

incorporate nel modello di Kalasatama ne evidenziano il potenziale trasformativo per la pianificazione urbana.

I modelli di realtà utilizzati nel *digital twin* di Kalasatama sono creati attraverso l'integrazione di migliaia di fotografie aeree ad alta risoluzione attraverso il sistema *ultracam osprey prime* a cinque telecamere (figura 16). Queste immagini vengono elaborate per formare una rappresentazione fotorealistica dell'ambiente urbano, catturando con precisione la geometria e la *texture* di edifici, strade e spazi pubblici. Questo livello di dettaglio è cruciale per architetti e urbanisti, che si affidano a visualizzazioni accurate per prendere decisioni informate.



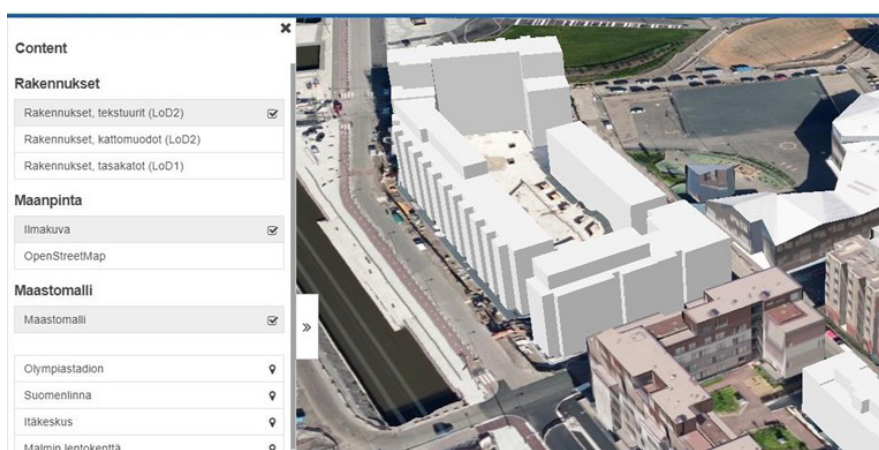
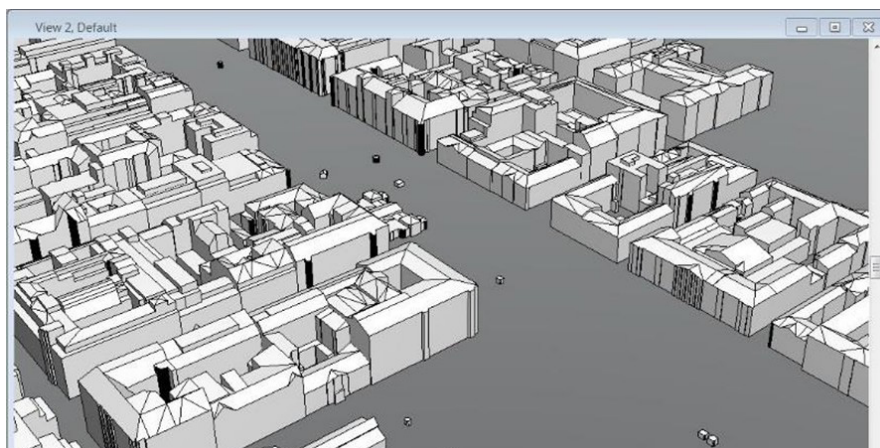
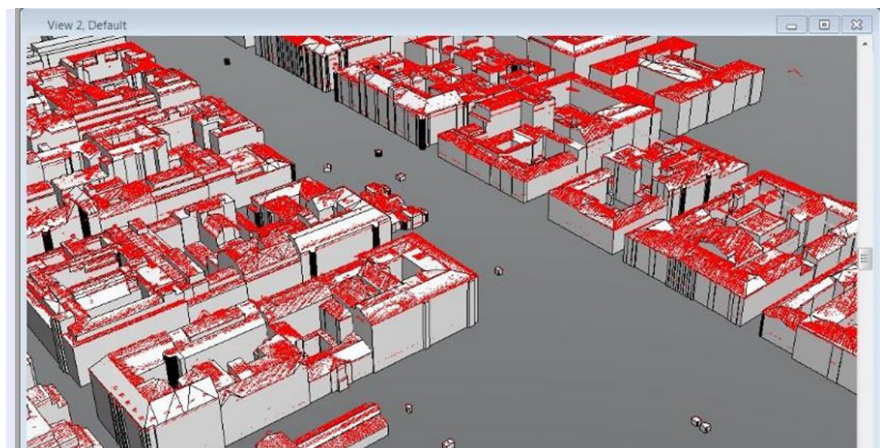
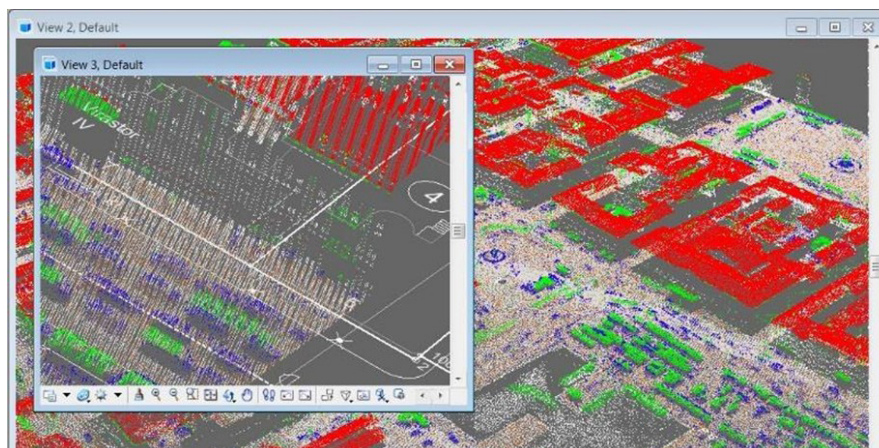
Figura 16. Sistema ultracam osprey prime II a cinque telecamere utilizzato per la fotografia aerea verticale e obliqua.

A differenza dei tradizionali modelli basati su GIS, il modello di realtà è intuitivo e accessibile, consentendo a soggetti provenienti da diversi ambiti di interagire con l'ambiente virtuale. Cercando di fornire un linguaggio comune per le discussioni, superando il divario tra esperti tecnici e non specialisti.

L'uso dello standard CityGML aggiunge un ulteriore livello di profondità al digital twin. CityGML è uno standard aperto per la modellazione e lo scambio di dati relativi a città e paesaggi urbani in 3D. Ideato per supportare la rappresentazione dettagliata e interoperabile degli elementi urbani, CityGML permette di descrivere edifici, infrastrutture, terreni e altre caratteristiche geografiche con un alto livello di dettaglio.

Figura 17.

Dall'alto verso il basso. Mappa di base e nuvole di punti. Forme del tetto degli edifici da una nuvola di punti. Geometrie degli edifici modellati dalle informazioni sulla città. Visualizzazione del browser del sito web kartta.hel.fi/3d, dove il modello di informazioni sulla città 3D viene aggiornato.



Questo standard si basa su un formato XML e consente di strutturare le informazioni spaziali secondo diversi livelli di dettaglio (*Levels of Detail* o *LoD*), da rappresentazioni semplici a rappresentazioni molto dettagliate, a seconda delle necessità dell'applicazione. Gli oggetti in un modello CityGML non sono semplici forme geometriche, ma entità semantiche che contengono informazioni aggiuntive, come l'uso del suolo, materiali di costruzione e dati sulla sostenibilità energetica.

Questa integrazione semantica supporta analisi avanzate, come valutazioni di efficienza energetica, modelli di trasporto e studi sulla resilienza delle infrastrutture. Combinando la fedeltà visiva con ricchi metadati, consentendo simulazioni urbane.

L'IoT gioca un ruolo centrale nel rendere il digital twin dinamico e reattivo. I sensori distribuiti in tutto Kalasatama raccolgono dati in tempo reale su vari aspetti della vita urbana, come flussi di traffico, qualità dell'aria, livelli di rumore e consumo energetico. Questi dati vengono integrati nel *digital twin*, trasformandolo da un modello statico a un sistema vivente che riflette lo stato attuale dell'aria oggetto d'esame.

L'integrazione dell'IoT consente agli urbanisti di monitorare in tempo reale le prestazioni delle infrastrutture cittadine e identificare i problemi man mano che si presentano. Ad esempio, i modelli di congestione del traffico possono essere visualizzati e affrontati in modo proattivo, mentre i dati sul consumo energetico possono informare strategie per ridurre le emissioni di carbonio.

Una delle funzionalità più preziose del *digital twin* è la sua capacità di simulare le condizioni ambientali. Nel distretto di Kalasatama, il modello viene utilizzato per condurre studi sul vento, analisi solari e valutazione dell'impatto climatico. Queste simulazioni aiutano i pianificatori a ottimizzare i progetti edilizi e gli assetti urbani per l'efficienza energetica

e la resilienza climatica.

Ad esempio, le simulazioni del vento (come si può vedere dalle immagini che seguono) garantiscono che i nuovi sviluppi non creino corridoi ventosi indesiderati, mentre le analisi solari massimizzano l'illuminazione naturale e riducono i costi energetici.

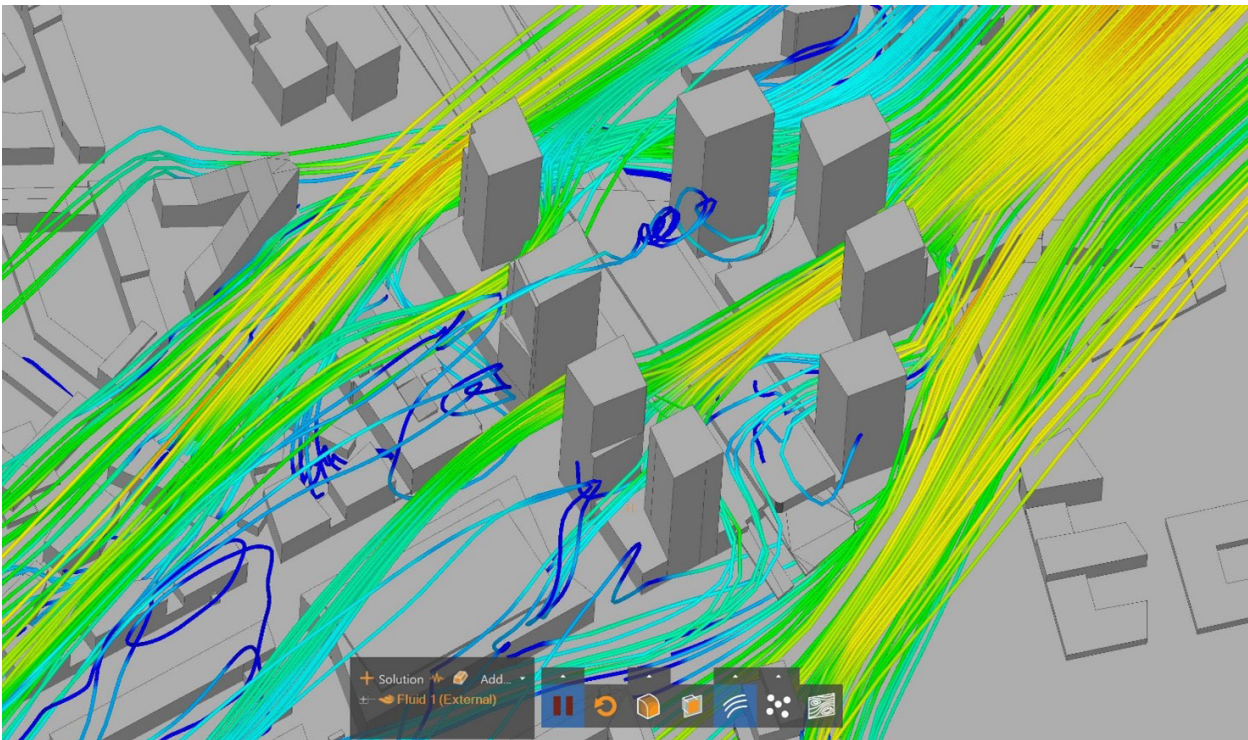
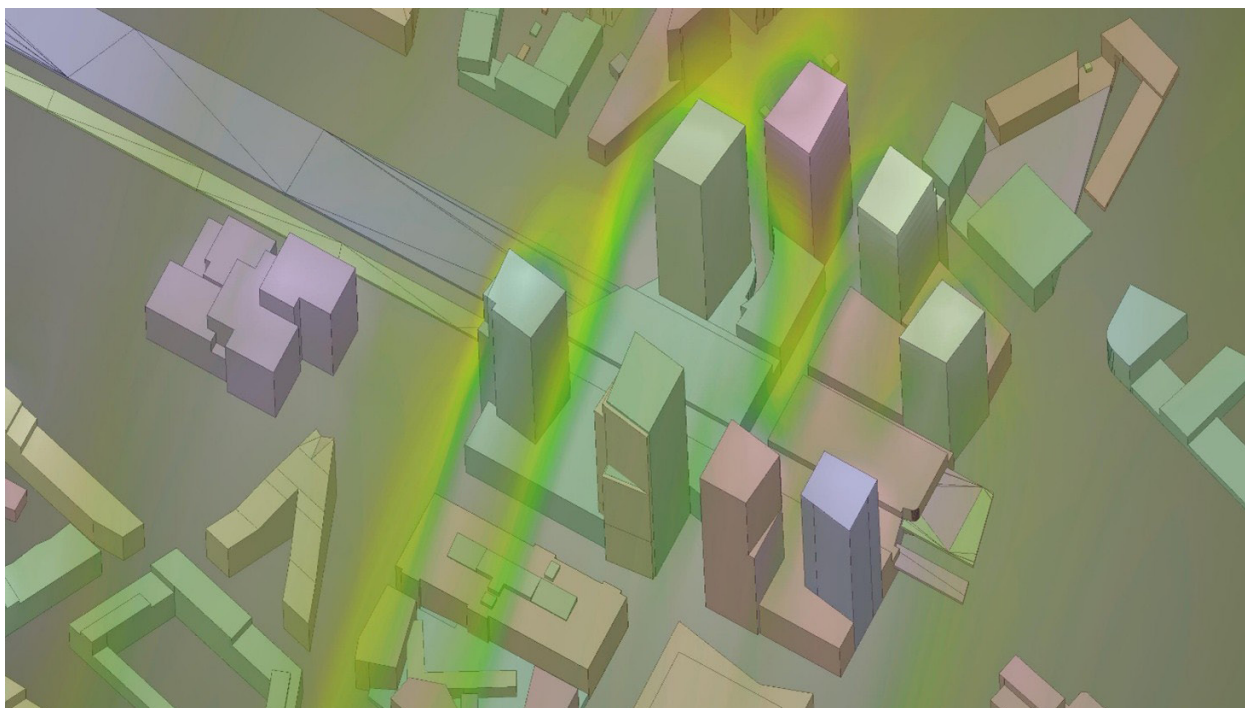


Figura 18.

Torri del Kalasatama center da nordovest, la figura mostra una vista in sezione del flusso d'aria proveniente dal bordo destro dell'immagine a un'altezza di circa 50 metri. Il vento si indebolisce quando colpisce i palazzi delle torri e provoca flussi d'aria lenti (blu scuro). Si verificano fenomeni di vortice accanto agli edifici delle torri.

Il *digital twin* di Kalasatama non è solo un risultato tecnico; rappresenta un cambiamento di paradigma nel modo in cui le città vengono progettate e gestite. Integrando tecnologie avanzate con processi partecipativi, Helsinki sta ridefinendo la relazione tra cittadini, responsabili politici e ambiente urbano.

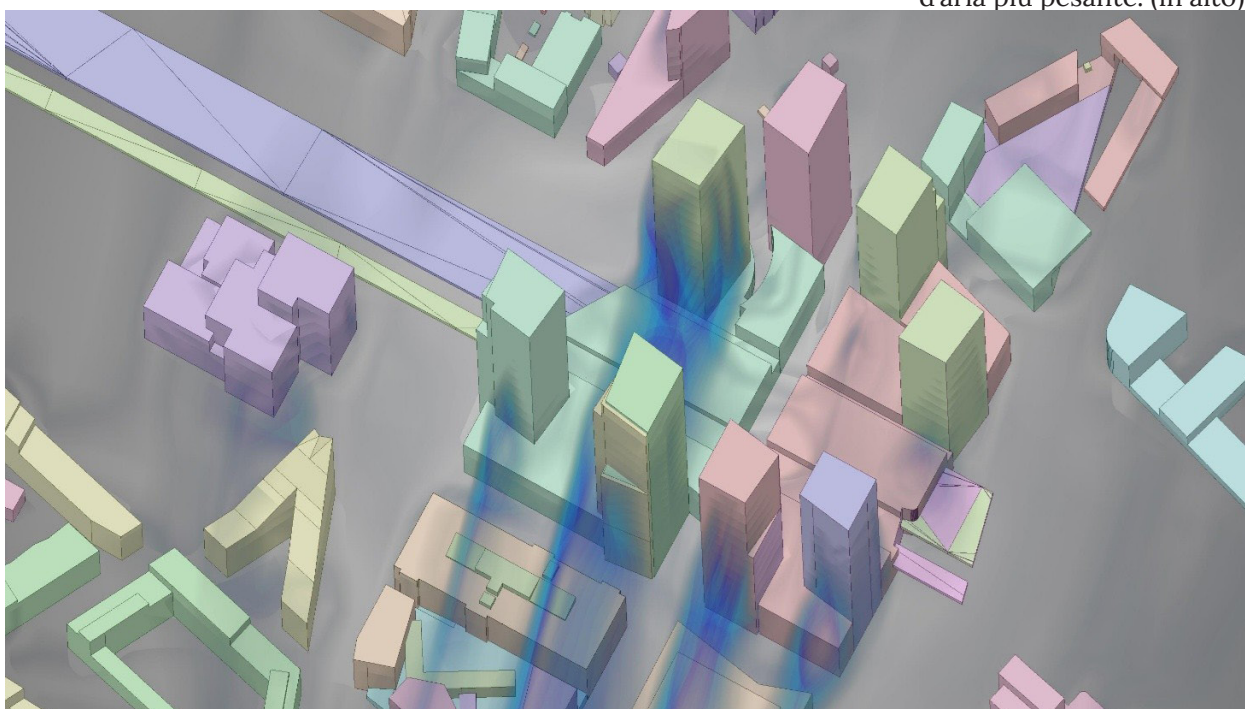
Il *digital twin* è progettato per essere accessibile al pubblico, offrendo un'opportunità senza precedenti per i cittadini di interagire con la pianificazione urbana. I residenti possono visualizzare i progetti proposti, fornire *feedback* e partecipare attivamente alla definizione dei loro quartieri. Questo approccio partecipativo l'ulteriore scopo di aumentare la fiducia e promuove un senso di appartenenza nella comunità.

**Figura 20.**

Le torri del centro di Kalasatama da nord-ovest con un vento da sud che soffia a 15 m/s. I venti mostrati nell'immagine sono comprese tra 1 m/s e 4 m/s. Ci sono sia vortici che aree più miti dietro le torri di Kalasatama. (in basso)

Figura 19.

Le torri del centro di Kalasatama da nord-ovest con il vento che soffia a 15 m/s da sud. I venti nell'immagine sono compresi tra 9 m/s e 13 m/s. L'aria che scorre tra i blocchi delle torri di Kalasatama viene incanalata in un flusso d'aria più pesante. (in alto)



La decisione di Helsinki di condividere i dati del *digital twin* ha catalizzato l'innovazione in diversi settori. I ricercatori utilizzano i dati per esplorare nuove teorie urbane, mentre gli sviluppatori creano applicazioni per l'ottimizzazione dei trasporti, esperienze di realtà aumentata e molto altro. L'ecosistema collaborativo che circonda il *digital twin* garantisce che i suoi benefici vadano ben oltre i confini del distretto di Kalasatama.

Il design modulare del *digital twin* di Kalasatama lo rende una soluzione scalabile che può essere applicata ad altre aree di Helsinki o replicata in altre città. Adottando standard come CityGML e promuovendo l'interoperabilità, Helsinki ha creato un modello per lo sviluppo delle città intelligenti adattabile a diversi contesti.

Il *digital twin* di Kalasatama a Helsinki esemplifica il potenziale trasformativo della tecnologia nello sviluppo urbano. Combinando visualizzazioni fotorealistiche, modellazione semantica, dinamiche basate sull'IoT e design partecipativo, il progetto stabilisce un nuovo standard per le iniziative delle città intelligenti. Le innovazioni introdotte, come l'uso di CityGML e le dinamiche alimentate dall'IoT, dimostrano il potenziale dei *digital twin* nell'affrontare le complesse sfide urbane e migliorare la qualità della vita.

Kalasatama (Helsinki)									
Dominio	Livello di integrazione	Grado di automazione	Livello di maturità	Livelli chiave	Acquisizione di dati	Attuazione	Simulazione	Esperienza utente	Stakeholders coinvolti
Energia Mobilità	Digital shadow	1 input automatico. 2 output semi-automatico, misto. 3 Sottoprogrammi e regole di attuazione semi-automatico, misto. 4 accesso e sicurezza accesso completo.	Adaptive twin	Fedeltà livello 5 Apprendimento livello 4 Intelligenza livello 2 Autonomia livello 3	- Sensori - Dati dinamici	SI Sondaggio GIS di partecipazione pubblica (PPGIS)	SI Simulazione energetica/solare/vento. Test di veicoli autonomi.	Pubblico Piattaforma web: https://kartta.hel.fi/3d/#/	Smart Kalasatama.

4.7 ROTTERDAM: RESILIENZA URBANA E INFRASTRUTTURE DIGITALI COMPLESSE

La città olandese di Rotterdam è il porto più grande d'Europa e uno dei centri marittimi più importanti del mondo. Spesso definita la “Porta dell'Europa”, la città si trova nel delta del Reno ed è stata per secoli un importante centro commerciale. L'obiettivo espresso nel programma di adattamento ai cambiamenti climatici della città è quello di diventare una città sostenibile, dal punto di vista ambientale e sociale entro il 2050.

Per raggiungere questo obiettivo si avvale della Rotterdam *Climate Adaptation Strategy*⁸⁰ dove ci sono i principi guida per tutti i progetti: fare affidamento su un sistema solido, garantire adattamento e resilienza, lavorare insieme e collegarsi ad altri progetti nella città e creare valore aggiunto per l'ambiente, la società, l'economia e l'ecologia. La città olandese è stata all'avanguardia nello sviluppo di piani di adattamento ai cambiamenti climatici. Nel 2008, il consiglio comunale di Rotterdam ha ratificato il programma Rotterdam I, che consiste in tre attività principali: sviluppo della conoscenza, attuazione di misure di adattamento ai cambiamenti climatici e presentazione di Rotterdam a livello internazionale come una città innovativa. La resilienza ai cambiamenti climatici a Rotterdam comporterà innanzitutto una protezione sostenibile contro le inondazioni nelle aree all'interno e all'esterno degli argini. Oltre alla gestione delle inondazioni, la città dovrà concentrarsi anche su altri modi per prepararsi alle conseguenze del cambiamento climatico, come tassi di incidenza più elevati delle ondate di calore, aumento delle precipitazioni abbondanti, salinizzazione delle acque sotterranee, modifica delle opzioni di trasporto

⁸⁰ Definisce il percorso per prepararsi agli effetti inevitabili dei cambiamenti climatici e diventare resiliente ai cambiamenti climatici entro il 2050.

via acqua e aumento della volatilità dei livelli delle acque sotterranee. Ciò che è essenziale per una strategia adattiva è che sia implementata in modo proattivo e che possa essere adattata alle mutevoli circostanze. La Rotterdam climate adaptation strategy (RAS) definisce chiaramente le misure che possono essere adottate per rendere l'area a prova di clima. Rotterdam aveva già implementato una serie di misure efficaci, come un robusto sistema di dighe, barriere contro le inondazioni e un sistema idrico con fognature, canali, stagni e pompe. Alcune delle nuove soluzioni che sono state implementate in città sono: lo stoccaggio dell'acqua extra in nuovi edifici, le piazze d'acqua, i tetti verdi, un centro di conoscenza per edifici galleggianti e misure di protezione dalle inondazioni per edifici e aree esterne. La sfida del cambiamento climatico è incentrata principalmente sull'acqua. Rendere quest'area a prova di cambiamenti climatici è quindi fondamentale. Inoltre, gran parte della città si trova sotto il livello del mare ed è quindi a rischio di inondazioni. L'innalzamento del livello del mare non è l'unica sfida legata all'acqua; Rotterdam, infatti, affronta le questioni idriche su quattro fronti: dal mare, dai fiumi, dal cielo e dal sottosuolo. Rotterdam ha un collegamento aperto con il mare, quindi l'innalzamento del livello del mare colpisce l'infrastruttura portuale della città, ma anche alcune aree residenziali che non sono protette da dighe. La priorità principale sulla diga esterna è di multi protezione contro le inondazioni a strati basata sulla costruzione adattiva e sulla progettazione. La protezione di Rotterdam, tuttavia, si concentra sulla prevenzione: saranno ottimizzate le barriere per contrastare la mareggiata e, ove necessario, le dighe saranno rinforzate. All'interno delle dighe, la funzione spugna della città sarà ripristinata attuando misure per catturare e immagazzinare l'acqua piovana dove cade e per ritardare il drenaggio. Queste misure includono tetti e facciate verdi, meno pavimentazione e più flora nelle strade pubbliche e nei

quartieri, piazze d'acqua e zone di infiltrazione come parte dell'infrastruttura. Queste misure saranno particolarmente efficaci in zone densamente abitate ed edificate con poco spazio aperto. In quelle parti della città dove c'è più spazio, misure robuste come l'aumento dello stoccaggio dell'acqua, capacità di canali e laghi e costruzione di corridoi verde-blu contribuiranno in modo significativo a rendere la città a prova di clima. Inoltre, si prevede che le precipitazioni estreme diventeranno più frequenti, quindi, gestire i flussi d'acqua e avere il controllo è di fondamentale importanza. Rotterdam ha sperimentato progetti nello spirito della sua strategia di adattamento a quattro livelli:

- Per le aree esterne della diga, sono stati sviluppati padiglioni galleggianti e persino alberi che possono muoversi su e giù con il livello dell'acqua.
- Nel centro della città è stata costruita una piazza dell'acqua che è pensata come luogo di incontro del quartiere e come luogo per attività sociali e culturali, ma funziona anche come un grande deposito di acqua in caso di precipitazioni estreme.
- In un'area interna alla diga, a una certa distanza dalla città, lo sviluppo di un deposito d'acqua è stato combinato con un nuovo percorso di canottaggio.
- In uno dei parchi di Rotterdam, chiamato *Zuiderpark*, è stato creato più spazio per le acque superficiali, ampliando la capacità di stoccaggio dell'acqua, migliorando contemporaneamente la qualità ambientale e offrendo nuove opportunità di svago e di ricreazione.

Gli olandesi sono leader mondiali nello studio dei fluidi, ed in particolar modo nella gestione portuale, ora approfondiremo in che modo viene digitalizzato il porto, attraverso il *digital twin*.

Il porto di Rotterdam prevede espansione fisica,

infrastrutturale e digitale nei prossimi anni, intensificando e migliorando l'approccio progettuale e lavorativo (Figura 21). Copre un'area di oltre 41 miglia quadrate. Impiega quasi 400.000 persone considerando l'indotto e serve quasi 30.000 navi marittime ogni anno. È un porto storico che iniziò nel 1360 per servire il traffico marittimo tra Paesi Bassi, Inghilterra e Germania. Eppure, nonostante la sua veneranda età, nel 2017 il *World Economic Forum* ha definito la sua infrastruttura portuale la migliore del mondo^{81 82}.

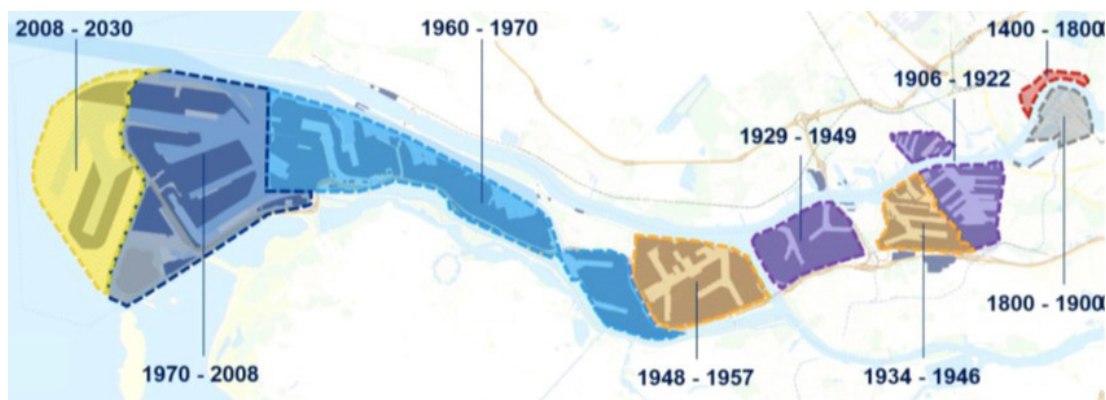


Figura 21. Espansione cronologica del porto. Fonte: Port of Rotterdam

Una varietà di agenzie governative ha partecipato allo sviluppo di un piano per il progresso “Port Vision 2030”, il quale stabilisce dove è necessario agire per garantire che le aziende possano operare in modo ottimale all'interno del global hub e all'interno del cluster industriale europeo. Il piano definisce e misura dieci fattori principali per il progresso infrastrutturale del porto, attraverso un approccio visionario e collaborativo si impegna a diventare il primo porto digitale entro il 2030.

Lo scalo, luogo in cui centinaia di parti si riuniscono e lavorano insieme per portare le merci da un punto A ad un punto B nel modo più efficiente, rapido e sicuro possibile, ha come obbligo quello di funzionare come un orologio, non dando spazio a progetti sperimentali. A tal fine l'intento è quello di creare un gemello digitale del porto di Rotterdam,

81 Porto di Rotterdam. (2019).

82 Porto di Rotterdam. (2021).

dove avere un costante aggiornamento dello stato di fatto e inserire progetti futuri, relazionando i nuovi progetti con i dati attuali e avere una visione chiara e consapevole di vantaggi e problematiche.

Il progetto nasce da una collaborazione che comprende Rotterdam Port Authority, Axians, Cisco, IBM e altri *stakeholder* secondari. Indaghiamo di seguito le principali iniziative intraprese dall'autorità portuale di Rotterdam, ritenuta leader europea e mondiale nella gestione dei porti, per instaurare un approccio al gemello digitale.

I *partner* hanno lavorato insieme per fornire una piattaforma *Internet of Things*. L'Autorità portuale utilizza una piattaforma *Internet of Things cloud* per raccogliere ed elaborare dati tramite una combinazione di 44 sensori dislocati in tutto il porto, ricevendo informazioni in tempo reale in merito a: temperatura dell'aria, altezza della marea, velocità del vento, umidità, torbidità e salinità dell'acqua oltre a flusso e livelli dell'acqua, maree e correnti, pareti intelligenti della banchina e boe, consentendo il miglioramento dei propri servizi, fornendo modelli di previsione dati da Rijkswaterstaat. Ciò consente di contribuire alla riduzione dei tempi di attesa e all'ottimizzazione dei tempi di attracco, carico/scarico e partenza. Viene previsto con maggiore precisione il momento adatto per l'ormeggio e la partenza, a seconda delle condizioni delle maree, garantendo al tempo stesso i massimi carichi e livelli di sicurezza.

La gestione del porto è agevolata da una serie di sistemi digitali, come l'HaMIS, sistema informativo per la gestione dei porti (*Haven Management Informatie Systeem*, HaMIS) sistema centrale per il regolamento amministrativo, la guida e l'ispezione degli scali portuali. Sia Rotterdam che Amsterdam utilizzano questo sistema, facilitando lo scambio di informazioni. HaMIS è stato creato con un approccio interattivo che consente agli utenti di pianificare, monitorare ed elaborare tutto il traffico marittimo.

PortMaps, versione digitale della carta geografica dell'area portuale di Rotterdam. Gli utenti ottengono l'accesso a tutte le informazioni rilevanti su una posizione specifica, su una zona commerciale o ambientale, contratti, specifiche ed elaborati grafici, che si tratti di rapporti di manutenzione o una sezione del fondale, profondità dell'acqua, e distanze portuali (Fig. 22).



Figura 22. Previsioni meteorologiche e previsioni marine in tempo reale. Fonte: Port of Rotterdam.

Altro aspetto innovativo è la gestione e la manutenzione delle banchine, decisivo per la realizzazione di un porto intelligente. L'80% delle banchine del porto di Rotterdam è al termine della sua vita tecnica, diventa quindi fondamentale la gestione e la manutenzione. Port of Rotterdam gestisce 89 chilometri di banchine, monitorando, attraverso un'ispezione satellitare, l'intero porto ogni 11-22 giorni, ed effettuando misurazioni terrestri quando un oggetto non è correttamente visibile dal satellite attraverso misurazioni LiDAR. Partendo dal progetto pilota, quello sviluppato in collaborazione con Straatman BV, Zwijndrecht, applicato lungo la banchina del terminal Hutchison Ports ECT Delta sul Maasvlakte, si intende applicare lo stesso metodo alle altre banchine e nei casi di maggiore rischio dotare le banchine di dissuasori intelligenti.

I dissuasori intelligenti misurano la forza sulle cime di ormeggio consentendo di rilevare il carico in tempo reale. Quando la forza viene applicata a un dissuasore, questo si

muove leggermente inviando i risultati all'autorità portuale. Misurando lo sforzo sulle cime di ormeggio, il dissuasore, fornisce un quadro più chiaro di quali imbarcazioni possono attraccare e a quali banchine, aumentando oltre la sicurezza, la durata e le performance, ottimizzando i costi di manutenzione (Figura 23).

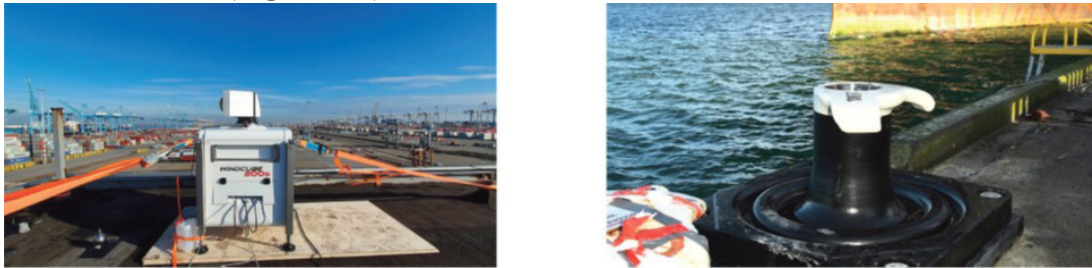


Figura 23.

Scanner LiDAR nel porto di Rotterdam; Dissuasore intelligente. Insieme a Straatman BV, l'autorità portuale ha sviluppato il dissuasore intelligente. Il dissuasore misura la forza sulle cime di ormeggio consentendo di monitorare il carico in tempo reale.

Lo scopo delle iniziative di *port of Rotterdam*, oltre a garantire uno sviluppo sostenibile, con maggiore sicurezza ottimizzando risorse fisiche ed economiche, è quello di creare un gemello digitale con l'intento di raccogliere e gestire un gran numero di dati. Questo per assicurare, entro il 2030, che le imbarcazioni a guida autonoma possano attraccare nel porto. I dati svolgono un ruolo cruciale, perché una nave non può vedere fisicamente il porto, ma può essere guidata solo tramite punti dati. Gli studi mostrati hanno portato vantaggi sull'approccio del *digital twin*, facendo emergere una forte applicazione dell'uso dell'IoT e della necessità di un rilievo dinamico capace di comunicare con le diverse figure con cui si interfaccia, utilizzando modi diversi di rappresentazione.



Figura 24.

Piattaforma web open data per la visualizzazione del digital twin della città di Rotterdam.

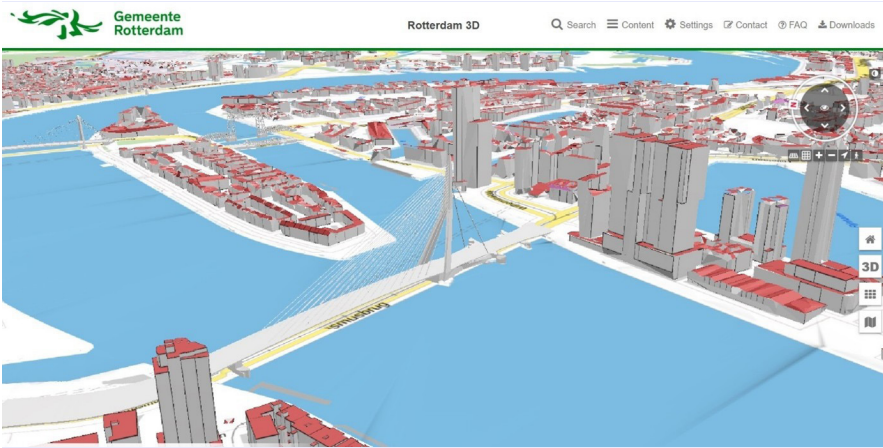


Figura 25. Container 42, container in giro per il mondo per due anni (2019-2022) al fine di raccogliere e fornire informazioni sulle sfide affrontate durante il trasporto e la logistica e contribuiscono allo sviluppo del gemello digitale.



Rotterdam										
Dominio	Livello di integrazione	Grado di automazione	Livello di maturità	Livelli chiave	Acquisizione di dati	Attuazione	Simulazione	Esperienza utente	Intelligenza artificiale	Stakeholders coinvolti
Energia Mobilità Governance Pianificazione urbana Resilienza idrica	Digital twin	1 input automatico. 2 output semi automatico, misto. 3Sottoprogrammi e regole di attuazione manuale, completamente personalizzato. 4 accesso e sicurezza accesso completo.	Adaptive twin	Fedeltà livello 5 Apprendimento livello 3 Intelligenza livello 2 Autonomia livello 3	- Sensori -Progetti BIM/CAD Dati dinamici	SI Analisi dei consumi energetici, gestione delle infrastrutture.	SI Effetti delle nuove costruzioni. Inondazione urbana.	Pubblico Piattaforma web: https://www.3drotterdam.nl/	SI Migliorare il processo di pianificazione urbana.	Governo Olandese, città di Rotterdam

4.8 SINGAPORE: DIGITAL TWIN NAZIONALE E GOVERNANCE AVANZATA

La Repubblica di Singapore, anche conosciuta come la Città del Leone, è una delle principali città-stato globali. È svantaggiata in termini di posizione geografica, in quanto si trova a solo un grado a nord dell'equatore dove è costantemente caldo e umido tutto l'anno, ed è priva di risorse naturali, infatti, non ha depositi energetici, foreste e nemmeno fattorie; tuttavia, la città è diventata un commercio globale, un'economia asiatica basata sul commercio estero e sul suo pool qualificato di capitale umano. Mentre varie città in tutto il mondo stanno sperimentando il concetto di *smart city* facendo uso di tecnologie per affrontare un'ampia gamma di sfide urbane, Singapore ha una visione più ambiziosa e globale. Pertanto, l'indice *smart city index* 2021, che fa una graduatoria di 102 città in tutto il mondo in base alla loro capacità di integrare tecnologie intelligenti per migliorare la qualità della vita dei loro residenti, ha classificato Singapore al primo posto come la città più intelligente.



Figura 26.
Vista della città di
Singapore.

La ricerca è un fattore chiave per migliorare la comprensione della scienza del clima in modo da poter sviluppare misure di adattamento efficaci. La conoscenza del clima regionale e locale è essenziale per costruire la resilienza, poiché ci troviamo in un'area ad alto rischio per gli effetti dei cambiamenti climatici. Questo è il motivo per cui si stanno ampliando le competenze nelle scienze climatiche e meteorologiche all'interno del Meteorological Service Singapore (MSS) e degli istituti di ricerca locali e creando partnership con esperti internazionali.

Proteggere la costa di Singapore e migliorare il drenaggio è una delle priorità nell'affrontare gli effetti del cambiamento climatico. Per far fronte all'innalzamento del livello del mare a lungo termine, il livello minimo di bonifica a Singapore è stato aumentato da 3 metri a 4 metri sopra il Singapore Height Datum⁸³ nel 2011.

Gli sforzi attuali per difendere le aree costiere dall'erosione includono la costruzione di muri e argini in pietra che coprono dal 70% all'80% della costa. Il *Coastal Adaptation Study* (CAS) è stato commissionato per valutare i potenziali impatti dell'inondazione costiera in possibili scenari di cambiamento climatico e per studiare possibili misure di adattamento a lungo termine. Il governo sta esaminando i risultati del CAS per sviluppare strategie a lungo termine per proteggere le coste di Singapore, mentre le istituzioni locali stanno collaborando alla ricerca sulle misure di protezione naturale delle coste come l'uso di piante come mangrovie e alghe come barriere naturali alle inondazioni. Sebbene le piante forniscano una protezione naturale dagli effetti del cambiamento climatico, sono anche vulnerabili ai suoi effetti. Questo perché il cambiamento climatico altera i processi naturali del nostro ecosistema come la formazione

83 I Singapore Height Datum (SHD) è il dato verticale all'altezza di 0,0 metri che la Singapore Land Authority ha introdotto nel 2015 per la standardizzazione nel settore delle costruzioni.

del suolo, lo stoccaggio dei nutrienti e l'assorbimento dell'inquinamento, ciò può influire sulla capacità delle barriere naturali di mitigare le inondazioni e le maree.

Il cambiamento climatico può influenzare l'approvvigionamento idrico, poiché l'aumento dell'intensità delle precipitazioni potrebbe sopraffare il sistema di drenaggio e creare inondazioni, mentre il clima secco ridurrà la disponibilità di acqua del bacino idrico locale per l'approvvigionamento. Per questo adottare misure appropriate per garantire la sostenibilità delle risorse idriche è una priorità assoluta per l'agenzia nazionale per l'acqua di Singapore (PUB), che ha istituito quattro rubinetti nazionali per soddisfare le esigenze idriche. PUB si impegna quindi a garantire un approvvigionamento idrico diversificato e sostenibile attraverso i rubinetti nazionali e a sviluppare le capacità di produzione di acqua, tra cui *NEWater* e *Desalinated water*, per soddisfare la futura domanda di acqua che aumenterà inesorabilmente.

Con il cambiamento climatico, gli eventi piovosi potrebbero aumentare di frequenza e intensità. Attraverso l'approccio *Source-Pathway-Receptor*, gli interventi non vengono effettuati solo lungo il percorso, ad esempio attraverso allargamenti e approfondimenti di dreni e canali, ma anche attuati presso la sorgente dove si genera il deflusso delle acque meteoriche e al ricettore dove possono verificarsi allagamenti, ad esempio attraverso i livelli della piattaforma, la protezione della cresta e le barriere contro le inondazioni. Questo approccio è sostenibile poiché la gestione delle acque piovane è affrontata in tutte le parti del sistema di drenaggio, con i proprietari e gli sviluppatori degli edifici che svolgono un ruolo nella gestione dell'impatto dei loro sviluppi sui rischi di alluvione.

Gli sviluppatori di siti nuovi e riqualificati sono tenuti a implementare misure in loco, come serbatoi di detenzione, tetti verdi, giardini pluviali o stagni di ritenzione per

rallentare il flusso di acqua piovana scaricata dai loro sviluppi nel sistema di drenaggio pubblico.

Un altro fattore da prendere in considerazione è l'effetto urban heat island che aggraverà il riscaldamento climatico. Per questo Singapore sta adottando delle strategie per mantenere il comfort termico:

- Utilizzo di strumenti di modellazione microclimatica nella pianificazione di nuove città e complessi residenziali per rafforzare i principali corridoi del vento, ottimizzare il *layout* e l'orientamento dell'edificio per una migliore ventilazione naturale e identificare potenziali punti critici per una migliore collocazione del verde;
- Aumentare la copertura vegetale riservando terreni per parchi e aree naturali, incorporando la piantumazione lungo le strade, oltre a richiedere nuovi sviluppi in aree ad alta frequentazione per incorporare aree minime di sostituzione del verde.

Poiché la stragrande maggioranza delle emissioni di carbonio proviene dalla combustione di combustibili fossili per l'energia, il modo più diretto per la mitigazione delle emissioni è ridurre l'uso di combustibili fossili. Singapore ha compiuto il passo successivo passando dall'olio combustibile ad alta intensità di carbonio al gas naturale, che ha un contenuto di carbonio inferiore per unità di elettricità generata. Pertanto, il miglioramento dell'efficienza energetica è un obiettivo chiave per ridurre le emissioni a Singapore.

L'*Energy Efficient Program Office (E²PO)* è stato istituito nel 2007 per promuovere miglioramenti dell'efficienza energetica nei vari settori dell'economia. Sono infatti in corso di attuazione misure in tutti i settori chiave: produzione di energia, industria, trasporti, edilizia e abitazioni, nonché gestione dell'acqua e dei rifiuti. Innanzitutto, i cittadini possono aiutare nell'azione contro il cambiamento climatico

avendo una casa efficiente dal punto di vista energetico, acquistando elettrodomestici ad alta efficienza energetica e adottando abitudini di risparmio energetico. Il governo ha implementato diverse iniziative per consentire ai proprietari di casa di fare scelte migliori e influenzare il comportamento di utilizzo. Gli edifici esistenti possono essere adattati per incorporare progetti ecologici e aumentare la loro efficienza energetica, ad esempio con i sensori intelligenti incorporati all'interno degli edifici, come i sistemi di illuminazione che rilevano il movimento e si regolano automaticamente.

Per un uso più efficiente dell'energia, l'*Intelligent Energy System* (IES) tenta di migliorare le operazioni di rete e facilitare la partecipazione attiva tra i consumatori. I contatori intelligenti dotati di capacità di comunicazione svolgono un ruolo particolarmente importante nel consentire al sistema di essere un canale a due vie, forniscono infatti, sia ai consumatori che al gestore della rete, informazioni su quanta elettricità stanno utilizzando⁸⁴.

La produzione di energia è una delle principali fonti di emissioni di carbonio per questo con la capacità limitata di attingere a risorse energetiche alternative, a Singapore si fa affidamento sui combustibili fossili importati per alimentare la Nazione. Dal 2000 è aumentata la percentuale di gas naturale utilizzata nella generazione di elettricità dal 19% a oltre il 95% di oggi. Tra tutti i combustibili fossili, il gas naturale produce la minor quantità di emissioni di carbonio per unità di elettricità e così si è ridotta la quantità di carbonio che rilasciata nell'atmosfera.

Tralle opzioni energetiche alternative a disposizione, l'energia solare offre l'opportunità più promettente per Singapore. Per accelerare la diffusione del solare, è stato lanciato il programma *SolarNova*. Singapore mira a distribuire almeno 2 GWp di solare entro il 2030, equivalenti al fabbisogno

annuo di elettricità di circa 350.000 famiglie a Singapore. Anche la capacità fotovoltaica installata e connessa alla rete a Singapore è cresciuta in modo significativo. Questo contributo viene fornito tramite le 4.000 installazioni in tutta Singapore nel settore privato non residenziale, nel settore pubblico e negli immobili residenziali.

Il cuore dell'innovazione nel settore della mobilità a Singapore è il sistema *vehicle to everything*. Oltre alle automobili a guida autonoma che sono in fase di test e dovrebbero diventare lo standard a partire dal 2025, si sta sperimentando la comunicazione da veicolo a veicolo e tra veicolo e infrastrutture: mentre la prima servirà soprattutto per le auto che si guidano da sole, è la seconda che rappresenta fin da subito il salto *hi-tech*. Dialogando con i semafori si può rendere più semplice la gestione del traffico o essere avvisati in anticipo della presenza di un pedone, e in caso di emergenza è molto più semplice aprire un varco nel traffico per il veicolo di soccorso. La città ha implementato un sofisticato *Intelligent Transport System* (ITS) per migliorare il flusso del traffico e mantenere la sicurezza.

Figura 27.
Intelligent Trasport
System di Singapore.
Fonte: Asiaone.com.



Singapore prevede di ridurre le emissioni passando a veicoli a energia più pulita, per questo i veicoli con motore a combustione interna saranno gradualmente eliminati entro il 2040. Per supportare la crescita dei veicoli elettrici,

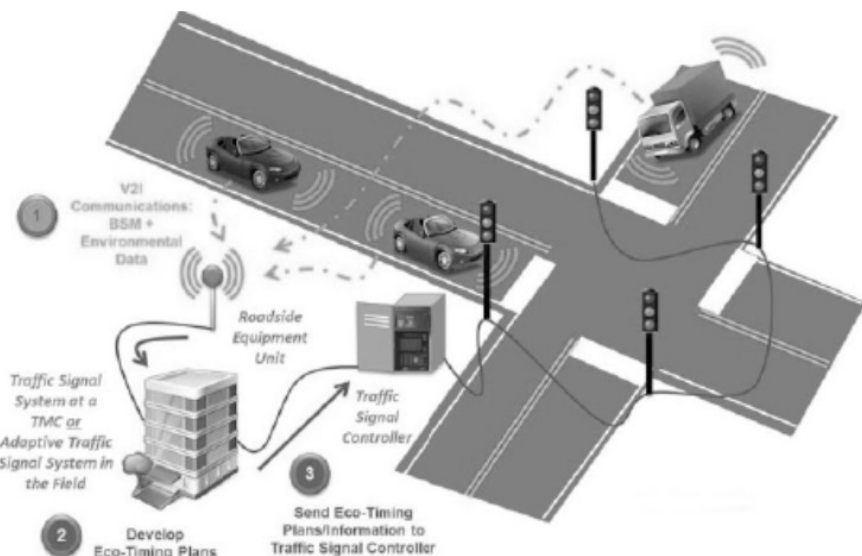
il governo punta a installare 60.000 punti di ricarica nei parcheggi pubblici e privati locali entro il 2030. Inoltre, si stanno potenziando le strutture di trasporto esistenti per renderle più rispettose dell'ambiente e progettando nuove strutture sostenibili per il trasporto stradale, aeroportuale e portuale, incorporando caratteristiche e tecnologie efficienti dal punto di vista energetico e di riduzione del carbonio.

One.Motoring è il portale completo che serve tutti i conducenti e proprietari di veicoli a Singapore: su questo portale web, i cittadini possono accedere alle informazioni sul traffico raccolte dalle telecamere di sorveglianza installate su strade. Attraverso *traffic smart*, i conducenti sono in grado di visualizzare istantanee delle strade scattate a intervalli di 5 minuti, per motivi di sicurezza i video in movimento in tempo reale o i primi piani non vengono forniti online. Questo servizio fornisce inoltre informazioni sui lavori stradali, immagini del traffico delle principali autostrade, notizie sul traffico, mappe, indicazioni stradali e informazioni sui parcheggi ed offre anche informazioni e indicazioni ai cittadini per quanto riguarda l'acquisto, la vendita e la manutenzione dei propri veicoli. *Your Speed Sign* è un dispositivo elettronico intelligente e attivo che visualizza la velocità in tempo reale dei veicoli e avvisa i conducenti se stanno violando il limite di velocità. Incoraggia quindi i conducenti a rimanere al di sotto del limite e a migliorare la sicurezza sulle strade.

La *Land Transport Authority* (LTA) utilizza telecamere di sorveglianza per rilevare gli incidenti stradali: quando viene rilevato un incidente, LTA attiva la squadra di recupero del veicolo che mira a raggiungere il sito in circa 15 minuti per trainare il veicolo fino al parcheggio designato più vicino all'esterno della superstrada.

Il *Parking Guidance System* fornisce invece ai conducenti informazioni in tempo reale sulla disponibilità di parcheggio,

Figura 28.
Traffic Management
System di Singapore.
Fonte: Nhighwaytravel.
blogspot.com.



ciò riduce la quantità di traffico circolante alla ricerca di spazi disponibili e favorisce un uso più efficiente dei parcheggi esistenti. È stato anche installato un nuovo sistema centralizzato che determina la posizione degli autobus in tempo reale e quindi fornisce informazioni accurate sugli arrivi degli autobus pubblici. I pendolari, in questo modo, sono in grado di visualizzare le informazioni sulla disponibilità di spazio per aiutarli a decidere se salire a bordo dell'autobus in arrivo o scegliere di salire sul prossimo. La strategia globale di gestione dei rifiuti mira a ridurre le emissioni dai rifiuti attraverso le 3R (ridurre, riutilizzare e riciclare) ed incenerendo i rifiuti rimanenti negli impianti di termovalorizzazione, che è preferibile allo smaltimento in discarica poiché l'interramento diretto dei rifiuti produce metano, un gas serra. Il governo mira così a migliorare l'attuale tasso di riciclaggio dal 59% al 70% entro il 2030. Lo sviluppo integrato dell'impianto di recupero delle acque e dell'impianto di gestione integrata dei rifiuti mira a massimizzare il recupero di energia e risorse nei processi di trattamento dei rifiuti solidi e delle acque usate. Il biogas, prodotto dalla co-digestione di rifiuti alimentari e fanghi idrici usati, sarà utilizzato per generare energia elettrica che verrà utilizzata per il funzionamento dell'impianto autosufficiente dal punto di vista energetico. I contenitori

per rifiuti sono stati introdotti come parte del programma di gestione intelligente dei rifiuti. I monitor di rilevamento, attaccati ai coperchi dei cassonetti, raccolgono informazioni sul contenuto e sulla posizione e questo viene notificato a un team della spazzatura attraverso un server centrale. Questo aiuta il team di raccolta a ottimizzare la pianificazione del percorso e, allo stesso tempo, a mantenere costantemente puliti gli spazi pubblici. Singapore è la terza città più sicura al mondo secondo il rapporto dell'*Economist Intelligence Unit*⁸⁵.

Singapore Police Force ha obiettivi specifici di impegno di servizio per operare in modo efficiente: la polizia fornisce anche un centro elettronico sul web per consentire ai cittadini di raccogliere comodamente informazioni, archiviare rapporti di polizia online e gestire questioni amministrative. La Singapore Civil Defense Force (SCDF) è un'organizzazione supervisionata dal Ministero degli affari interni del governo, che fornisce servizi antincendio, di soccorso e di emergenza medica. L'*Emergency Medical Service* (EMS) è gestito dall'SCDF ed è raggiungibile tramite il numero a tre cifre ma anche tramite l'applicazione mobile che è stata progettata per aumentare il tasso di sopravvivenza da incidenti come l'arresto cardiaco extraospedaliero. Un altro aspetto importante dell'iniziativa *Smart Nation* è la telemedicina: Singapore mira a promuovere l'uso diffuso di tecnologie indossabili come *fitness tracker*, orologi *smart* e persino indumenti intelligenti in grado di monitorare il benessere di un paziente. L'idea non è solo quella di registrare i segni vitali come la pressione sanguigna, la frequenza cardiaca e la temperatura corporea, ma anche di trasmettere i dati via internet agli operatori sanitari designati o ai membri della

85 L'*Economist Intelligence Unit* (EIU) fornisce previsioni e servizi di consulenza economici attraverso ricerche ed analisi di mercato, come ad esempio rapporti informativi mensili sulle nazioni, previsioni economiche delle nazioni, rapporti di servizio sul rischio dei Paesi e rapporti industriali.

famiglia.

Come Nazione connessa con un tasso di connessione a banda larga *wireless* estremamente impressionante, Singapore ha sottolineato l'importanza della connettività tra il governo, le industrie e la sua gente. Sono utilizzati siti web che hanno sviluppato contenuti incentrati sui cittadini e molte informazioni vengono trasferite ad essi attraverso i social media e le applicazioni mobili. Non sorprende che Singapore sia già leader in termini di piattaforma di e-Government. I programmi di questa piattaforma sono suddivisi in tre categorie:

1. Programmi per i cittadini.

Data.gov.sg: consente di scoprire facilmente l'accesso agli annunci a set di dati pubblici disponibili per il governo.

OneInbox: fornisce una piattaforma ufficiale in cui le persone possono ricevere elettronicamente le corrispondenze relative al governo.

- *SingPass*: è un sistema di autenticazione per accedere a tutti i servizi elettronici del governo.

Altri programmi per i cittadini includono: il portale di beneficenza e donatori ed *e-Visitor* che fornisce informazioni per i turisti.

2. Programmi per le imprese.

Business Incentive Profiler: fornisce alle aziende un accesso e una domanda *one-stop* per tutte le sovvenzioni governative disponibili e consente di applicare, aggiornare, rinnovare o terminare qualsiasi licenza commerciale online rilasciata da agenzie governative.

Altri programmi includono il *Government Electronic Business (GeBIZ)*, che è un portale unico di appalti elettronici e *OneMap*, una piattaforma geospaziale online integrata in cui vengono fornite al pubblico informazioni e servizi affidabili e precisi basati sulla posizione.

3. Programmi per il governo.

- *The Government Cloud (G-Cloud)*: fornisce un ambiente ICT condiviso sicuro per le agenzie governative.
- *Cube*: fornisce una piattaforma di social networking tra funzionari pubblici per scambiare idee, quale *Infocomm Security Masterplan* che serve a guidare i tentativi a livello nazionale di Singapore di proteggere il proprio paese da qualsiasi minaccia cibernetica esterna o interna⁸⁶.

La piattaforma *Smart Nation* è divisa in due livelli: *Smart Nation Operating System (SN-OS)* e *Communications & Sensor Network*. Quest'ultima è un'infrastruttura fondamentale per l'implementazione di strutture sul campo come contatori intelligenti e sensori di allagamento. Le strutture sul campo installate intorno alla città sono collegate sia tramite connessioni cablate che *wireless* per formare una rete di comunicazione e di sensori nel suo insieme. Le informazioni raccolte dai dispositivi vengono quindi condivise tra le agenzie per le risposte appropriate.

Basato sulla comunicazione e sulla rete di sensori *Smart Nation Operating System* opera su tre livelli: la gestione dei sensori, attraverso la quale le strutture sul campo dovrebbero essere regolarmente monitorate per il loro corretto funzionamento, lo scambio di dati attraverso una piattaforma unificata e la *sense making platform* in cui i dati vengono elaborati, integrati e analizzati per fornire informazioni agli utenti finali.

La città-stato di Singapore a causa della mancanza di spazio orizzontale ha visto un significativo sviluppo verticale nel corso degli anni, con sempre più persone che risiedono in grattacieli e spazi sotterranei. Lo sviluppo verticale significa anche che le tradizionali mappe urbanistiche 2D

86 Lee, S., et al. 2016.

sono diventate inadeguate per mappare e rappresentare efficacemente l'ambiente complesso, con lo spazio aereo e lo spazio sotterraneo che si sovrappongono alle informazioni a livello del suolo. Per superare i vincoli delle mappe 2D, sono stati raccolti dati cartografici 3D ad alta risoluzione dell'intero paese ed è stato sviluppato un modello digitale. Singapore Land Authority (SLA), l'agenzia cartografica nazionale di Singapore, ha avviato un progetto di mappatura nazionale 3D nel 2014 per sviluppare una mappa avanzata della città in modo da rappresentare il complesso ambiente urbano in modo dettagliato. I dati cartografici affidabili ad alta risoluzione e open source raccolti nell'ambito del progetto forniscono un quadro digitale per la nazione intelligente.

Il progetto è stato suddiviso in due fasi. Nella prima fase, la fotografia aerea e il LiDAR sono stati utilizzati per catturare i dati del terreno e della superficie del paese e costruire modelli digitali, che hanno formato il quadro generale.

Figura 29.
Virtual Singapore. Fonte:
Govinsider.asia.



Nell'ambito della seconda fase, le scansioni laser montate sul veicolo hanno integrato le immagini aeree con dati a livello stradale per migliorare notevolmente i dettagli della mappa: è stata condotta un'indagine di mappatura mobile basata su veicoli per la rete stradale della nazione per acquisire più di tre milioni di immagini e oltre 600 milioni di punti LiDAR e creare modelli 3D altamente dettagliati del denso sistema

stradale urbano.

La piattaforma *virtual* Singapore, che funge da gemello digitale della città, è un modello dinamico di città 3D e consente agli urbanisti di testare soluzioni senza correre troppi rischi. La piattaforma integra anche dati geometrici e di immagine provenienti da diverse agenzie pubbliche, dati 2D e informazioni da piattaforme geospaziali e non geospaziali esistenti come *OneMap*, *People Hub* e *Business Hub*, così come i dati in tempo reale dei sensori distribuiti in tutta Singapore come parte dell'iniziativa *Smart Nation*.

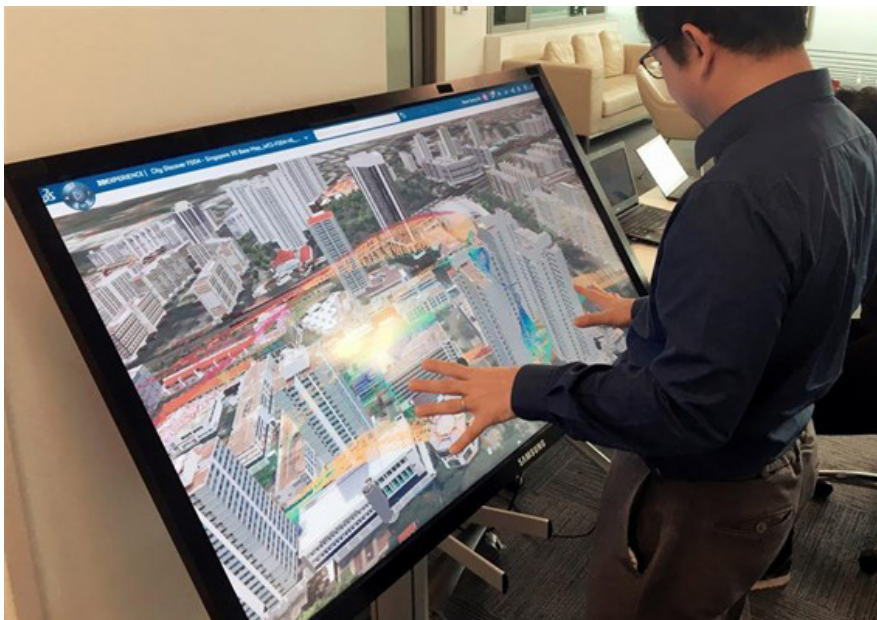


Figura 30.

George Loh, direttore dei programmi presso la NRF, presenta Virtual Singapore. Fonte: Insider.com.

Le sfide affrontate nell'adozione del modello 3D della città erano simili a quelle affrontate per qualsiasi tecnologia nella fase nascente. Gli elevati costi di raccolta dei dati sono stati ridotti al minimo grazie all'uso di tecniche di raccolta e manipolazione dei dati molto veloci. Lo SLA ha lavorato a stretto contatto con Bentley per implementare lo schema CityGML, uno standard gestito dall'*Open Geospatial Consortium* (OGC) per consentire l'interoperabilità e lo scambio di dati. Il compito di gestire e aggiornare i dati è stato affidato a Bentley Map, che ha aiutato a creare, mantenere e diffondere informazioni 3D e a fornire accesso multiutente al database tramite connessione diretta. L'uso di

standard aperti CityGML ha consentito alle parti interessate di accedere e utilizzare i dati senza rinnovare i sistemi esistenti, portando a sua volta alla riduzione dei costi.

Virtual Singapore include la modellazione semantica 3D, che comprende informazioni dettagliate come *texture*, rappresentazione del materiale di oggetti geometrici e caratteristiche del terreno, come corpi idrici, vegetazione, infrastrutture di trasporto. I modelli di edifici codificano la geometria e i componenti di una struttura, come pareti, pavimenti e soffitti, fino ai suoi minimi dettagli. Il modello offre quattro funzionalità principali:

- **Sperimentazione.**

Il modello può essere utilizzato per test o sperimentazioni virtuali, ad esempio per esaminare le aree di copertura delle reti 4G, fornire una visualizzazione realistica delle aree con scarsa copertura ed evidenziare le aree che possono essere migliorate nel modello della città.

- *Virtual Test-Bedding.*

Virtual Singapore può essere utilizzato come piattaforma di *test-bedding* per convalidare la fornitura di servizi. Ad esempio, potrebbe essere utilizzato per modellare e simulare la dispersione della folla e stabilire le procedure di evacuazione durante un'emergenza.

- **Pianificazione e processo decisionale.**

Con un ricco ambiente di dati, *Virtual Singapore* è una piattaforma olistica e integrata per sviluppare applicazioni analitiche. Ad esempio, potrebbe essere sviluppata un'applicazione per analizzare i flussi di trasporto e i modelli di movimento dei pedoni.

- **Ricerca e sviluppo.**

I dati, se messi a disposizione della comunità di ricerca con i necessari diritti di accesso, possono consentire ai ricercatori di innovare e sviluppare nuove tecnologie o capacità.

In particolare, nel modello sono disponibili dati come l'altezza degli edifici, la superficie dei tetti e la quantità di luce solare. Ciò consente agli urbanisti di analizzare quali edifici hanno un potenziale maggiore per la produzione di energia solare e quindi più adatti all'installazione di pannelli solari. *Virtual Singapore* può fornire informazioni su come la temperatura ambiente e la luce solare variano durante il giorno. Gli urbanisti possono visualizzare gli effetti della costruzione di nuovi edifici o installazioni, sulla temperatura e sull'intensità della luce nella tenuta. Gli urbanisti e gli ingegneri possono anche sovrapporre mappe di calore e rumore per la simulazione e la modellazione, questo può aiutare i pianificatori a creare un ambiente di vita più confortevole e più fresco per i residenti.

Questo progetto è sostenuto dalla *National Research Foundation* (NRF), dall'Ufficio del Primo Ministro di Singapore, dalla *Singapore Land Authority* (SLA) e dalla *Government Technology Agency* di Singapore (GovTech). NRF guiderà lo sviluppo del progetto, mentre SLA supporterà con i suoi dati di mappatura topografica 3D e diventerà l'operatore e il proprietario quando *Virtual Singapore* sarà completato. GovTech fornirà competenze nella tecnologia dell'informazione e delle comunicazioni e nella sua gestione come richiesto dal progetto.

Singapore deve affrontare rischi di alluvione a causa dell'innalzamento dei livelli dell'acqua, ma deve ancora investire i suoi sforzi nella tecnologia *digital twin* nella previsione delle inondazioni e della qualità dell'acqua. La gestione dell'approvvigionamento idrico potrebbe essere una delle aree chiave su cui la città-stato potrebbe concentrarsi.

I progetti intelligenti sono una buona base per esplorare le possibilità della digitalizzazione e Singapore ne sta intraprendendo una serie e come città-stato è in grado di adottare un approccio olistico. La pandemia di Covid-19 ha

dimostrato i vantaggi di una città in rete: Singapore è stata in grado di comunicare le decisioni a livello nazionale in modo rapido ed efficiente e di coinvolgere direttamente i cittadini nei processi.

Singapore										
Dominio	Livello di integrazione	Grado di automazione	Livello di maturità	Livelli chiave	Acquisizione di dati	Attuazione	Simulazione	Esperienza utente	Intelligenza artificiale	Stakeholders coinvolti
Energia	Digital twin	1 input automatico.	Intelligent twin	Fedeltà livello 5	-Archivi Dati statici	SI	SI	Privato	SI	National Research Foundation (NRF)
Mobilità		2 output semi automatico, misto.		Apprendimento livello 4	-Agenzie governative Dati socio economici	Risparmio energetico (monitorando flussi di persone e stato degli edifici).	Effetti delle nuove costruzioni. Simulazione energetica/solare.		Pianificazione semi-automatica, capacità di filtrare infrastrutture, edifici in base a parametri impostati.	Prime Minister's Office Singapore
Sicurezza		3Sottoprogrammi e regole di attuazione semi-automatico, misto.		Intelligenza livello 3						Singapore Land Authority (SLA)
Governance		4 accesso e sicurezza limitato		Autonomia livello 3	-IoT - Sensori Dati dinamici	Trasporto				Government Technology Agency of Singapore (GovTech)

4.9 STOCCARDA – HERRENBERG: MONITORAGGIO IN TEMPO REALE E MOBILITÀ SOSTENIBILE

La città di Herrenberg, con 30.000 abitanti, si trova nel Baden-Württemberg, nel sud-ovest della Germania (Figura 31). La città ha conosciuto una rapida crescita urbana, soprattutto durante l'industrializzazione e dopo la seconda guerra mondiale. Herrenberg fa parte della regione metropolitana di Stoccarda, con circa 5,2 milioni di abitanti. Questa regione è caratterizzata da una posizione suburbana frammentata, con una fascia diffusa tra insediamenti urbani e paesaggi rurali a bassa densità di popolazione. Ciò comporta un'elevata dipendenza dalle infrastrutture e un crescente traffico automobilistico individuale. In generale, l'hinterland di Stoccarda può essere caratterizzato da un elevato volume di traffico, dovuto principalmente alla forte dipendenza dal pendolarismo, alla frammentazione delle comunità e alla mancanza di una governance territoriale⁸⁷.

Herrenberg è costituita da un nucleo storico omogeneo e da una periferia frammentata. Il suo nucleo storico, tuttavia, è fortemente influenzato dal traffico automobilistico a causa delle precedenti decisioni di pianificazione e attuazione. Pertanto, la città è fortemente colpita dall'inquinamento ambientale attraverso le emissioni e il rumore. Ciò è particolarmente vero per una strada principale che circonda il nucleo storico che raccoglie e distribuisce il traffico su tre strade federali. Per risolvere questa sfida urbana, è stato sviluppato il piano di mobilità integrata IMEP 2030⁸⁸ per la città di Herrenberg, sostenuto dal coinvolgimento dei cittadini. È inteso come una linea guida per lo sviluppo della mobilità nel prossimo decennio. Gli scenari urbani dell'IMEP 2030 sono stati utilizzati come applicazioni di prova per il gemello digitale urbano, al fine di testare un approccio innovativo per migliorare il processo di pianificazione collaborativa.



Figura 31.

La città di Herrenberg, in Germania. Vista aerea del centro storico della città. In primo piano, la ferrovia e le strade ad alto scorrimento, solitamente molto trafficate.

88 L'IMEP 2030 (Piano di Mobilità Integrata) di Herrenberg è un piano strategico volto a sviluppare un sistema di mobilità sostenibile e intermodale entro il 2030. Elaborato dall'ufficio Dr. Brenner Ingenieure con il coinvolgimento della cittadinanza, il piano include 48 misure in settori chiave come trasporto pubblico, mobilità ciclabile e pedonale, gestione del traffico e digitalizzazione. Gli obiettivi principali sono la riduzione dell'inquinamento, il miglioramento della qualità della vita e la promozione di modalità di trasporto ecologiche. Tra le iniziative spiccano l'app "stadtnavi" per la pianificazione multimodale dei percorsi e l'integrazione di politiche climatiche e sociali.

Gli strumenti digitali possono sostenere la partecipazione dei cittadini, ma devono essere inseriti in dialoghi apprezzati dai responsabili politici⁸⁹. In questo contesto, ad esempio, le visualizzazioni dei gemelli digitali in realtà virtuali e aumentate possono supportare in modo significativo la comunicazione e il processo decisionale tra i politici e il personale amministrativo responsabile, gli esperti della pratica e di diverse discipline e i cittadini. Ciò è reso possibile dalla riduzione della complessità e dalla rappresentazione spaziale e visiva che funge da “ausilio alla traduzione”. I risultati, ad esempio delle simulazioni, possono essere presentati in modo più comprensibile rispetto ai metodi convenzionali o al linguaggio specialistico. Ciò rende la partecipazione più attraente e può includere gruppi di persone che altrimenti non sarebbero facilmente raggiungibili da tali formati, come bambini, adolescenti, residenti con un *background* migratorio, barriere linguistiche o con un basso livello di istruzione. L'utilizzo di formati collaborativi come i CAVE fissi⁹⁰ o di strutture mobili come la retroproiezione VR consente di coinvolgere fino a 15 partecipanti contemporaneamente. Ciò consente di coinvolgere un numero significativo di persone in più sessioni. Per formati ancora più grandi, potrebbero essere adatte anche strutture in loco come i cinema 3D, che possono essere adattati a questo scopo con uno sforzo relativamente

89 Dembski, F., 2020.

90 I CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) sono ambienti immersivi di realtà virtuale, progettati per consentire una visualizzazione tridimensionale e interattiva di dati complessi. Essi utilizzano una struttura fisica, tipicamente un cubo con superfici di proiezione su almeno tre lati e il pavimento, dove immagini stereoscopiche vengono proiettate tramite proiettori 3D e coordinate da sistemi di tracciamento. Gli utenti, dotati di occhiali attivi e talvolta dispositivi di interazione, possono esplorare il contenuto virtuale come se fosse presente nello spazio fisico circostante.

ICAVE fissi in questo caso sono utilizzati per supportare la visualizzazione di modelli complessi, come i gemelli digitali urbani, durante processi di pianificazione partecipativa e collaborativa. Essendo installazioni permanenti, i CAVE fissi offrono una piattaforma stabile e altamente tecnologica per il rendering di dati tridimensionali, simulazioni e modelli. Per esempio, nel caso di Herrenberg, Germania, il CAVE è stato impiegato per rappresentare flussi di vento, concentrazioni di particolato e scenari di mobilità urbana.

ridotto. Nel caso specifico di Herrenberg, gli *stakeholder*, la politica e i rappresentanti di alcuni gruppi cittadini hanno partecipato all'HLRS nel CAVE allestito (Figure 32-34). D'altra parte, centinaia di persone sono state coinvolte in processi partecipativi utilizzando la VR mobile direttamente sul posto durante i principali eventi (Figura 35).



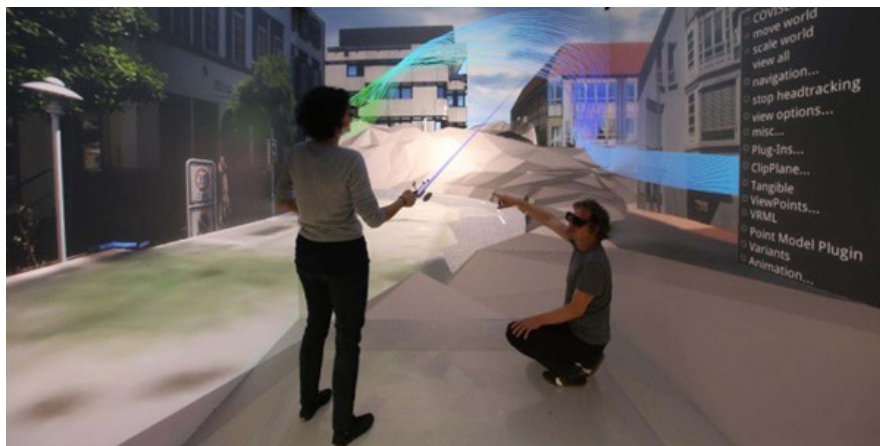
Figura 32.
Il gemello digitale urbano di Herrenberg in un VR durante un processo partecipativo a Herrenberg.



Figura 33.
Set di dati empirici per i percorsi pedonali e il modello di sintassi spaziale implementato nel gemello digitale urbano. Questo permette di confrontare il potenziale di movimento della rete stradale con gli usi reali.

Figura 34.

Simulazione del flusso del vento, la gamma di colori dal blu al verde indica la velocità del vento da bassa a intermedia. Il CAVE è un cubo stazionario a cinque lati per la retroproiezione VR gestito da un cluster di 22 nodi, cinque proiettori 3D, un sistema di tracciamento e occhiali attivi per i partecipanti.

**Figura 35.**

L'allestimento mobile della VR durante un processo partecipativo che comprende una parete di retroproiezione [1], un sistema di tracciamento [2], un computer [3,4], un proiettore 3D e occhiali attivi [5] per i partecipanti.



Le modifiche e la rappresentazione, ad esempio, di varianti, progetti futuri o visioni erano possibili in questa forma solo nella realtà virtuale. Si tratta anche di prevenire rischi elevati e i relativi costi per “mondo reale” attraverso la pianificazione e la partecipazione collaborativa, o di minimizzare il rischio, ad esempio potendo stimare in anticipo gli effetti di grandi investimenti o valutare le infrastrutture per sviluppi futuri in relazione al patrimonio edilizio esistente, per citarne solo alcuni⁹¹.

Per garantire il successo della partecipazione dei cittadini attraverso l'uso di un gemello digitale in realtà virtuale (VR), sono state condotte interviste mirate ai cittadini

stessi. Queste interviste, rivolte a persone con *background* professionale e personali diversi, avevano lo scopo di comprendere come tali individui percepissero e vivessero l'esperienza partecipativa. Tra i principali interrogativi posti figuravano: la visualizzazione di dati complessi è comprensibile? Qual è il livello di dettaglio appropriato? Questa modalità di partecipazione è troppo complicata o, al contrario, eccessivamente semplice?

Al fine di raccogliere informazioni utili per valutare e adattare sia la visualizzazione che la presentazione in VR in questi nuovi processi partecipativi, è stato sviluppato un questionario specifico. Questo questionario ha raccolto 39 risposte da individui di età compresa tra i 16 e gli 80 anni, con una varietà di profili professionali e formativi, tra cui studenti, educatori, agenti di polizia, esperti informatici e decisori. Il questionario comprendeva nove domande quantitative, presentate sotto forma di profili di polarità, e alcune domande aperte riguardanti l'uso percepito e le informazioni ritenute mancanti. Questa metodologia ha permesso di ottenere dati sia quantitativi che qualitativi.

I risultati empirici di questa indagine sono stati pubblicati originariamente in Deckert, A., Dembski, F., Ulmer, F., Ruddat, M., Wössner, U.⁹² Strumenti digitali nella partecipazione degli *stakeholder* per la transizione energetica tedesca: Gli strumenti digitali possono migliorare la partecipazione e i suoi risultati?

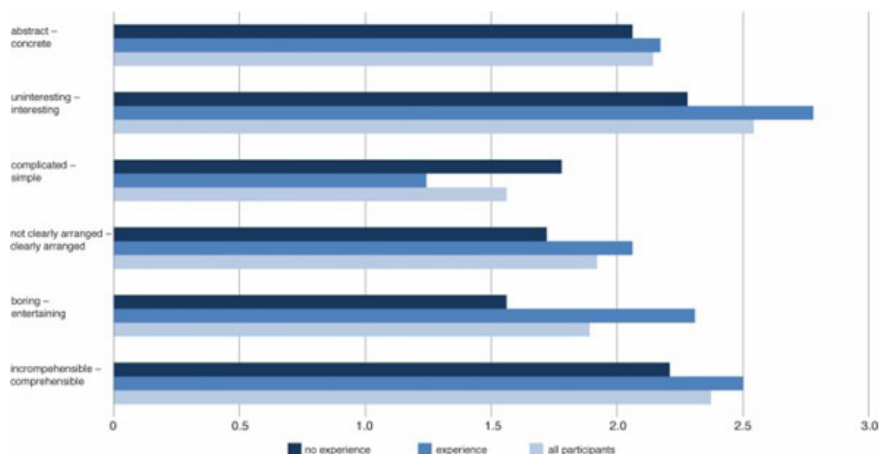
In F. Ulmer e A. Deckert, il ruolo della partecipazione pubblica nelle transizioni energetiche.

Gli intervistati hanno espresso i loro giudizi su sei coppie di attributi opposti: astratto-concreto, poco interessante-interessante, complicato-semplificato, non chiaramente disposti-chiaramente disposti, noioso-divertente e incomprensibile-comprensibile. La scala di valutazione

92 Dembski, F., et al. 2020.

variava da -3,00 a +3,00. Nel complesso, il modello è stato valutato molto positivamente: interessante (+2,54), comprensibile (+2,37), concreto (+2,14), chiaramente organizzato (+1,92), divertente (+1,89) e semplice (+1,56).

Figura 36.
Visualizzazione dei
risultati del sondaggio. n=
39; le scale variavano da-
3,00 a+ 3,00.



Inoltre, è stato chiesto agli intervistati di indicare le loro precedenti esperienze con i processi di partecipazione pubblica. Quasi la metà (46%) ha partecipato come cittadino, mentre il 13% lo ha fatto come rappresentante ufficiale locale; tre persone hanno dichiarato di aver avuto entrambe le esperienze. Le valutazioni del modello da parte di questi due gruppi mostrano alcune differenze significative: coloro con esperienze pregresse tendono a giudicare il modello in modo più positivo rispetto a chi non ne ha avute. Tuttavia, l'attributo “complicato-semplice” costituisce un'eccezione, con valutazioni più negative da parte di chi ha precedenti esperienze, ritenendo il modello più complicato.

Questi risultati suggeriscono che i processi partecipativi tradizionali, basati prevalentemente su rappresentazioni bidimensionali della città, come mappe e concetti pianificatori in linguaggio tecnico, sono implicitamente confrontati con i modelli digitali urbani. Nonostante ciò, il giudizio complessivo positivo indica che i modelli virtuali possiedono un significativo potenziale per migliorare i processi partecipativi, ad esempio facilitando la comunicazione tra esperti e cittadini attraverso una presentazione più accessibile e comprensibile delle informazioni complesse.

Alla domanda se i modelli urbani virtuali possono contribuire positivamente sui processi di pianificazione locale e partecipazione pubblica, il 95% e il 97% degli intervistati hanno risposto affermativamente. Nonostante ciò, è importante sottolineare alcune limitazioni dello studio: il campione era ridotto e non rappresentativo; i risultati riflettono esclusivamente le opinioni degli intervistati; e mancano test pratici in contesti di pianificazione urbana reali. Le ricerche future potrebbero esplorare la percezione e l'efficacia dei modelli urbani virtuali in maniera più approfondita.

Infine, anche i risultati qualitativi sono stati incoraggianti. Gli intervistati hanno evidenziato come i modelli urbani virtuali possano rendere più chiari e trasparenti i processi di pianificazione urbana, facilitando l'immaginazione delle conseguenze spaziali e delle implicazioni di specifiche decisioni. Tuttavia, sono stati segnalati alcuni aspetti migliorabili, come una maggiore attenzione ai flussi di traffico, una migliore accessibilità del modello e un maggiore realismo grafico.

Il testo presenta lo sviluppo di un prototipo di gemello digitale urbano, utilizzato come strumento innovativo nella pianificazione urbana, con l'obiettivo di migliorare la comprensione e la gestione di problemi complessi nelle città. La città di Herrenberg, in Germania, scelta come caso studio per testare diverse tecniche, tra cui modellazione 3D, simulazioni urbane e analisi qualitativa. I risultati, supportati da un questionario con 39 partecipanti, evidenziano un'elevata percezione positiva del modello, considerato interessante, comprensibile e utile per facilitare i processi partecipativi e la comunicazione tra esperti e cittadini.

Il progetto si distingue per l'uso di software open source, il rispetto della sovranità dei dati locali e l'obiettivo di democratizzare l'accesso ai dati urbani, evitando la dipendenza da fornitori commerciali. Il gemello digitale

è stato progettato per visualizzare dati complessi, coinvolgere i cittadini e promuovere il consenso nei processi decisionali, grazie alla possibilità di esplorare scenari futuri e informazioni “invisibili” attraverso la realtà virtuale. Il testo sottolinea l'importanza di competenze interdisciplinari per il successo di progetti di smart city e identifica i gemelli digitali urbani come strumenti chiave per uno sviluppo sostenibile. Tuttavia, si riconoscono alcune limitazioni, come la necessità di integrare ulteriori dati socioeconomici e ambientali per affrontare le sfide urbane in atto, una legislazione sulla *privacy* dei dati e una maggiore consapevolezza dell'uso di strumenti digitali da parte dei cittadini. Aspetti che approfondiremo nelle conclusioni.

Herremberg (Stoccarda)									
Dominio	Livello di integrazione	Grado di automazione	Livello di maturità	Livelli chiave	Acquisizione di dati	Attuazione	Simulazione	Esperienza utente	Stakeholders coinvolti
Energia Mobilità	Digital shadow	1 input automatico. 2 output semi automatico, misto. 3 Sottoprogrammi e regole di attuazione semi-automatico, misto. 4 accesso e sicurezza accesso completo.	Responsive twin	Fedeltà livello 3 Apprendimento livello 4 Intelligenza livello 3 Autonomia livello 3	- Agenzie governative Dati socio economici - Sensori Dati dinamici	SI	SI Sostenibilità urbana.	Privato	City of Stoccarda.

5.0 ZURIGO: OTTIMIZZAZIONE DELLA RETE URBANA ATTRAVERSO I DATI

Il *digital twin* di Zurigo rappresenta una soluzione avanzata per affrontare le sfide della pianificazione e della gestione urbana, fornendo una piattaforma integrata che combina dati geospaziali, analisi predittiva e partecipazione dei cittadini. La sua realizzazione è parte di un approccio strategico mirato a migliorare la sostenibilità, l'efficienza operativa e la trasparenza nelle decisioni amministrative,

adattandosi a una città in continua espansione.

Il nucleo del *digital twin* di Zurigo è un modello tridimensionale dettagliato della città, costruito utilizzando una combinazione di rilievi LiDAR e immagini aeree ad alta risoluzione. Questa metodologia garantisce precisione sia geometrica, consentendo una rappresentazione accurata degli edifici, delle infrastrutture e delle caratteristiche del paesaggio urbano.



Figura 37.

Modello 3d della città di Zurigo. In basso a sinistra si visualizza la finestra dove sono indicate informazioni relative all'edificio selezionato. Fonte: <https://3d.stzh.ch/appl/3d/zuerichvirtuell/#easting>.

La struttura del modello si basa sullo *standard* CityGML, un formato internazionale che organizza le informazioni urbane in un *framework* interoperabile, come visto nei paragrafi precedenti (es. 4.2).

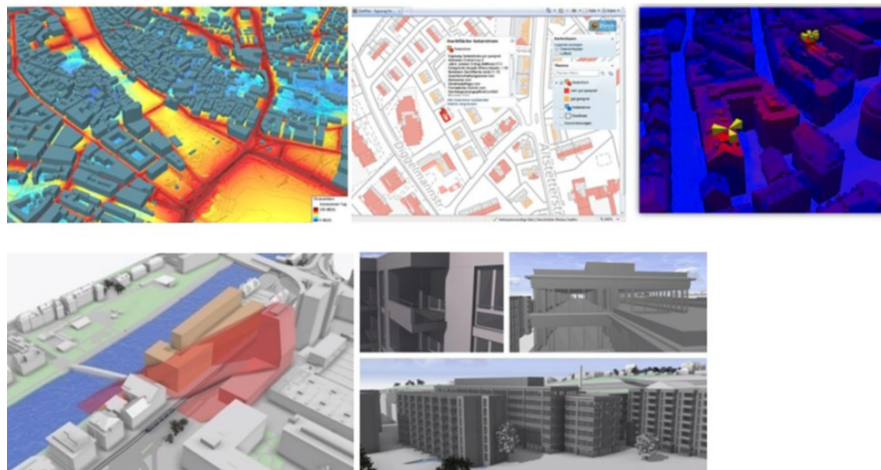
L'uso di CityGML rende il *digital twin* scalabile e versatile, adattabile a diverse esigenze operative. Ad esempio, le autorità cittadine possono utilizzare i livelli di dettaglio più alti per simulazioni di emergenze o interventi infrastrutturali, mentre livelli meno complessi possono essere impiegati per analisi di flussi di traffico o pianificazione urbanistica preliminare.

Uno degli aspetti distintivi del *digital twin* di Zurigo è la sua capacità di integrare dati dinamici provenienti da una rete estesa di sensori IoT. Questi dispositivi monitorano continuamente parametri come il traffico, la qualità dell'aria, i consumi energetici e le condizioni meteorologiche. I dati raccolti vengono inviati attraverso protocolli standardizzati,

come REST APIs e MQTT⁹³, e archiviati in un'infrastruttura centralizzata. Il sistema utilizza algoritmi di *machine learning* per analizzare e interpretare questi dati, generando modelli predittivi e scenari simulativi utili per la pianificazione strategica.

Figura 38.

Applicazioni consolidate: rumore (in alto a sinistra), inquinamento atmosferico (in alto al centro), radiazioni dei telefoni cellulari (in alto a destra), potenziale solare (in basso a sinistra), visualizzazione di progetti di costruzione (in basso a destra) (fonte: Città di Zurigo).



L'integrazione in tempo reale consente al modello di essere più di una semplice rappresentazione statica della città: diventa uno strumento vivo e dinamico. Ad esempio, il sistema può fornire analisi immediate sugli effetti di un'interruzione del traffico, consentendo alle autorità di reagire rapidamente. Allo stesso modo, i dati ambientali possono essere utilizzati per modellare l'impatto di politiche di sostenibilità, come l'introduzione di zone a basse emissioni o l'ottimizzazione dei percorsi dei mezzi pubblici.

Un elemento centrale del *digital twin* è la sua interfaccia accessibile, progettata per facilitare l'interazione sia dei professionisti che dei cittadini. Attraverso un portale *web* basato su tecnologie come WebGL⁹⁴, gli utenti possono

93 Sono protocolli e tecnologie utilizzati per trasmettere e scambiare dati in modo standardizzato ed efficiente. *REST APIs* è utilizzato per scambiare dati tra applicazioni in modo flessibile e standardizzato, ideale per servizi web. *MQTT* è ottimizzato per sistemi IoT e applicazioni che richiedono trasmissioni veloci e affidabili, anche con connessioni di rete limitate.

94 Una tecnologia che consente di creare grafica 3D e 2D interattiva all'interno di un browser web senza necessità di installare plugin aggiuntivi. WebGL è una libreria basata su JavaScript che sfrutta le capacità delle schede grafiche moderne (GPU) per renderizzare grafica ad alte prestazioni direttamente nel browser. In sintesi, si tratta di una tecnologia chiave per visualizzazioni grafiche avanzate nel browser, indispensabile per creare piattaforme intuitive e interattive come quelle utilizzate nei digital twin urbani.

esplorare il modello 3D della città, visualizzando informazioni dettagliate su edifici, infrastrutture e spazi pubblici. Questa interfaccia permette di sovrapporre strati informativi, come mappe di densità di traffico o zone di rischio ambientale, offrendo una visione completa e comprensibile del tessuto urbano.

I cittadini possono partecipare attivamente alla pianificazione urbana grazie a strumenti di *feedback* integrati nella piattaforma. Ad esempio, possono esprimere opinioni su progetti specifici, proporre modifiche e partecipare a sondaggi sulle priorità di sviluppo. Questa partecipazione non solo aumenta la trasparenza, ma migliora anche la qualità delle decisioni, riducendo le controversie e favorendo un dialogo costruttivo tra comunità e amministrazione. La possibilità di visualizzare chiaramente i progetti proposti aiuta a ottenere un consenso informato e a ridurre critiche tardive.

Nel contesto della mobilità, il sistema consente di simulare l'impatto di nuovi sviluppi infrastrutturali sul traffico, prevedere flussi pedonali e ottimizzare la distribuzione delle risorse. Queste simulazioni sono particolarmente utili per pianificare interventi su aree congestionate o per migliorare l'efficienza dei trasporti pubblici.

Dal punto di vista ambientale, il modello offre strumenti per monitorare la qualità dell'aria e modellare l'impatto delle emissioni. Ad esempio, può simulare scenari di cambiamento climatico, come ondate di calore o inondazioni, valutando i potenziali effetti sulle infrastrutture urbane. Questi dati sono fondamentali per progettare strategie di resilienza e per pianificare politiche di mitigazione.

Per migliorare la comprensione e l'interazione con il modello, Zurigo ha introdotto tecnologie di realtà virtuale (VR) e aumentata (AR). Questi strumenti permettono agli utenti di esplorare il *digital twin* in modo immersivo, osservando direttamente gli impatti dei progetti urbanistici proposti.

Questa capacità è particolarmente utile per presentare piani complessi a un pubblico non tecnico, facilitando il coinvolgimento e migliorando il processo decisionale.

Ad esempio, grazie alla VR, è possibile simulare percorsi pedonali o visualizzare come un nuovo edificio influenzerà il panorama urbano. La AR, invece, può essere utilizzata per sovrapporre informazioni digitali sull'ambiente reale, fornendo indicazioni utili direttamente sul campo.

Un altro aspetto tecnico significativo è la capacità del *digital twin* di supportare la collaborazione tra vari attori coinvolti nella pianificazione urbana. Urbanisti, ingegneri, politici e cittadini possono accedere a una piattaforma condivisa che centralizza le informazioni e migliora la comunicazione. L'interoperabilità del sistema, garantita dallo standard CityGML e dall'uso di open data, facilita l'integrazione con altre piattaforme e applicazioni, rendendo possibile una visione olistica della città.

Rimane comunque fondamentale chiarire e approfondire la questione cruciale relativa alla gestione dei dati, chi garantisce il corretto utilizzo dei dati raccolti? Chi tutela la dei cittadini?

Gli standard ISO, come l'ISO 27001⁹⁵, vengono utilizzati per proteggere le informazioni da accessi non autorizzati e per assicurare l'integrità, ma questo non basta. I protocolli di crittografia e l'anonimizzazione dei dati personali sono un problema che costringe ad una piccola raccolta di dati, al fine di garantire fiducia nel sistema, rendendolo non adatto a gestire dati riservati e personali.

95 Sono normative internazionali riconosciute a livello globale, progettate per migliorare i processi e garantire la qualità e la sicurezza in diversi ambiti. L'ISO 27001 è uno standard per la gestione della sicurezza delle informazioni. Fornisce un quadro per stabilire, implementare e mantenere un Sistema di Gestione per la Sicurezza delle Informazioni (SGSI), con l'obiettivo di proteggere dati sensibili da accessi non autorizzati, violazioni o perdite. Include requisiti specifici per la valutazione del rischio, la gestione degli accessi, il controllo delle modifiche e la formazione del personale.

In sintesi, il digital twin di Zurigo si configura come una piattaforma tecnica complessa ma altamente funzionale, progettata per affrontare le sfide contemporanee della pianificazione urbana e della gestione delle risorse. Grazie alla combinazione di dati dinamici, tecnologie di analisi avanzate e un'interfaccia accessibile, il sistema rappresenta un esempio di come le città possano utilizzare strumenti digitali per migliorare l'efficienza, la sostenibilità e la partecipazione comunitaria. Tuttavia, emergono criticità nella tutela dei dati sensibili, che richiedono una gestione attenta e conforme alle normative sulla *privacy*, al fine di raccogliere e gestire grandi quantità di dati tutelando gli utenti.

Zurigo										
Dominio	Livello di integrazione	Grado di automazione	Livello di maturità	Livelli chiave	Acquisizione di dati	Attuazione	Simulazione	Esperienza utente	Intelligenza artificiale	Stakeholders coinvolti
Energia Mobilità Sicurezza Governance	Digital twin	1 input automatico. 2 output semi-automatico, misto. 3 sottoprogrammi e regole di attuazione semi-automatico, misto. 4 accesso e sicurezza accesso completo.	Adaptive twin	Fedeltà livello 5 Apprendimento livello 4 Intelligenza livello 2 Autonomia livello 3	- Sensori Statici - Archivi Dinamici	SI Input nel microclima, pianificazione.	SI Effetti delle nuove costruzioni. Simulazione energetica solare. Inquinamento atmosferico.	Pubblico Piattaforma web: https://3d.zurigo.ch/3d/ 3d zurich/virtual hearing	SI Processo di pianificazione urbana.	Città di Zurigo

5 | PARTE QUINTA

CASO STUDIO: TIRANA

5.1 IL CASO STUDIO DI TIRANA: DIGITAL TWIN E MOBILITÀ URBANA

Progetto applicativo, volto allo studio delle criticità del traffico urbano e alla progettazione di un digital twin per la gestione intelligente della mobilità.

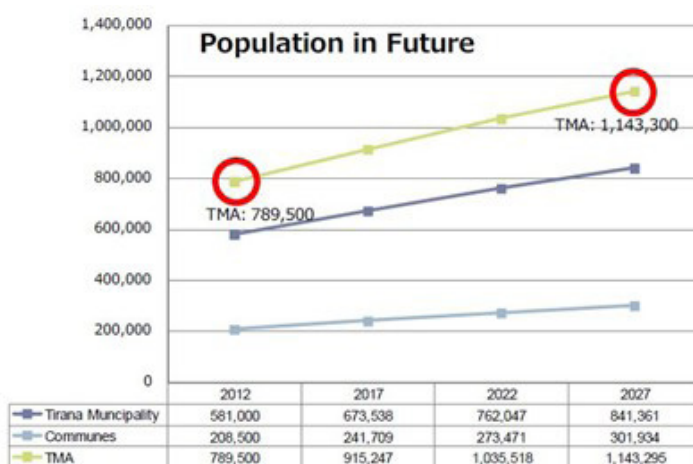
Questo capitolo si concentrerà sull'analisi della città di Tirana, fornirà una panoramica di come una città in via di sviluppo stia approcciando l'adozione di tecnologie avanzate. Tirana rappresenta un esempio di come le realtà urbane emergenti possano sfruttare i *digital twin* per migliorare la gestione delle infrastrutture e la pianificazione urbana, nonostante le limitazioni in termini di risorse e competenze tecnologiche. Questo caso studio metterà in luce le sfide specifiche che una città in rapida crescita deve affrontare nel tentativo di integrare soluzioni digitali avanzate.

Il processo di globalizzazione in atto negli ultimi anni ha aumentato in modo significativo il bisogno di mobilità. I trasporti, in quanto area principale della mobilità, stanno vivendo diverse sfide con un impatto crescente sulle questioni sociali, economiche e ambientali del processo di globalizzazione. In questa ricerca l'interesse principale sarà rivolto ai sistemi di trasporto pubblico-privato stradali della capitale dell'Albania, Tirana. Negli ultimi due decenni la capitale ha subito drastici cambiamenti, dovuti alla democratizzazione del Paese e ad altri eventi e sviluppi socioeconomici. La democratizzazione iniziata nel 1991, accompagnata dal progresso dell'urbanizzazione della capitale, ha determinato un rapido aumento della popolazione cittadina a causa delle migrazioni dalle aree rurali e montane. Il processo di urbanizzazione continua a progredire e si prevede che entro il 2030 la popolazione cittadina raggiungerà il milione di abitanti. Questa rapida urbanizzazione ha influenzato lo sviluppo urbano, in

particolare i trasporti.

Il presente capitolo si inserisce in questa cornice, approfondendo il lavoro svolto nella città di Tirana in collaborazione con l'Università Politecnica di Tirana. Come accennato nell'introduzione, il nostro studio si è focalizzato sull'analisi e il rilievo delle dinamiche di traffico e sull'individuazione di soluzioni innovative per affrontare il problema della congestione.

Figura 39.
Grafico che rappresenta
l'aumento della
popolazione nella città di
Tirana dal 2012 al 2027.



Tirana gode inoltre di una posizione strategica per quanto riguarda i trasporti, che la rende fondamentale per collegare i nodi dell'Europa meridionale al Mar Nero, rafforzati dalla nuova autostrada europea. Inoltre, l'attuale corridoio urbano Tirana-Durazzo, che collega la capitale direttamente alla città portuale, aumenta il flusso di traffico grazie al dinamismo che offre. La parte settentrionale dell'Albania, l'aeroporto internazionale di Tirana (IAT) e la strada Arber (in costruzione) che collega Tirana a Skopje aumentano notevolmente il flusso di traffico, sapendo che tutto il flusso è in realtà sostenuto dall'anello centrale della capitale. Questa situazione richiede studi strategici a breve, medio e lungo termine sulla situazione attuale dei trasporti. Una delle principali preoccupazioni è il problema del traffico nelle ore di punta all'interno del CBD (definito come l'area all'interno dell'Anello Medio), causato in primo luogo dall'occupazione degli spazi di linea da parte di soste o parcheggi illegali che

riducono la capacità della strada e, in secondo luogo, dal fatto che alcune strade con una capacità ridotta trasportano un grande volume di traffico per linea, mentre altre con una capacità elevata trasportano un basso volume di traffico per linea, contribuendo così alla congestione in particolari aree del CBD.



Figura 40.
CBD area all'interno
dell'Anello Medio.

Il mal funzionamento dei sistemi di monitoraggio del traffico è un fattore che contribuisce fortemente alla congestione. Lo studio suggerisce di fornire informazioni coerenti sul traffico nelle strade urbane e nelle aree congestionate e di utilizzare il controllo dei segnali stradali e i sistemi di trasporto intelligenti (ITS) per individuare dove si verificano gli ingorghi principali, con il risultato di fluidificare il flusso di veicoli.

Come anticipato, la posizione strategica di Tirana, funge da nodo di collegamento con il porto di Durazzo, l'aeroporto internazionale di Tirana, il nord dell'Albania e presto l'autostrada europea, appesantendo il traffico cittadino a causa dell'elevato flusso e della diversità dei veicoli, aiutati anche dalla mancanza di tangenziali. Tale situazione stressa la congestione del traffico e crea impatti sociali, economici e ambientali negativi nell'area della città.

Lo scopo è quello di illustrare un quadro di riferimento per ottimizzare la congestione del traffico e i suoi impatti

negativi sull'ambiente e sulla società, trovando una soluzione nell'impiego del *digital twin*.

Di seguito analizziamo tutte quelle informazioni, dati, strumenti e analisi utili ai fini di impostare in modo vantaggioso lo strumento del gemello digitale.

- Struttura della città e dell'infrastruttura stradale
- Volumi di traffico stimati
- Struttura trasporto pubblico urbano/extraurbano
- Statistiche delle problematiche stradali
- Inquinamento acustico ed atmosferico
- Mappatura dei parcheggi e della percentuale di occupazione
- Localizzazione dei semafori e delle telecamere

Struttura della città e dell'infrastruttura stradale

Nel nucleo della città si concentra la maggior parte delle istituzioni, degli uffici pubblici e degli edifici di rappresentanza della capitale, oltre al settore terziario, come banche e assicurazioni. Mentre nelle immediate vicinanze, gli usi commerciali e al dettaglio sono sparsi e generalmente situati al piano terra. I *cluster* lavorativi più grandi si trovano fuori dal centro della città, dove le industrie sono raggruppate nei quartieri di Kombinat e Selite e nell'Asse di produzione situato lungo l'autostrada Tirana-Durazzo. I principali cluster di servizi sono composti da:

- - L'Ospedale accademico di Tirana, nella zona di don Bosko, che ospita uno staff accademico di oltre 700 professionisti e una popolazione studentesca di 7.500 persone.
- - L'Ospedale madre Teresa, adiacente al quartiere

Kinostudio, ha la capacità di ospitare 1.612 pazienti e uno staff medico di 2.500 persone.

- - L'Università metropolitana di Tirana, situata nel quartiere Qyteti Studenti, ha una popolazione studentesca stimata di oltre 1.400 studenti e 200 professori.

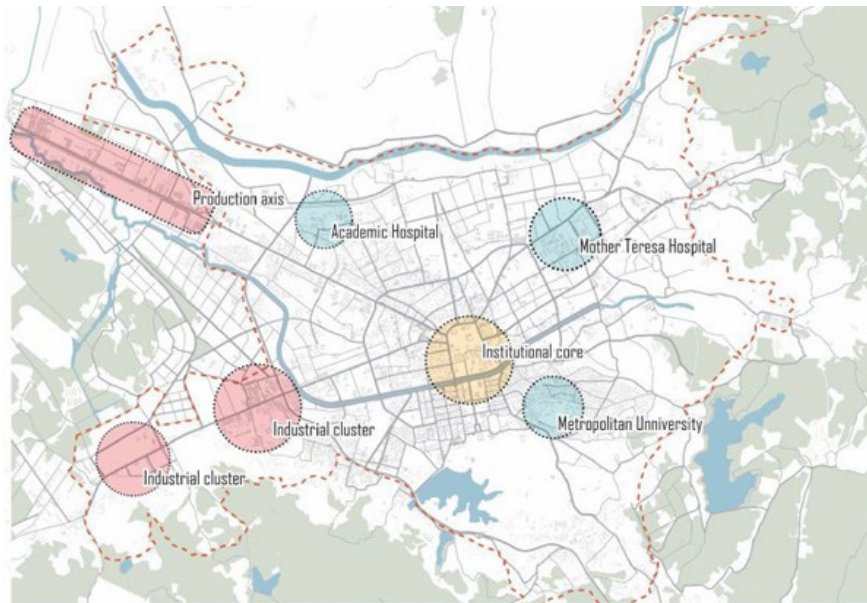


Figura 41.

Poli attrattivi principali.
Fonte: studio strategico
sui trasporti di Tirana.

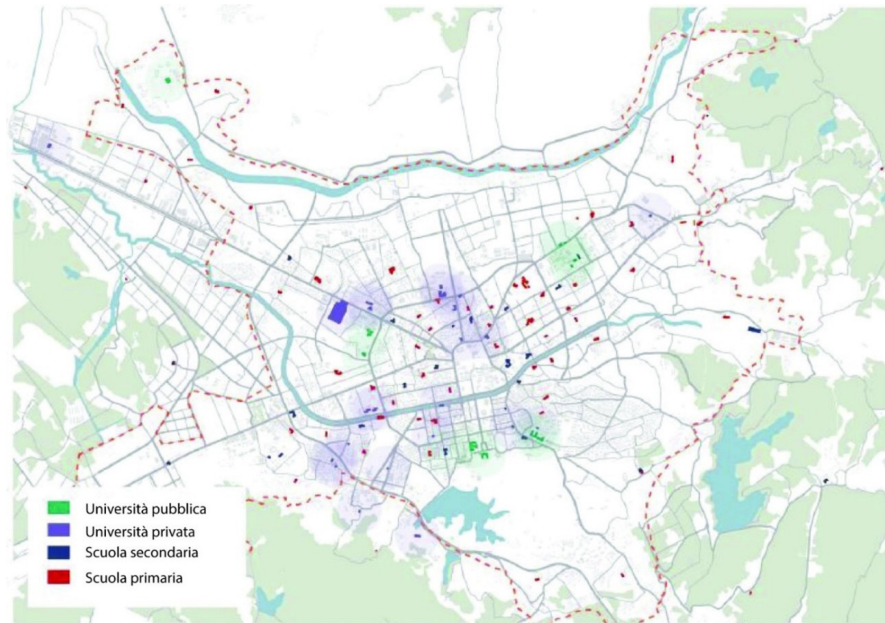
Le seguenti grafiche illustrano la disposizione dei punti di interesse, come istituti educativi, strutture sanitarie, servizi commerciali e sportivi, all'interno dell'area presa in esame. Comprendere la posizione e la natura di questi servizi è fondamentale per analizzare i flussi di spostamento che attraggono nelle diverse zone del territorio.

Il ruolo di Tirana come città principale e capitale dell'Albania spiega la presenza dei più importanti poli sanitari ed educativi del Paese all'interno del nucleo principale di Tirana. Per quanto riguarda il sistema educativo (università pubbliche e private, licei e scuole secondarie), la maggior parte delle strutture si concentra nel centro della città, soprattutto all'interno e intorno al cosiddetto terzo anello.

I servizi educativi di secondo grado e le università attraggono un ampio bacino che va oltre i confini del territorio comunale,

soprattutto per l'istruzione superiore (università). In altre parole, il ruolo di Tirana per quanto riguarda i suoi servizi va ben oltre i confini comunali, svolgendo un ruolo primario a livello nazionale.

Figura 42.
Strutture educative.



È interessante notare come la distribuzione dei servizi sanitari sia effettuata in modo equo all'interno dell'area urbana, ma si distingue per la presenza di due infrastrutture che vanno ben oltre i confini cittadini: l'ospedale accademico di Tirana nella zona di don Bosko e l'ospedale madre Teresa, situato nei pressi del quartiere Kinostudio. Questi ospedali, per la loro rilevanza, svolgono un ruolo centrale nella fornitura di servizi medici non solo per i residenti di Tirana, ma anche per coloro che provengono da altre regioni del paese.

La proliferazione di centri commerciali a Tirana negli ultimi due decenni ha portato a una crescente dipendenza dall'uso di veicoli privati. È innegabile che molte strutture commerciali siano state erette al di fuori dei limiti amministrativi di Tirana, rendendole principalmente accessibili solo attraverso il mezzo privato. Due esempi evidenti in tal senso sono l'universit  di Qendra Tregtare, situata lungo l'asse SH2, e la zona orientale di Tirana, che si sviluppa lungo l'autostrada Tirana-Elbasan (E852).

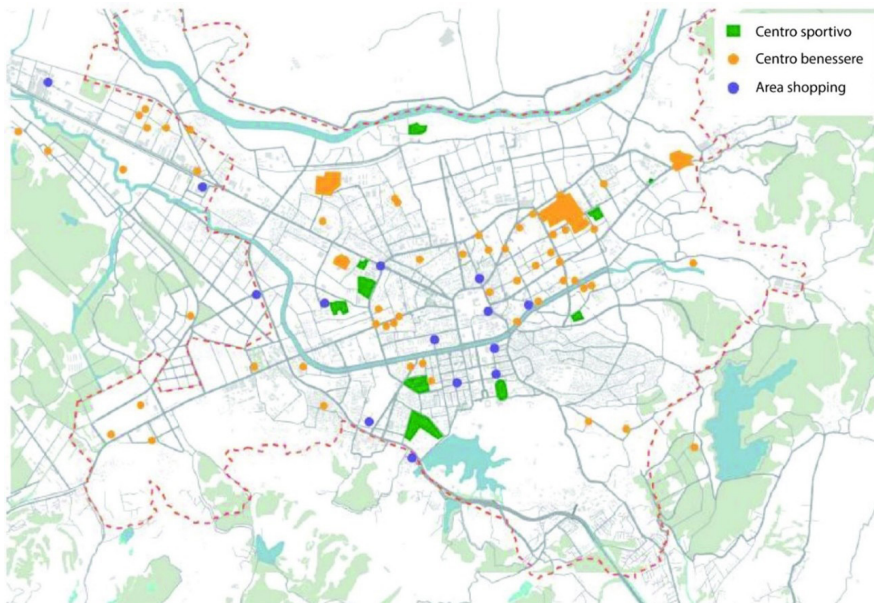


Figura 43.
Servizi sanitari, centri sportivi e centri commerciali.

Questa distribuzione dei servizi e delle strutture di attrazione mette in luce l'importanza di considerare l'accessibilità e la mobilità come elementi critici nella pianificazione urbana. È fondamentale garantire che i servizi vitali siano distribuiti in modo equo in tutta l'area urbana e che le infrastrutture siano accessibili a tutti i cittadini, riducendo così la necessità di un eccessivo utilizzo del traffico privato e promuovendo un ambiente urbano più sostenibile. Inoltre, questa analisi sottolinea quanto sia importante prendere decisioni oculate nella pianificazione futura per creare città più accessibili e vivibili per tutti i loro abitanti.

Volumi di traffico stimati

La configurazione della rete stradale di Tirana riflette chiaramente il fatto che la maggior parte dei flussi di traffico si dirige da/verso l'ovest o il nord-ovest della città. Questa tendenza è evidente dall'allineamento delle principali autostrade e delle infrastrutture con svincoli di grande portata, che consentono una maggiore capacità e velocità sulle strade. Questa distribuzione dei flussi è influenzata dal modello origine/destinazione (O/D) e dalla presenza di centri chiave nelle direzioni dell'ovest, come Durazzo (che ospita il principale porto nazionale lungo la costa dell'Adriatico), a nord con Fushe Kruje e a sud con Elbasan

(una delle principali città del paese). Queste tre direzioni rappresentano importanti collegamenti da Tirana a centri urbani con una popolazione compresa tra 75.000 e 137.000 abitanti. Nel frattempo, le infrastrutture orientali di Tirana sono principalmente collegate al parco nazionale del Dajti e a città minori.

Figura 44.
Flusso dei veicoli sulle
principali strade.



In generale, considerando l'andamento del traffico cittadino negli ultimi due anni, possiamo notare che la situazione è stata piuttosto stabile. Tuttavia, è possibile individuare variazioni significative tra le diverse strade della città. Per quanto riguarda i flussi diretti verso destinazioni all'interno della città stessa, Rruga Llazi Miho ha sperimentato un notevole aumento di traffico, mentre nella continuazione di questa strada, Rruga Kavajes, si è verificata una riduzione dei flussi di veicoli. Questa riduzione può essere attribuita all'apertura dell'autostrada Tirana-Elbasan, che ha assunto il ruolo di circonvallazione per la città, diminuendo così il traffico sulla strada Rruga Kavajes. Per quanto riguarda i flussi diretti verso le zone periferiche della città, Rruga Durrësit ha visto un incremento significativo del traffico, diventando una delle principali strade urbane. Nel frattempo, Bulevardi Zogu I ha registrato una diminuzione dei flussi di veicoli. Queste variazioni potrebbero essere il risultato di cambiamenti nei modelli di spostamento della popolazione o delle condizioni stradali generali.

In sintesi, sebbene i flussi di traffico globali all'interno della città siano rimasti relativamente stabili negli ultimi due anni, le variazioni significative tra le diverse strade indicano l'importanza di monitorare attentamente il traffico e adeguare le infrastrutture stradali in base alle mutevoli esigenze dei residenti e delle condizioni del traffico.

In questa sezione viene proposta un'analisi del profilo tipico del traffico in un arco temporale di sette giorni (lunedì-domenica). Mostrando quali sono i tratti di strada urbana in cui il traffico veicolare è tipicamente scorrevole (verde), leggermente rallentato (arancione) o gravemente congestionato (rosso o marrone). La situazione è rappresentata durante l'ora di punta del mattino (ore 8:00), a metà giornata (ore 12:00) pomeriggio (ore 16:00) e durante l'ora di punta serale (ore 20:00).

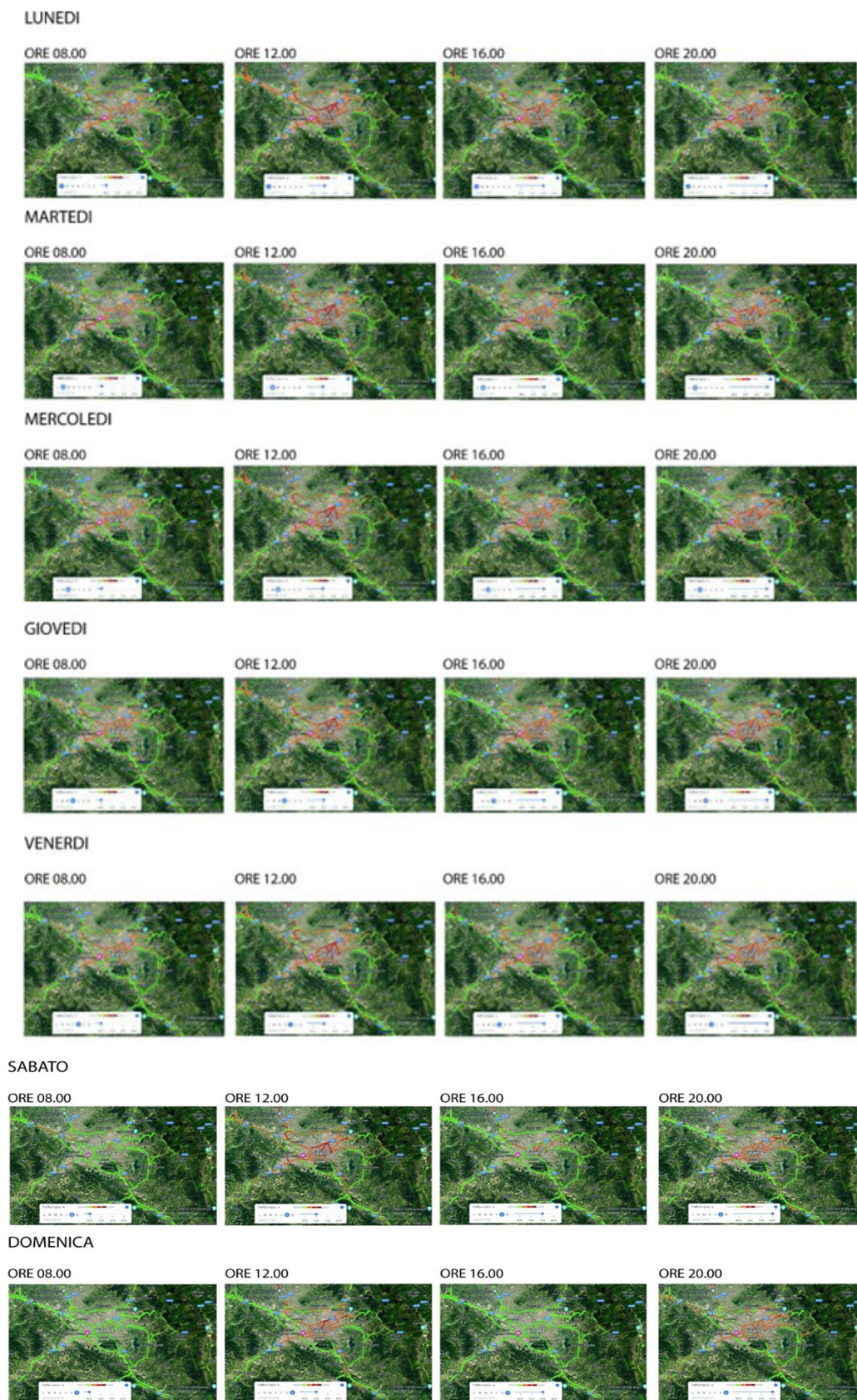


Figura 45.
Elaborazione propria
basata sui dati del traffico
di Google maps.

In una media settimanale le ore di punta serali sono quelle in cui il traffico è più congestionato. Tuttavia, il giorno critico risulta essere il lunedì alle 12:00, in particolar modo in alcune strade specifiche; queste sono:

- 1 | Rruga Dibres, in entrata (la congestione del traffico è presente in 7 pannelli);
- 2 | Rruga Hoxha Tahsim, in arrivo (7 pannelli);
- 3 | Rruga e Elbasanit, in arrivo (6 pannelli);
- 4 | Rruga Dritan Hoxha, in arrivo (5 pannelli);
- 5 | Rruga Abdyl Frashëri, Eastbound e Westbound (4 pannelli);
- | Rruga Myslym Shyri e Rruga Ibrahim Rugova (3 pannelli).

Strada	Direzione	2021	2023	Variazione (%)
Rruga Dritan Hoxha	City	35,700	33,579	-5.9%
Rruga Llazi Miho	City	6,900	11,542	67.3%
Rruga Elbasanit	City	20,000	23,781	18.9%
Rruga Durrës	City	16,000	16,231	1.4%
Rruga Kavajës	City	29,000	20,282	-30.1%
Rruga Elbasanit	Suburbs	17,000	19,554	15.0%
Rruga Dibres	Suburbs	11,700	14,626	25.0%
Rruga Xhanfize Keko	Suburbs	9,300	9,398	1.1%
Bulevardi Zogu I	Suburbs	7,500	4,842	-35.4%
Bulev. Deshmoret e Kombit	Suburbs	21,500	17,976	-16.4%
Rruga Durrës	Suburbs	11,200	15,323	36.8%
Rruga Teodor Keko	South	26,400	24,278	-8.0%
Average				-0.4%

Figura 46.

Conteggio del traffico (veicoli/24 h) nelle strade rilevanti di Tirana.

Strada	Direzione	2021	2023	Variazione (%)
Rruga Dritan Hoxha	City	22.3	21.0	-5.8%
Rruga Llazi Miho	City	27.0	26.2	-3.0%
Rruga Elbasanit	City	27.0	15.7	-41.9%
Rruga Durrës	City	19.5	26.7	36.9%
Rruga Kavajës	City	11.4	39.1	243.0%
Rruga Elbasanit	Suburbs	22.0	24.3	10.5%
Rruga Dibres	Suburbs	12.0	27.3	127.5%
Rruga Xhanfize Keko	Suburbs	18.6	24.3	30.6%
Bulevardi Zogu I	Suburbs	22.7	23.4	3.1%
Bulev. Deshmoret e Kombit	Suburbs	34.6	37.2	7.5%
Rruga Durrës	Suburbs	23.4	19.5	-16.7%
Rruga Teodor Keko	South	33.2	35.8	7.8%
Average		22.8	26.7	17.1%

Figura 47.

Velocità media (Km/h) nelle strade rilevanti di Tirana alle 11:00.

Figura 48.
Velocità media (Km/h)
nelle strade rilevanti di
Tirana alle 20:00.

Strada	Direzione	2021	2023	Variazione (%)
Rruga Dritan Hoxha	City	22.3	21.0	-5.8%
Rruga Llazi Miho	City	27.0	26.2	-3.0%
Rruga Elbasanit	City	27.0	15.7	-41.9%
Rruga Durrës	City	19.5	26.7	36.9%
Rruga Kavajës	City	11.4	39.1	243.0%
Rruga Elbasanit	Suburbs	22.0	24.3	10.5%
Rruga Dibres	Suburbs	12.0	27.3	127.5%
Rruga Xhanfize Keko	Suburbs	18.6	24.3	30.6%
Bulevardi Zogu I	Suburbs	22.7	23.4	3.1%
Bulev. Deshmoret e Kombit	Suburbs	34.6	37.2	7.5%
Rruga Durrës	Suburbs	23.4	19.5	-16.7%
Rruga Teodor Keko	South	33.2	35.8	7.8%
Average		22.8	26.7	17.1%

Figura 49.
Sintesi dei dati. La prima
tabella mostra il livello di
congestione e il rapporto
volume/capacità (V/C)
per alcune strade critiche,
evidenziando le aree
con maggiore densità di
traffico. La seconda tabella
riporta il livello medio di
traffico in diverse fasce
orarie per alcune strade
principali, indicando
variazioni nell'intensità
del traffico durante la
giornata. La terza tabella
mostra la variazione
percentuale del traffico
negli ultimi due anni per
alcune strade selezionate,
evidenziando aumenti
e diminuzioni della
circolazione veicolare.
Fonte: elaborazione
dell'autore.

Congestione e rapporto V/C per le strade critiche

Strada	Pannelli di congestione	Rapporto V/C
Rruga Dibres (entrata)	7	0.95
Rruga Hoxha Tahsim (arrivo)	7	0.92
Rruga e Elbasanit (arrivo)	6	0.88
Rruga Dritan Hoxha (arrivo)	5	0.85
Rruga Abdyl Frashëri (Eastbound & Westbound)	4	0.8
Rruga Myslim Shyri & Rruga Ibrahim Rugova	3	0.75

Livello medio di traffico per fascia oraria

Fascia oraria	Rruga Dibres	Rruga e Elbasanit	Rruga Dritan Hoxha	Rruga Abdyl Frashëri
8:00	0.9	0.85	0.8	0.7
12:00	0.95	0.9	0.85	0.75
16:00	0.85	0.8	0.75	0.7
20:00	0.8	0.75	0.7	0.65

Variazione percentuale del traffico negli ultimi due anni

Strada	Variazione %
Rruga Llazi Miho	15
Rruga Kavajës	-10
Rruga Durrës	20
Bulevardi Zogu I	-5

Il diagramma qui presentato mostra i flussi di traffico simulati e il rapporto flusso/capacità (V/C) su ciascuna sezione stradale. Sebbene sia evidente che alcuni tratti stradali specifici sono congestionati (è una situazione tipica di ogni città europea nelle ore di punta), la capacità delle strade e dei nodi può essere considerata quasi adeguata se rapportata al numero di veicoli posseduti dagli abitanti (tasso di motorizzazione) e guidati in città (ripartizione modale).



Figura 50.
Volumi di traffico stimati
ore 11:00 – 13:00 2021-
2023.

Nella figura 51, viene presentato il caso di non intervento per il 2027. Se non si interviene, si prevede una concentrazione di traffico con un rapporto flusso/capacità (V/C) superiore a 1,5 in molte strade all'interno della città e nel collegamento tra il centro e le aree suburbane, causando una grave congestione del traffico. Ciò implica che potrebbe essere necessario un significativo miglioramento della capacità della rete stradale, con il rischio di trasformare le strade urbane in corridoi simili ad autostrade e le piazze in complessi svincoli. Dall'altro lato, si potrebbero apportare importanti miglioramenti alle reti di trasporto pubblico, ciclabili e pedonali, nonché alla qualità degli spazi pubblici, con l'obiettivo di limitare l'utilizzo delle automobili.

Figura 51.
Volumi di traffico stimati
ore 11:00 – 13:00 anno
2027, in caso di non
intervento. Fonte: Studio
Jica.

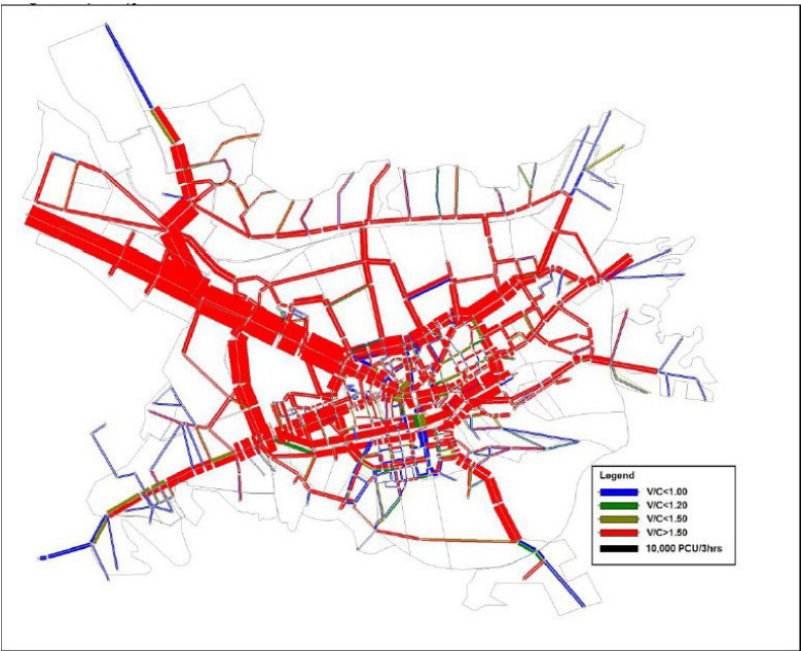
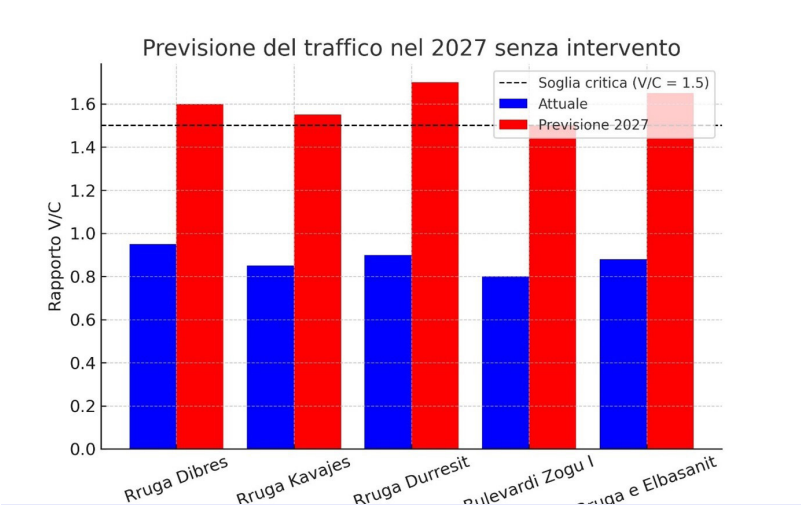


Figura 52.
Tabella con il rapporto
V/C attuale di alcune
strade e la previsione per
il 2027 senza interventi,
evidenziando un
incremento significativo
del traffico.

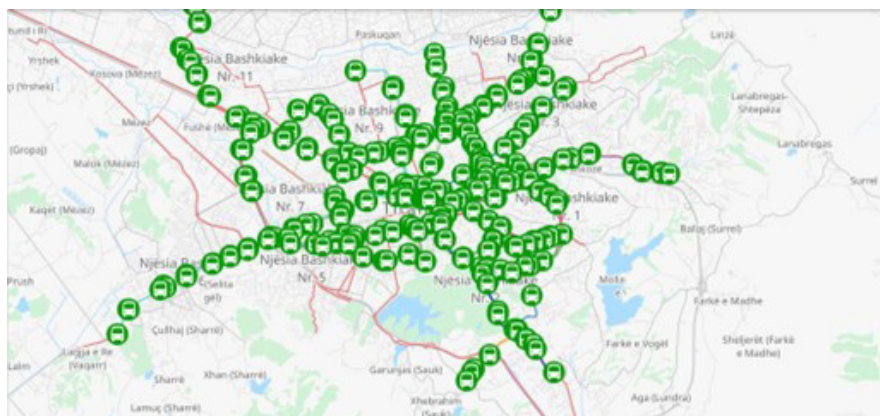


Strada	Rapporto V/C attuale	Rapporto V/C 2027 (senza intervento)
Rruga Dibres	0.95	1.6
Rruga Kavajes	0.85	1.55
Rruga Durresit	0.9	1.7
Bulevardi Zogu I	0.8	1.5
Rruga e Elbasanit	0.88	1.65

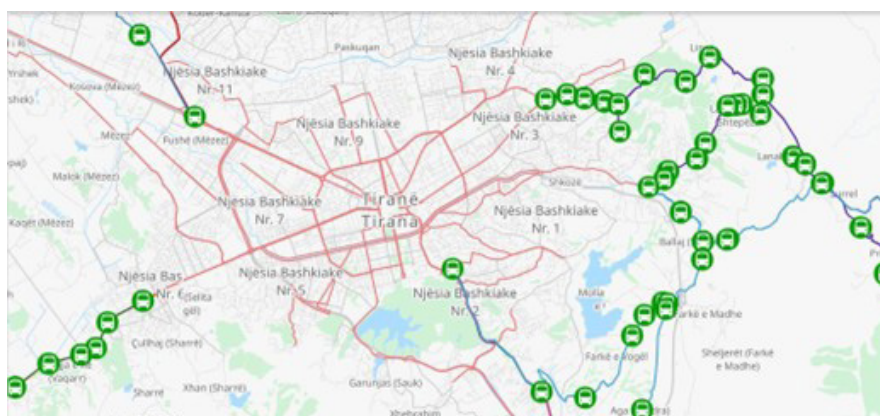
Figura 53.
Grafico a barre che
confronta il rapporto
V/C attuale (in blu)
con la previsione per
il 2027 (in rosso),
indicando il
superamento della
soglia critica di
congestione
(V/C = 1.5) in
più punti.

Struttura trasporto pubblico urbano/extraurbano

Il servizio di trasporto pubblico urbano è utilizzato in media da 200.000 persone al giorno o da quasi 74 milioni su base annua.

**Figura 54.**

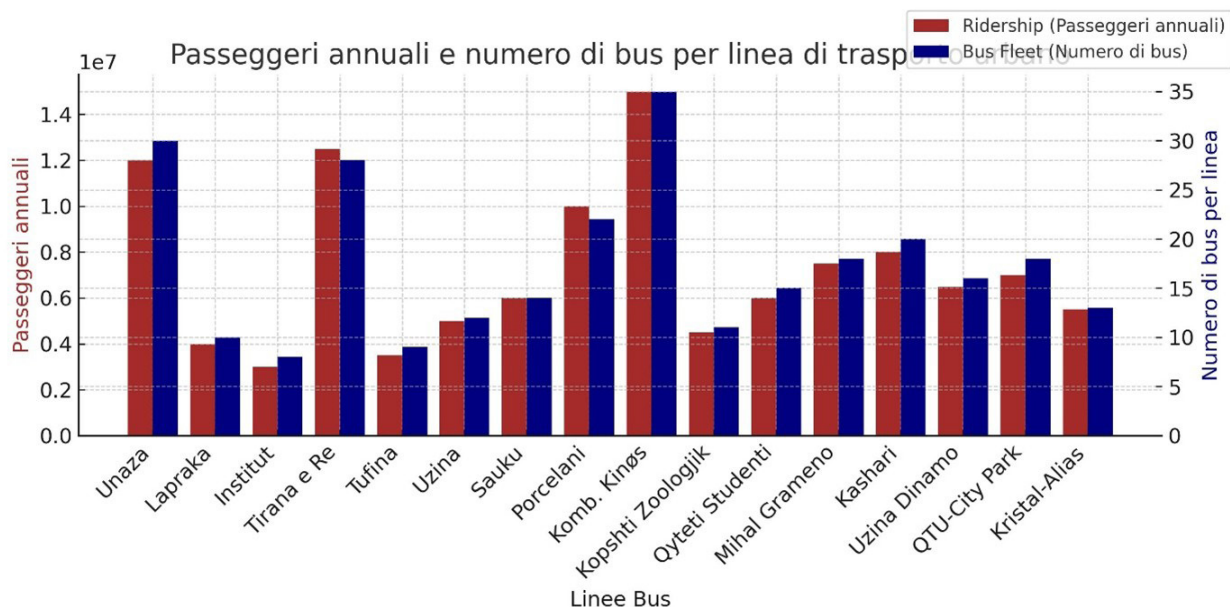
L'immagine mostra la rete del trasporto pubblico urbano di Tirana, evidenziando le fermate degli autobus distribuite in tutta la città. I simboli verdi con l'icona dell'autobus indicano i punti di fermata, che coprono sia il centro che le aree accessorie. Fonte: Tirana-Ime.

**Figura 55.**

L'immagine mostra la rete del trasporto pubblico extraurbano di Tirana, evidenziando le fermate degli autobus che collegano la città con le aree periferiche e i centri abitati circostanti. I simboli verdi con l'icona dell'autobus indicano le fermate lungo le principali vie di collegamento. Le linee evidenziate sulla mappa rappresentano le rotte principali, facilitando l'accesso ai comuni limitrofi. Fonte: Tirana-Ime.

Queste cifre sono sostanzialmente stabili, nonostante il numero di linee sia passato da 12 a 16. Ciò che cambia è la quota di utenti che acquistano biglietti di corsa singola: questi sono il 63,8% secondo i dati del 1st semestre 2019 pubblicati da AMK, con una consistente diminuzione degli abbonati agli abbonamenti mensili e alle carte speciali. Lo studio strategico sui trasporti di Tirana, parte del progetto Tirana boulevard central park and river, fornisce dati sui passeggeri per ogni linea di autobus. Questi sono sostanzialmente più alti (+30%) rispetto ai dati ufficiali dell'AMK. Come già detto, le tre linee principali in termini di passeggeri sono la 14 Unaza, la 13 Tirana e Re e la 15 Kombinat-Kinostudio.

La grafica seguente mostra la domanda di passeggeri per ciascuna linea urbana.

**Figura 56.**

Asse Y sinistro: Indica il numero di passeggeri annuali in milioni, asse Y destro: Mostra il numero di autobus in servizio su ciascuna linea. Asse X: Riporta i nomi delle linee di autobus. Le barre rosse indicano il numero di passeggeri annuali, mentre le barre blu rappresentano il numero di autobus operativi su ogni linea. Si nota che alcune linee, come Unaza e Komb. Kinostudio, hanno un numero elevato di passeggeri, mentre altre, come Kristal-Allias, servono un numero minore di utenti. Dati del dipartimento dei trasporti di Tirana. Rielaborazione dell'autore.

Le problematiche legate al trasporto urbano a Tirana costituiscono una questione rilevante che coinvolge quotidianamente i cittadini della capitale albanese. Ritardi degli autobus, sovraffollamento e problemi di igiene sono solo alcune delle sfide affrontate dai pendolari che utilizzano il trasporto pubblico nella città. Secondo l'Agenzia per la Tutela dei Consumatori le linee che hanno dimostrato di avere problemi rilevanti sono principalmente quelle con percorsi più lunghi, in particolare le linee cittadine come 'TEG - Vecchio Sauk - Zoo - Ex stazione ferroviaria', 'Kashari', 'Laprake', 'Student City - Jordan Misja', 'Mihal Grameno - Centro', e 'Rotonda di Shkoze - Ex campo dell'aviazione'.

Tuttavia, le conseguenze di un servizio di trasporto pubblico

**Figura 57.**

Numero di passeggeri annui per linea di autobus.
Fonte: Dipartimento dei Trasporti di Tirana.

inefficiente si ripercuotono direttamente sui cittadini comuni, che ogni giorno devono affrontare congestioni, ritardi e condizioni poco igieniche.

Per quanto riguarda l'ipotesi di utilizzare autobus elettrici come soluzione al problema del trasporto urbano, è emerso che ci sono requisiti specifici da soddisfare. Gli autobus elettrici richiedono corsie riservate per funzionare efficacemente e avere un impatto positivo sulla qualità del servizio. Altrimenti, non rappresentano una soluzione significativa al problema. Inoltre, il costo di acquisto di autobus elettrici è notevolmente superiore rispetto a quelli tradizionali, creando ulteriori sfide economiche per le autorità locali.

Sebbene siano stati stabiliti accordi per migliorare il servizio, inclusi standard più elevati, l'installazione di GPS e la formalizzazione della vendita degli abbonamenti, le condizioni rimangono ancora un problema, ponendo sfide significative.

Statistiche delle problematiche stradali.

Gli impatti sociali generati dal settore dei trasporti sono principalmente attribuibili agli incidenti stradali. L'analisi si basa sui dati contenuti nel database albanese degli incidenti. I significativi spostamenti demografici verso i principali centri urbani, la rapida urbanizzazione e la maggiore motorizzazione hanno contribuito a un aumento significativo degli incidenti letali negli ultimi decenni. Tuttavia, se si osservano le tendenze degli ultimi tre anni, si può notare che il numero di morti e feriti gravi negli incidenti è diminuito in modo significativo. Si può riconoscere che quasi l'80% del totale degli incidenti nella municipalità di Tirana avviene entro i limiti dell'unità amministrativa di Tirana, ovvero in un ambiente urbano compatto e denso. Questo numero scende al 59% se si considerano solo gli incidenti mortali.

	2021			Unit/ Municipality	2022			Unit/ Municipality	2023			Unit/ Municipality	VAR % (2016-2018)		
	Tirana Municipality	Tirana Unit			Tirana Municipality	Tirana Unit			Tirana Municipality	Tirana Unit			Tirana Municipality	Tirana Unit	
<i>Killed</i>	39	21	54%		34	22	65%		27	16	59%		-30,8%	-23,8%	
<i>Heavy injured</i>	90	62	69%		66	48	73%		56	44	79%		-37,8%	-29,0%	
<i>Slightly injured</i>	450	361	80%		495	374	76%		487	386	79%		8,2%	6,9%	
<i>Total</i>	579	444	77%		595	444	75%		570	446	78%		-1,6%	0,5%	

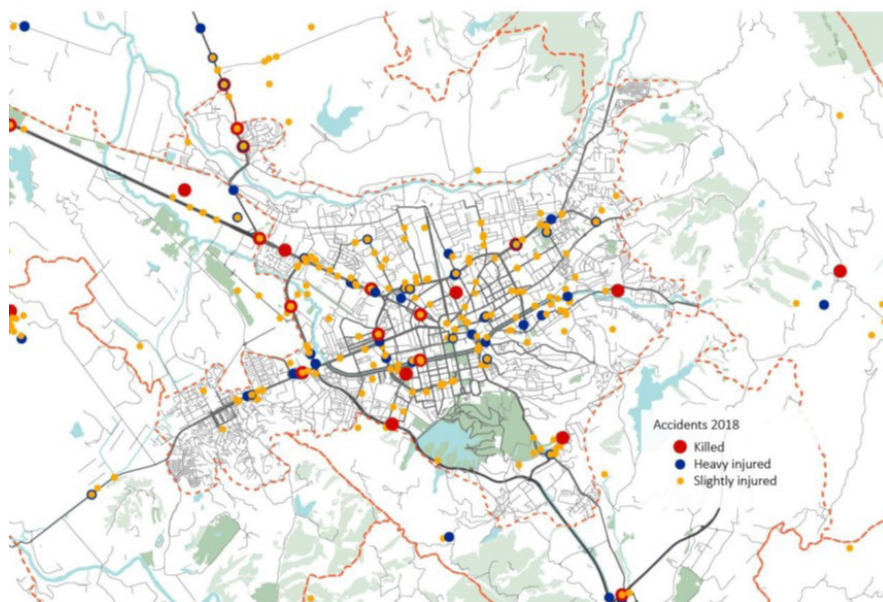
Figura 58.

Tab. statistiche incidenti nella città di Tirana con n. di morti, infortunati e infortunati gravi dal 2021 ad oggi. Fonte: Albania accident database.

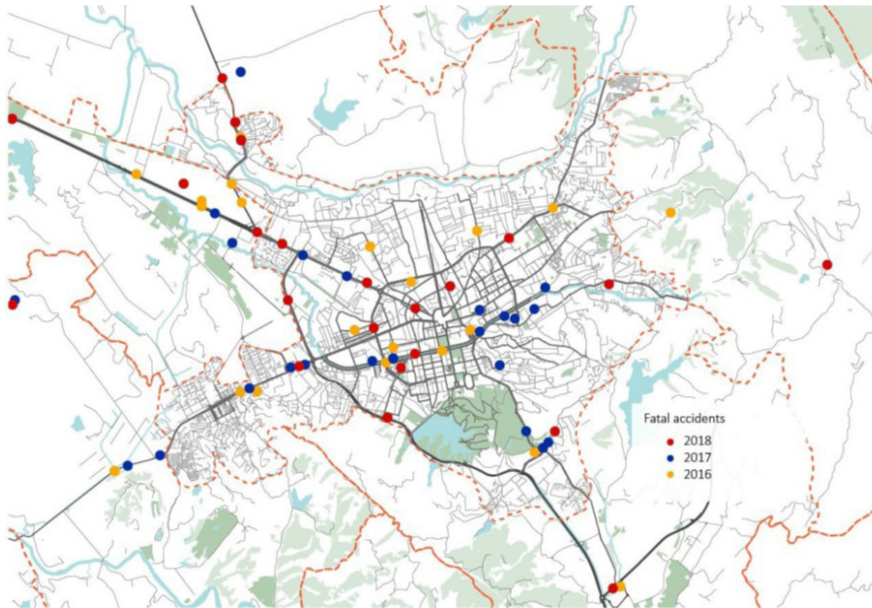
Gli incidenti stradali con feriti lievi sono sparsi in tutto il tessuto urbano, mentre quelli più gravi (con feriti gravi o morti) si concentrano principalmente sugli assi stradali principali e sui corridoi come SH2 e Rruga Dritan Hoxha, SH56 e Kavaja St e il viale lungo il fiume Lana.

Figura 59.

Incidenti nella città di Tirana divisi in morti, infortunati e infortunati gravi. Fonte: Albania accident database.



Gli incidenti mortali si concentrano soprattutto negli assi e nei corridoi principali, in particolare nei tratti rettilinei di strade come SH2 e Rruga Dritan Hoxha, SH56 e Kavaja St e il viale lungo il fiume Lana. Ciò è dovuto principalmente ai flussi di traffico e alle velocità più elevate. Negli ultimi anni, il Comune di Tirana ha finanziato l'attuazione di misure di riduzione della velocità in prossimità di aree sensibili come scuole elementari e medie, ospedali e lungo i principali corridoi stradali.

**Figura 60.**

Incidenti mortali nella città di Tirana. Fonte: Albania accident database.

Inquinamento acustico ed atmosferico

La Direzione generale dei servizi di trasporto stradale (GDRTS) è responsabile della gestione del database che raccoglie informazioni su tutti i veicoli registrati e in circolazione in Albania. Secondo dati ufficiali, al termine di giugno 2021, i veicoli totali era composta da circa 630.000 veicoli, con il 29% di questi (pari a 179.167 veicoli) registrati nel comune di Tirana. Tra questi veicoli, circa il 78% è costituito da automobili private.

È importante notare che l'età media dei veicoli è significativamente alta, con una media di 18 anni. Inoltre, la percentuale di veicoli diesel nel parco veicoli totale è piuttosto elevata, raggiungendo il 63%, in contrasto con la media dell'Unione Europea del 41%. Inoltre, solo il 5% dei veicoli registrati è di tipo elettrico.

Con l'obiettivo di ridurre le emissioni di gas serra e migliorare la qualità dell'aria, è stata introdotta una politica nazionale che limita l'importazione di veicoli usati a quelli conformi alle normative di emissione EURO3 o superiori per le categorie M2 e N1, e almeno EURO4 per i veicoli della categoria M1. Inoltre, l'importazione di veicoli nuovi in Albania è consentita solo se conformi alla tecnologia EURO5.

Questa politica ha già iniziato a mostrare risultati positivi: nell'ultimo periodo è stato registrato un aumento del 47%

nell'importazione di veicoli usati EURO4 rispetto allo stesso periodo dell'anno precedente. Inoltre, il numero complessivo di veicoli in circolazione è diminuito per la prima volta, con una riduzione di 5.044 unità rispetto all'anno precedente, e un aumento del 14% nell'importazione e immatricolazione di veicoli elettrici rispetto all'anno precedente.

È importante notare che il settore dei trasporti in Albania, principalmente il trasporto su strada, rappresenta il 47% del consumo totale di petrolio rispetto alla produzione nazionale di greggio, mentre nell'Unione Europea i trasporti costituiscono il 33% del consumo energetico e il 64,5% del consumo di petrolio. Questi dati sottolineano l'importanza di politiche mirate al miglioramento dell'efficienza energetica e alla riduzione delle emissioni nell'ambito del trasporto in Albania.

Qualità dell'aria e emissioni di gas serra

La questione della qualità dell'aria e delle emissioni di gas serra riveste un ruolo di rilevanza sia nell'Unione Europea che in Albania. Nel contesto dell'UE, il settore dei trasporti contribuisce a oltre il 25% delle emissioni complessive di gas serra.

Il settore dei trasporti in Albania, in particolare il traffico stradale, gioca un ruolo significativo nella qualità dell'aria e potrebbe rappresentare una fonte di emissioni di gas serra. Attualmente, sono state introdotte due pratiche alternative per il monitoraggio della qualità dell'aria a Tirana: la prima è denominata "MoT-Vodafone (Tirana-Ime)" mentre la seconda è il "Progetto Polmoni Verdi." In collaborazione con Vodafone Albania, il comune di Tirana ha installato due stazioni di monitoraggio, sebbene non siano rappresentative in modo completo, offrono indicazioni di livelli di inquinamento atmosferico molto elevati, superando i limiti stabiliti sia a livello nazionale che nell'Unione Europea. Questi dati mettono in luce il trasporto come la principale fonte di inquinamento atmosferico nella zona urbana di

Tirana. Per fornire informazioni in tempo reale sulla qualità dell'aria, il comune ha reso disponibile un'applicazione mobile chiamata "Tirana-Ime."

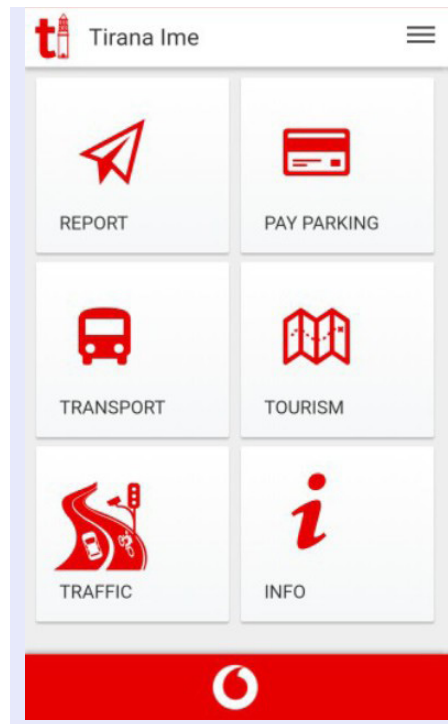


Figura 61.
Template applicazione
Tirana-ime.

D'altra parte, il progetto "Polmoni Verdi," finanziato dall'Unione Europea e implementato dall'istituto Co-PLAN per lo sviluppo dell'habitat in collaborazione con Milieukontakt Albania, si concentra sul monitoraggio della qualità dell'aria, sull'analisi delle aree verdi urbane e sulle zone di interesse per i cittadini. Questo progetto rappresenta un importante passo avanti nella comprensione dell'ambiente urbano e nel fornire dati cruciali per sviluppare soluzioni volte a migliorare la qualità dell'aria e il benessere della comunità cittadina.

Queste iniziative di monitoraggio sono fondamentali per identificare le fonti di inquinamento atmosferico e per adottare misure mirate a mitigare l'impatto ambientale, migliorando così la salute e la qualità della vita dei residenti di Tirana.

L'aumento dell'inquinamento acustico nelle città di Tirana,

Durazzo, Scutari ed Elbasan è una conseguenza della crescente densificazione urbana e del loro sviluppo, che hanno portato alla perdita di spazi verdi pubblici. Questo fenomeno ha contribuito a una maggiore concentrazione di inquinanti nell'aria, come confermato da monitoraggi alternativi delle concentrazioni di sostanze nocive come il NO₂, il PM_{2,5} e il PM₁₀, condotti a Tirana.

Dai dati riportati nelle mappe di calore, emerge che ben l'87% delle 194 stazioni di monitoraggio ha registrato livelli di NO₂ superiori al limite stabilito dall'Unione Europea di 40 µg/m³. Valori ancora più elevati, oltre i 100 µg/m³, sono stati rilevati in quattro aree particolarmente sensibili:

“Sheshi Italia” - zona caratterizzata da un alto afflusso di autobus e fermate del trasporto pubblico.

“Rruga e Elbasanit” - incrocio con un elevato flusso di traffico e congestione.

“Facoltà di Economia” - punto con intenso traffico stradale e presenza di semafori.

“Rruga Sami Frasheri” - zona con traffico congestionato e alta densità urbana.

Per quanto riguarda gli altri due inquinanti atmosferici, il PM_{2,5} e il PM₁₀, si è registrato che rispettivamente l'8% e il 15% delle stazioni di monitoraggio ha superato gli standard dell'Unione Europea. Questi dati indicano chiaramente l'urgenza di affrontare il problema dell'inquinamento acustico e atmosferico nelle città albanesi attraverso politiche e misure mirate, al fine di migliorare la qualità della vita dei residenti e preservare l'ambiente urbano.

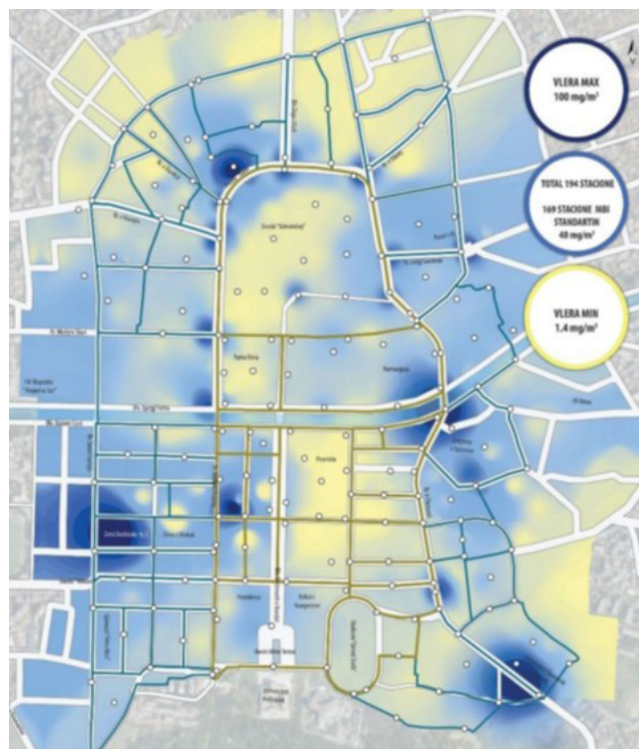


Figura 62.
Concentrazione di NO₂
(MG/M3) nel centro di
Tirana.

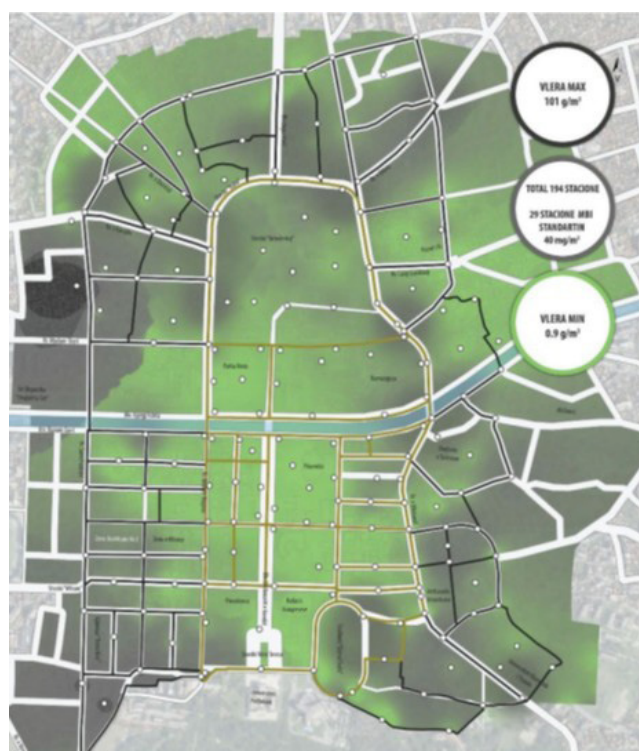
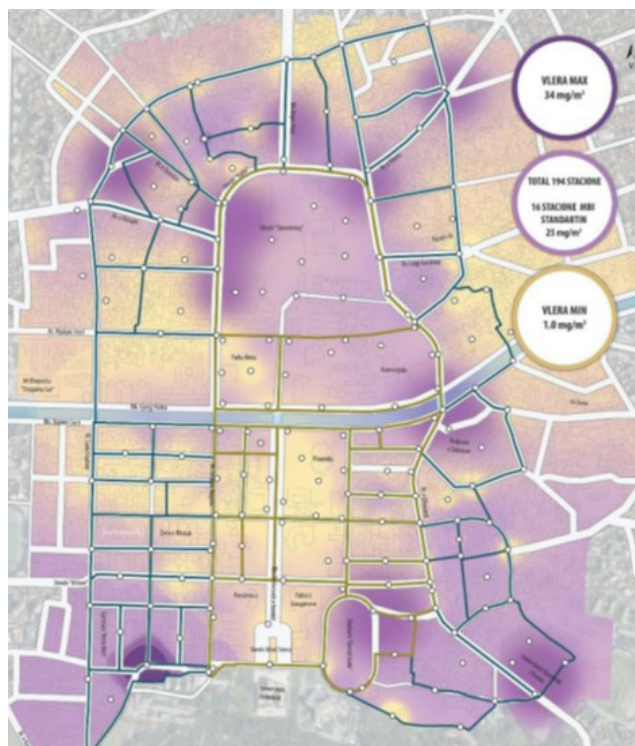
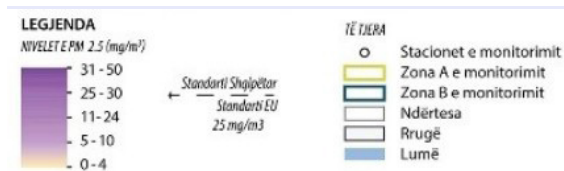


Figura 63.
Concentrazione di PM10
(MG/M3) nel centro di
Tirana.

Figura 64.
Concentrazione di PM_{2,5}
(MG/M3 nel centro di
Tirana.



I dati relativi ai parametri del PM₁₀ offrono una visione positiva, ma ancora preoccupante. Il 15% delle stazioni di monitoraggio, pari a 29 stazioni effettive, ha registrato livelli superiori agli standard dell'Unione Europea. Il valore massimo rilevato, 101 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, è stato osservato vicino all'area di "Tregu Çam". Una possibile correlazione tra questi superamenti e le attività di costruzione in corso nelle vicinanze delle stazioni di monitoraggio potrebbe essere considerata. Tuttavia, l'analisi dei dati relativi al parametro PM_{2,5} rivela una situazione più critica, con valori che superano gli standard dell'UE di 0,25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Solo l'8% delle stazioni ha rilevato valori superiori, con incrementi fino al 40% rispetto agli standard dell'Unione Europea. Queste zone critiche si sovrappongono in parte a quelle individuate per il PM₁₀ e ne aggiungono altre, come la "Selvia junction," lo "Stadio Air Albania," la "Rruga Kont Urani" (alle spalle del MoESY), il "Boulevard Zogu I," e altre.

Nel contesto del progetto 'Green Lungs', sono stati condotti monitoraggi anche nelle vicinanze di diverse istituzioni scolastiche per valutare la qualità dell'aria. I risultati evidenziano una situazione allarmante in gran parte di

queste strutture, dove i livelli di CO₂ superano nettamente gli standard sia dell'Unione Europea che dell'Albania, raggiungendo addirittura 444,93 ppm rispetto allo standard di 350 ppm di CO₂.

D'altra parte, i dati relativi agli altri due inquinanti, PM_{2,5} e PM₁₀, sembrano rientrare nei limiti consentiti sia dagli standard nazionali che europei.

Inquinamento acustico

Il progetto *Green Lungs*, come già menzionato, ha pubblicato mappe dell'inquinamento acustico nel centro di Tirana. Queste registrazioni sono state effettuate durante diverse fasce orarie (mattina, mezzogiorno e notte) presso 168 stazioni di monitoraggio alternative. Le stazioni sono state suddivise in 49 aree più piccole, appartenenti a due zone principali: la zona A, che copre il nucleo centrale della città (compresi il centro storico, le vie principali, piazza madre Teresa, lo stadio, ecc.), e la zona B, che circonda la zona A (ad eccezione della parte meridionale, in cui entrambe le zone confinano con il parco del lago artificiale di Tirana). I risultati ottenuti sono sorprendenti: l'inquinamento acustico è presente in città fin dalle prime ore del mattino, con livelli più elevati rispetto agli altri periodi della giornata. Secondo *Green Lungs*, questo fenomeno è strettamente legato ai trasporti e alla mobilità urbana. Quasi il 70% delle misurazioni effettuate durante lo studio supera gli standard albanesi e dell'UE di 55 dB. In particolare, le registrazioni notturne mostrano un inquinamento acustico significativo, al di sopra di quanto considerato accettabile per il benessere e il riposo della popolazione.

Guardando ai dati in dettaglio, la zona A presenta livelli medi leggermente inferiori rispetto alla zona B, ma entrambe superano la normativa di 55 dB di circa 10 dB in media. In particolare, durante la notte, l'inquinamento acustico misurato supera la norma di 20 dB, un dato preoccupante se consideriamo l'esposizione prolungata della popolazione.

La zona B risulta particolarmente colpita dall'inquinamento acustico notturno, raggiungendo picchi di 65 dB, un valore sorprendentemente elevato per le ore notturne, quando il riposo dei residenti dovrebbe essere garantito.

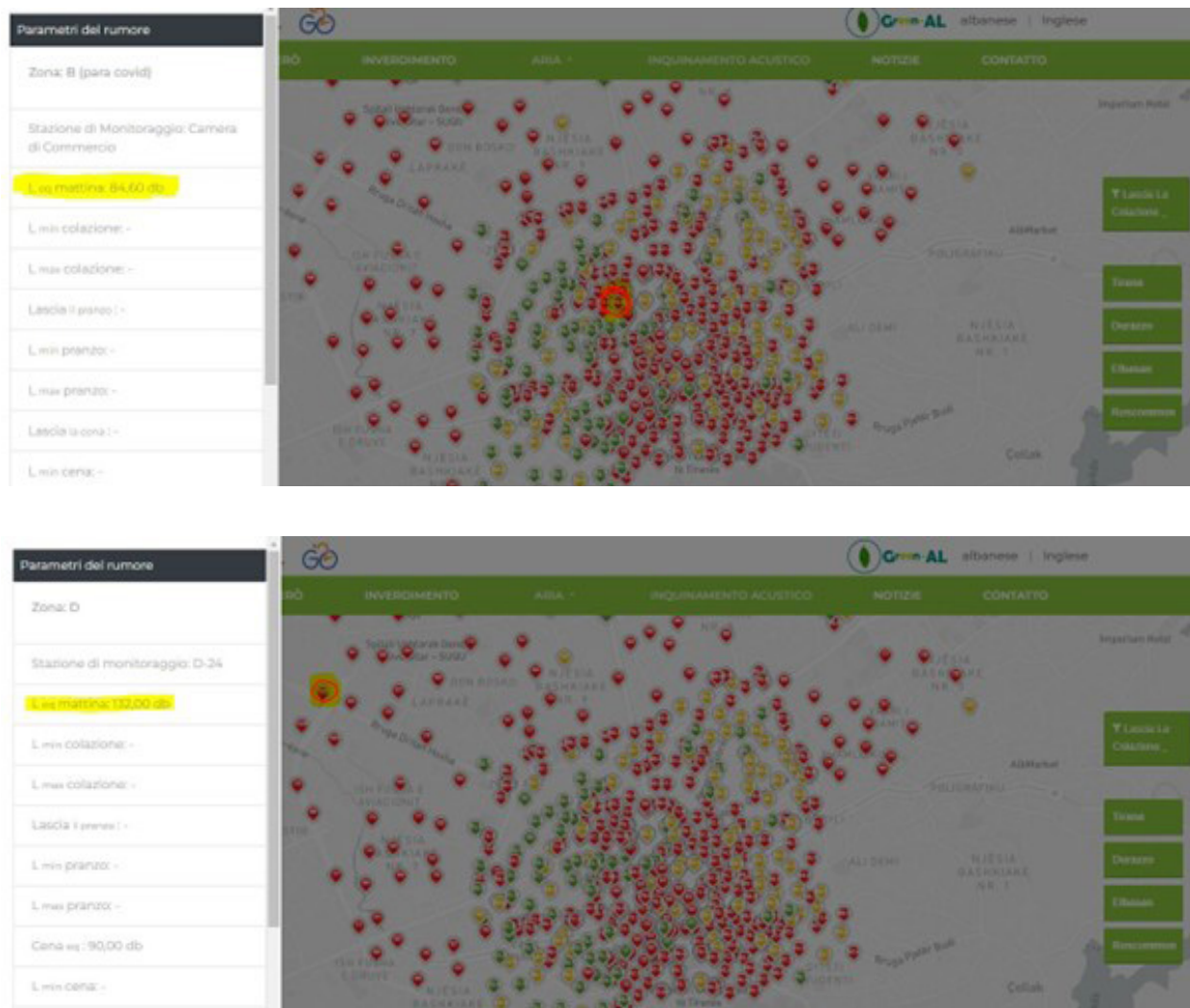


Figura 65. Cattura della piattaforma web Green-al dove sono installati i rilevatori acustici.
Fonte: Piattaforma green-al <https://greenlungs.al/noise.php?lng=en>

Nel cuore di una città in continua evoluzione, la necessità di preservare la qualità dell'ambiente urbano diventa sempre più imperativa. In questo contesto, emerge una soluzione innovativa e all'avanguardia: Green-Al, una piattaforma web che rivoluziona il modo in cui monitoriamo e comprendiamo l'ambiente che ci circonda. Questa piattaforma sfrutta tecnologie sensoriali installate nella città per offrire una panoramica in tempo reale dell'inquinamento acustico e della qualità dell'aria.

Green-Al è una finestra aperta sul nostro ambiente urbano,

uno strumento che ci permette di esplorare e analizzare la vita cittadina in modi prima impensabili. Grazie a sensori sofisticati e all'avanzata tecnologia di raccolta dati, cattura ogni sfumatura dell'ambiente urbano, dal suono delle strade affollate all'aria che respiriamo. Inoltre, questi dati sono resi immediatamente accessibili attraverso una piattaforma web intuitiva e *user-friendly*.

Mappatura dei parcheggi e della percentuale di occupazione
La città è classificata in 4 zone che ospitano un totale di 7.938 posti auto.

La figura seguente mostra i quartieri coperti dalle 4 zone. In totale sono previsti quasi 8.000 posti auto su strada.

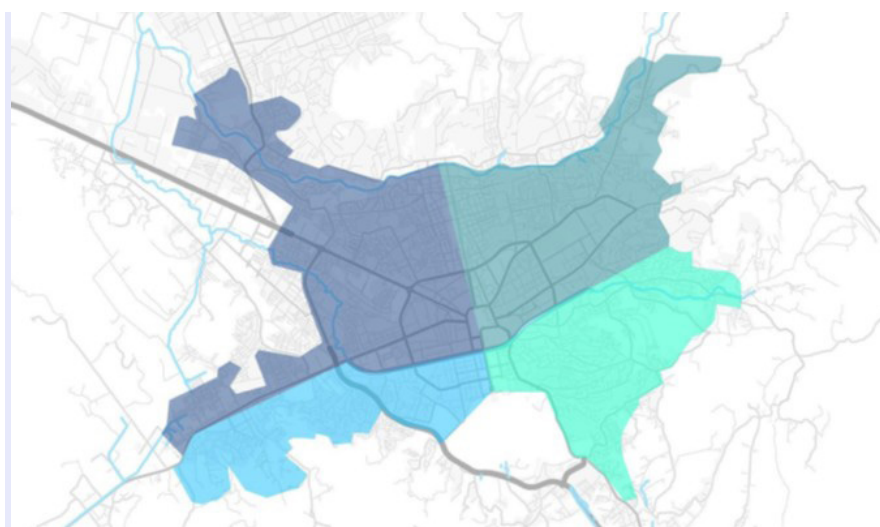


Figura 66.
Identificazione delle 4
Zone di parcheggi su
strada.

ZONA	POSTI AUTO
Zona 1	3,060
Zona 2	1,953
Zona 3	573
Zona 4	2,352
Totale	7,938

Figura 67.
Dotazione di parcheggi su
strada.

Prima dell'entrata in vigore del piano generale TR2030, il precedente studio JICA prevedeva una serie di strutture di parcheggio all'interno del centro città. Ad oggi, 5 di queste strutture sono attive, 2 delle strutture di parcheggio sono

attualmente in costruzione e 11 sono ancora in progetto. Lo studio condotto da JICA evidenzia una sfida critica nell'ambito del parcheggio urbano: l'attuale rapporto tra la domanda e l'offerta è inferiore a 1,0, sulla base di una giornata di funzionamento standard di 8 ore (ad esempio, dalle 8:00 alle 16:00). Tuttavia, è importante notare che la domanda di parcheggio tende a concentrarsi in specifici periodi della giornata, portando a situazioni di sovrasaturazione. Questi periodi di sovrasaturazione del parcheggio sono chiaramente identificabili: dalle 9:00 alle 14:00 negli edifici adibiti a uffici, dalle 11:00 alle 14:00 negli edifici commerciali e dalle 8:00 alle 16:00 per quanto riguarda i parcheggi su strada.

Nel caso dei parcheggi pubblici al di fuori della strada, è interessante esaminare i dati sull'utilizzo mensile medio. Alcune strutture di parcheggio sono particolarmente gettonate, come Skenderbej e Qytet Studenti. Tuttavia, è importante notare che Avni Rustemi e Diga e Liqenit presentano una rotazione significativamente più alta, con 7,5 e 4,5 veicoli che utilizzano ciascuno slot di parcheggio al giorno, rispettivamente⁹⁶. Questi dati mettono in evidenza la necessità di una gestione più efficiente delle risorse di parcheggio e la possibilità di ottimizzare ulteriormente l'utilizzo degli spazi disponibili, al fine di affrontare in modo efficace le sfide legate alla domanda di parcheggio nelle diverse fasce orarie e nelle varie strutture.

Localizzazione dei semafori e delle telecamere

Il TUCC “centro di controllo del traffico urbano di Tirana” è interconnesso in tempo reale con tutti i semafori (75), 23 telecamere a circuito chiuso sulle strade principali, 6 pannelli a messaggio variabile (VMS) e alcuni sensori di conteggio del traffico. Come per altri sistemi simili, sui

VMS vengono visualizzati messaggi relativi alla sicurezza stradale e informazioni aggiornate sul traffico nelle strade più importanti.



Figura 68.
Intersezioni controllate da semafori.

I semafori sono gestiti automaticamente in base a un calendario programmato basato sui dati. Inoltre, gli operatori possono agire manualmente per dare la precedenza alla strada più congestionata in base alle situazioni rilevate in tempo reale da telecamere e sensori di traffico. Il TUCC ha anche implementato uno schema di “onda verde” per consentire il flusso continuo del traffico su diverse intersezioni coordinate e lungo 14 corridoi stradali.

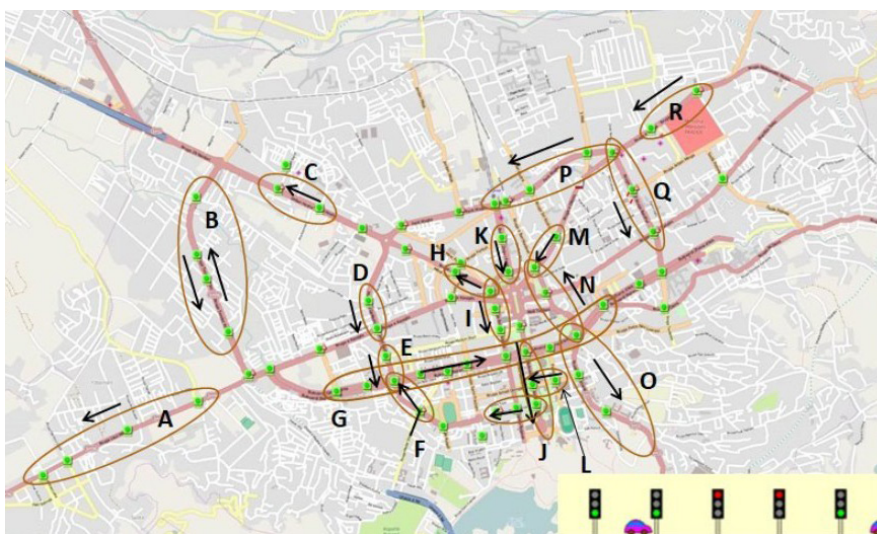
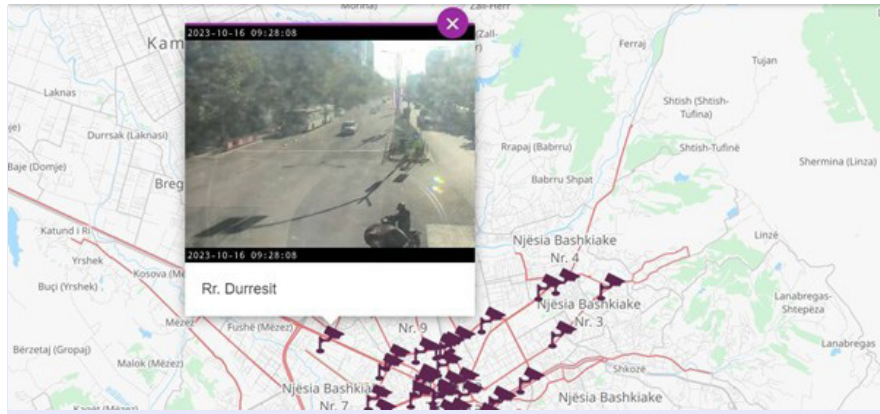


Figura 69.
Corridoi dell'onda verde.

Le attività del TUCC si basano su un software chiamato UTOPIA, un sistema di controllo del traffico adattivo ad alte prestazioni progettato per ottimizzare i flussi di traffico. Il software offre un'ampia gamma di strategie progettate per adattarsi a qualsiasi rete stradale e anche a condizioni di traffico imprevedibili. In modalità completamente adattiva, il software monitora e prevede costantemente lo stato del traffico e ottimizza la strategia di controllo in base all'efficienza del flusso e/o a criteri ambientali. Sensori e telecamere a circuito chiuso sono posizionati lungo i punti di ingresso e di uscita di ciascuna area di integrazione, per misurare con precisione i flussi. Alcuni dei vantaggi previsti per la città includono il miglioramento del flusso di traffico sulla rete stradale cittadina, la riduzione dei ritardi e dei tempi di percorrenza. Inoltre, contribuisce a mantenere un monitoraggio continuo dello stato del traffico e ad aumentare la sicurezza della città. Purtroppo, il sistema attuale presenta alcune limitazioni dovute alla mancanza di sensori installati. Le capacità del TUCC non sono ancora molto precise e molte operazioni vengono effettuate manualmente. I sensori installati e gli altri sistemi ITS sono stati collegati all'applicazione di infomobilità per smartphone Tirana Ime, disponibile per dispositivi Android e IOS. Gli utenti possono trovare informazioni aggiornate (e anche in tempo reale) su traffico, parcheggi a pagamento, trasporti pubblici urbani e interurbani, taxi e piste ciclabili. Possono anche utilizzare l'applicazione per pagare il parcheggio in strada e ricevere notifiche sugli ingorghi.

Le telecamere di videosorveglianza svolgono un ruolo fondamentale nel contesto del *digital twin* finalizzato alla risoluzione dei problemi legati al traffico. Queste telecamere sono uno strumento essenziale per raccogliere dati in tempo reale e informazioni visive sulle condizioni del traffico, consentendo così una gestione più efficace e una migliore comprensione dei problemi legati al traffico nelle aree urbane.

- **Monitoraggio in tempo reale:** Questa visione consente ai gestori del traffico di ottenere una panoramica immediata delle condizioni stradali e di reagire prontamente a incidenti, congestioni o altre situazioni di emergenza.
- **Raccolta di dati:** Le telecamere di videosorveglianza catturano una vasta quantità di dati sul traffico, tra cui il numero di veicoli, la velocità, la direzione di viaggio e altro ancora. Questi dati sono preziosi per l'analisi delle tendenze del traffico nel tempo e per identificare i punti critici nelle infrastrutture stradali che richiedono interventi.
- **Rilevamento e gestione del traffico:** Le telecamere di videosorveglianza possono essere integrate con sistemi di intelligenza artificiale (IA) per rilevare automaticamente eventi di traffico come incidenti, code, veicoli bloccati o movimenti anomali.
- **Miglioramento della sicurezza stradale:** Le telecamere di videosorveglianza contribuiscono notevolmente a migliorare la sicurezza stradale. La presenza di telecamere sulle strade può scoraggiare comportamenti pericolosi come l'eccesso di velocità, l'attraversamento di semafori rossi o la guida in stato di ubriachezza.
- **Pianificazione e sviluppo delle infrastrutture:** I dati raccolti dalle telecamere di videosorveglianza possono essere utilizzati per informare la pianificazione e lo sviluppo delle infrastrutture stradali. Le autorità possono identificare i punti critici in cui è necessario espandere le strade, migliorare l'illuminazione o implementare altre misure di sicurezza del traffico.



Le analisi svolte nel capitolo evidenziano come la crescita urbanistica e demografica di Tirana, insieme alla sua posizione strategica, abbiano generato sfide significative per il sistema di trasporti della città. La congestione del traffico, l'inefficienza del trasporto pubblico, l'inquinamento atmosferico e acustico e i problemi legati alla gestione dei parcheggi rappresentano criticità che richiedono interventi strutturali e strategici. La collaborazione con esperti locali e l'adozione di soluzioni basate sui dati permettono di definire un quadro d'azione mirato, ponendo le basi per un futuro più efficiente e resiliente per la città di Tirana.

Soluzione proposta

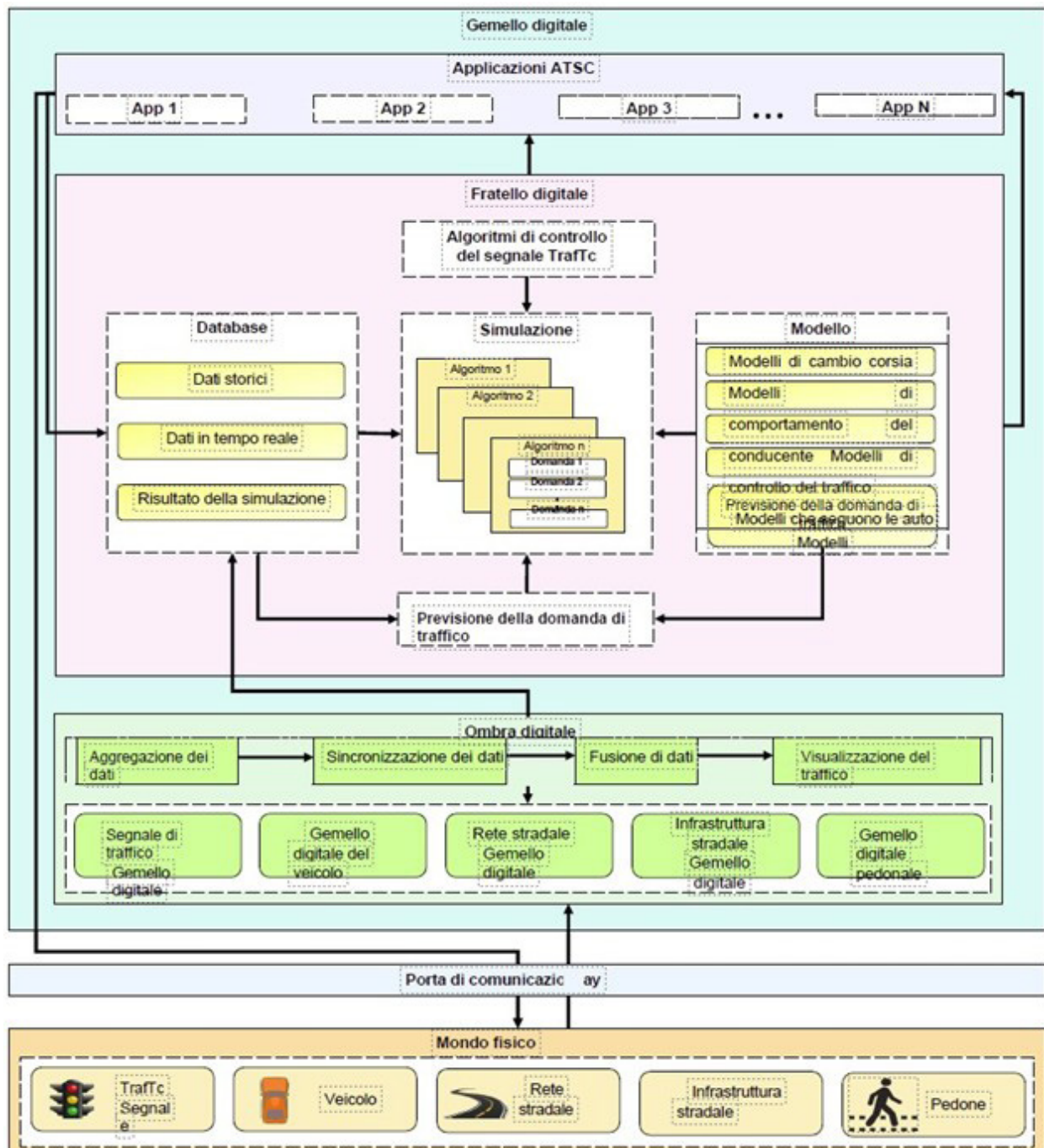
Dopo un'analisi approfondita delle caratteristiche del traffico nella città di Tirana, siamo giunti alla conclusione che le attuali dinamiche di flusso veicolare e la struttura delle intersezioni presentano notevoli margini di miglioramento. Il crescente numero di veicoli, unito alla struttura stradale che in alcuni punti diventa un collo di bottiglia, rende necessaria l'adozione di soluzioni innovative per ottimizzare la gestione del traffico. In tale contesto, abbiamo individuato una forte similitudine tra il nostro caso e la soluzione proposta da Sagar Dasgupta, Mizanur Rahman e Steven Jones⁹⁷ nel loro studio, motivo per cui abbiamo scelto di adottare un approccio analogo basato sulla tecnologia *digital twin*.

97 Dasgupta, S., et al., 2023.

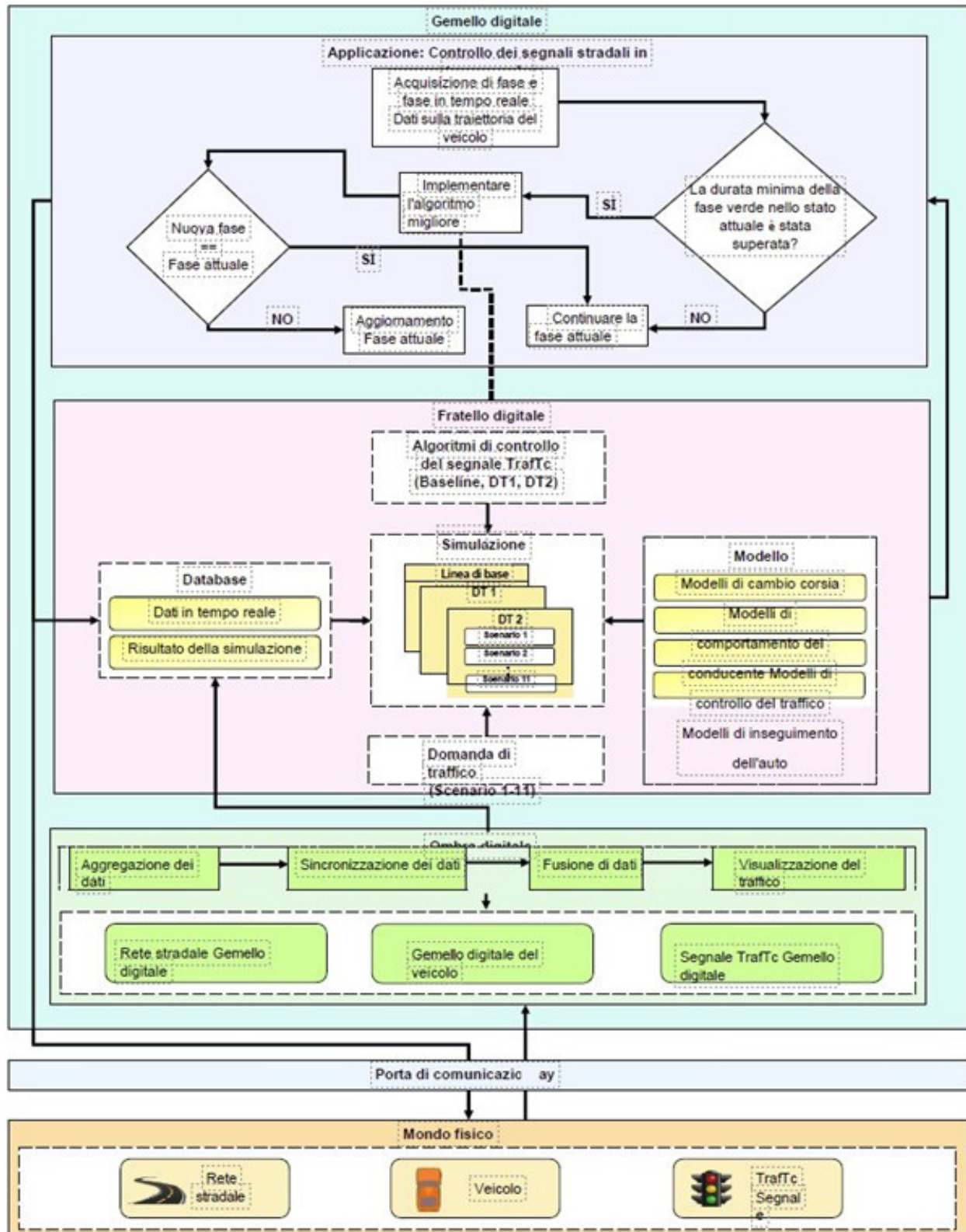
Il modello sviluppato da Dasgupta et al. dal titolo introduce un approccio basato su *digital twin* per migliorare le prestazioni delle intersezioni segnalate, riducendo i tempi di attesa e distribuendo in maniera più equa il traffico veicolare. Questo sistema si avvale di dati in tempo reale sulla traiettoria dei veicoli e previsioni di domanda di traffico per implementare strategie di controllo adattivo dei segnali. In particolare, il loro *framework* utilizza due algoritmi: DT1, che considera il ritardo accumulato da ciascun veicolo all'intersezione, e DT2, che estende questa analisi anche alle intersezioni adiacenti, migliorando così la gestione complessiva della rete viaria.

Analogamente, il traffico a Tirana presenta situazioni di congestione che potrebbero beneficiare di un sistema ATSC⁹⁸ (Adaptive Traffic Signal Control) basato su digital twin. Come sintetizzato nell'immagine 72.

98 Sistema avanzato di gestione del traffico che utilizza tecnologie intelligenti per regolare i tempi dei semafori in tempo reale in base alle condizioni effettive della circolazione.

**Figura 72.**

Modello generale del sistema ATSC basato su digital twin, si evidenziano le connessioni tra il mondo fisico e il mondo digitale. La struttura è suddivisa in più livelli: (i) Mondo fisico: comprende i veicoli, la rete stradale, l'infrastruttura e i pedoni, i cui dati vengono acquisiti in tempo reale. (ii) Ombra digitale: elabora e sincronizza i dati provenienti dal mondo fisico, creando rappresentazioni digitali degli elementi del traffico (veicoli, infrastrutture, segnali). (iii) "fratello" digitale: utilizza modelli di simulazione avanzati e algoritmi di controllo del traffico per ottimizzare i segnali semaforici.

**Figura 73.**

Dettaglio più specifico del funzionamento del sistema ATSC. Mostra il flusso decisionale per il controllo adattivo dei segnali semaforici, partendo dall'acquisizione dei dati fino all'implementazione delle strategie di ottimizzazione. Il Gemello Digitale raccoglie dati sulla fase attuale del semaforo e sulle traiettorie dei veicoli per valutare se un cambiamento della fase sia necessario. Se una fase semaforica ha superato la durata minima, il sistema decide se continuare la fase attuale o implementare un algoritmo migliorativo. Il "fratello" digitale si occupa della simulazione e dell'analisi della domanda di traffico attraverso diversi scenari (Baseline, DT1, DT2), che consentono

di confrontare le prestazioni dei vari modelli di controllo. L'ombra digitale garantisce l'integrazione e la sincronizzazione dei dati tra i diversi componenti del sistema. Il mondo fisico rappresenta l'ambiente reale, in cui le modifiche apportate dal digital twin si traducono in una gestione più efficiente del traffico.

La rete stradale della capitale albanese è caratterizzata da intersezioni critiche, specialmente nelle zone centrali e nelle arterie principali che collegano i distretti della città. Il nostro studio dimostra che, come nel caso analizzato da Dasgupta et al., un'ottimizzazione dei semafori, implementandoli con "semafori intelligenti", basata sull'analisi dinamica del traffico potrebbe ridurre in modo significativo i tempi di attesa e migliorare la fluidità del traffico.

Principali vantaggi attesi:

- Riduzione dei tempi di attesa ai semafori: la regolazione dinamica dei segnali ridurrà i ritardi, con un abbassamento stimato tra il 10% e il 50% a seconda dell'intensità del traffico.
- Distribuzione più uniforme del traffico: il sistema favorirà la riduzione degli ingorghi nelle aree più congestionate e una migliore utilizzazione delle arterie alternative.
- Minori emissioni di CO₂: grazie alla riduzione delle fermate e ripartenze, si prevede un calo delle emissioni legate al traffico veicolare.
- Miglioramento della sicurezza stradale: una gestione più efficiente dei flussi di traffico ridurrà il rischio di incidenti dovuti a improvvisi cambi di velocità e situazioni di stress per i conducenti.

Per valutare l'efficacia del sistema, verranno condotte simulazioni basate sui dati raccolti. I parametri di riferimento includeranno il tempo medio di percorrenza, il numero di arresti ai semafori e la lunghezza delle code nelle ore di punta.

Parametro	Prima del Digital Twin	Dopo il Digital Twin	Differenza
Tempo medio di attesa ai semafori (s)	45-90 s	25-60 s	🚦 Riduzione del tempo di attesa
Numero di arresti per veicolo	5-8	2-4	🚦 Diminuzione degli stop ai semafori
Riduzione emissioni CO ₂ (%)	-	15-25%	🌱 Maggiore sostenibilità ambientale
Efficienza del flusso veicolare	Discontinua e congestionata	Ottimizzata e fluida	🚗 Migliore scorrevolezza del traffico
Adattabilità ai cambiamenti del traffico	Statico, basato su tempi fissi	Dinamico, adattivo in tempo reale	📡 Risposta in tempo reale alla domanda di traffico
Sicurezza stradale	Incidenti frequenti agli incroci	Riduzione dei punti critici	⚠️ Maggiore sicurezza per veicoli e pedoni
Ottimizzazione delle infrastrutture	Limitata, basata su dati storici	Basata su simulazioni e dati in tempo reale	📊 Decisioni più accurate per il miglioramento della rete stradale

Figura 74.

Confronto della situazione del traffico a Tirana prima e dopo l'implementazione del digital twin per il controllo dei semafori e della mobilità urbana.

L'implementazione di un sistema ATSC basato su *digital twin* rappresenta un primo passo promettente per la gestione del traffico a Tirana. Le analogie con il caso studio “sfruttare la tecnologia del *digital twin* per il controllo adattivo dei segnali stradali: migliorare le prestazioni delle intersezioni semaforiche e la soddisfazione degli utenti” viene confermata la validità di un approccio adattivo ai segnali stradali, in grado di rispondere in tempo reale alle variazioni della domanda di traffico. Tuttavia, siamo consapevoli che questo è solo l'inizio e che da solo non sarà sufficiente per risolvere in modo definitivo i problemi di congestione della città. L'implementazione di altre soluzioni integrate risulta quasi obbligatoria per garantire un miglioramento efficace e duraturo del sistema di mobilità urbana.

Siamo convinti che questa sia la strada giusta da percorrere per trasformare Tirana in una città più efficiente, sostenibile e innovativa sotto il profilo della gestione del traffico. Le difficoltà tecniche, economiche, politiche e

sociali non mancano, ma rappresentano sfide che devono essere affrontate con determinazione e visione strategica. L'implementazione di soluzioni basate su è solo un primo passo in un percorso più ampio che richiederà continui investimenti, adattamenti e collaborazioni tra istituzioni, esperti e cittadini. Solo attraverso un approccio integrato e multidisciplinare sarà possibile ottenere risultati duraturi, migliorando la qualità della vita urbana e rendendo Tirana un modello di innovazione per le città del futuro.

CONCLUSIONI

Al termine di questa approfondita analisi sui *digital twin* urbani e sui numerosi temi a essi correlati, emerge un quadro complesso e ricco di implicazioni per il futuro delle città e delle infrastrutture. L'esplorazione delle tecnologie abilitanti, come il *Building Information Modeling* (BIM), l'*Internet of Things* (IoT), i Big Data e la *Blockchain*, ha sottolineato la l'importanza fondamentale nella definizione della struttura dei *digital twin*. Queste tecnologie offrono una piattaforma dinamica e versatile per la gestione, la simulazione e l'ottimizzazione dei contesti urbani. Inoltre, l'analisi del ruolo delle metriche di valutazione ha permesso di comprendere come sia possibile misurare l'efficacia e l'impatto di queste soluzioni, fornendo un quadro metodologico per il loro sviluppo e implementazione.

I casi studio analizzati, che spaziano tra città di diversa scala e complessità, come Cambridge, Monaco di Baviera, Rotterdam, Singapore e Zurigo, e quartieri specifici come Zuidooost ad Amsterdam, Docklands di Dublino, Hervanta a Tampere, Kalasatama a Helsinki e Herrenberg a Stoccarda, hanno fornito un'ampia varietà di approcci e applicazioni. Questa diversità ha consentito di confrontare metodi e strategie, rivelando non solo le potenzialità dei *digital twin*, ma anche le sfide tecniche, politiche e sociali legate alla loro implementazione. In particolare, si è evidenziato come il successo di questi progetti dipenda dalla capacità di bilanciare le esigenze locali con l'adozione di tecnologie standardizzate e interoperabili, favorendo così un approccio sistemico alla gestione urbana.

L'esperienza svolta nella città di Tirana ha permesso di acquisire una maggiore consapevolezza delle sfide connesse all'implementazione di un *digital twin*, in particolare per affrontare problematiche complesse come la gestione del traffico.

Il processo, a partire dal rilievo dei dati fino alla futura creazione del modello digitale, ha evidenziato non solo la

complessità tecnica del progetto, ma anche la necessità di coinvolgere un ampio spettro di competenze professionali. Inoltre, è emerso come il successo di tali iniziative dipenda in modo significativo dalla volontà sociale e politica, che rappresentano elementi imprescindibili per garantire l'efficacia e la sostenibilità dell'intero processo.

Dall'analisi di questi casi emergono temi chiave che delineano una visione complessiva: l'importanza della standardizzazione dei dati, necessaria per superare le frammentazioni tecnologiche; l'interoperabilità tra piattaforme e sistemi, che consente l'integrazione fluida delle tecnologie emergenti; e la sostenibilità, che deve essere al centro di ogni progetto urbano, non solo come obiettivo ambientale, ma anche come principio guida per l'efficienza operativa e lo sviluppo sociale. È evidente che i *digital twin* non sono solo strumenti tecnici, ma veri e propri catalizzatori per ripensare la pianificazione e la governance delle città, introducendo modalità di gestione più dinamiche, inclusive e resilienti.

Guardando al futuro, le potenzialità di queste tecnologie suggeriscono la necessità di approfondire ulteriormente alcuni aspetti chiave. Questi includono l'integrazione dell'intelligenza artificiale per migliorare la capacità predittiva e analitica dei *digital twin*, il coinvolgimento attivo di cittadini e stakeholder per garantire soluzioni condivise e orientate alle esigenze delle comunità, e un'espansione dell'approccio dei *digital twin* oltre la scala urbana per affrontare sfide regionali e nazionali.

Questo studio si conclude, quindi, con l'identificazione di quattro aspetti principali, ciascuno dei quali rappresenta un pilastro per il futuro sviluppo e l'applicazione dei *digital twin*: la gestione dei dati, il ruolo dell'intelligenza artificiale, il coinvolgimento diretto degli *stakeholder* e dei cittadini e l'ampliamento dell'orizzonte applicativo oltre la scala urbana. Questi elementi non solo sintetizzano i risultati della

ricerca, ma offrono una base per nuove riflessioni e percorsi di studio che mirano a realizzare città più intelligenti, sostenibili e inclusive.

Gestione dei dati

L'acquisizione dei dati rappresenta un elemento cruciale per il successo di un digital twin urbano, poiché la modalità con cui vengono reperiti, la loro quantità e, soprattutto, la loro accuratezza, influiscono direttamente sull'efficienza del modello. Un *digital twin* efficace richiede un flusso continuo e accurato di dati che rispecchi la realtà in tempo reale, consentendo la simulazione di fenomeni complessi come il traffico, l'inquinamento o il consumo energetico. La necessità di acquisire dati in maniera continua, con livelli di dettaglio differenti, implica che il *digital twin* debba interagire con edifici, paesaggi, persone e oggetti, tutti in costante mutamento.

Come evidenziato nel capitolo 1.3, negli ultimi anni importanti aziende tecnologiche e rinomate università hanno concentrato le loro ricerche sulla raccolta e analisi dei dati, ottenendo progressi significativi in termini di tecnologie e metodologie. Tuttavia, questo da solo non è sufficiente per il pieno sviluppo dei *digital twin* urbani, che richiedono un ulteriore passo avanti: la capacità di riflettere in tempo reale l'ambiente fisico, scambiando grandi volumi di dati con precisione e dettagli sempre più elevati. Questo aspetto pone sfide che necessitano di ulteriori ricerche e applicazioni pratiche per migliorare l'integrazione e l'efficienza dei *digital twin*.

L'esperienza acquisita in città come Tirana (capitolo 5.1) e Rotterdam (capitolo 4.7) ha dimostrato che i metodi e le tecniche di acquisizione dei dati variano in base al dominio di applicazione e agli obiettivi specifici del *digital twin*. Ogni settore urbano, infatti, ha esigenze diverse in termini di quantità e qualità dei dati necessari, e queste sono spesso

influenzate dai *software* e dalle tecnologie utilizzate. In alcuni casi, l'acquisizione dei dati è fortemente condizionata dalle limitazioni delle licenze *software*, che utilizzano standard differenti, creano difficoltà nell'integrazione e nella gestione uniforme delle informazioni.

Altro aspetto fondamentale riguarda la dimensione e il livello di dettaglio del modello digitale stesso.

Per un *digital twin* urbano, è essenziale rappresentare la città con un livello di definizione adeguato agli scopi del modello, bilanciando la necessità di fornire una visualizzazione dettagliata con l'uso efficiente dei dati per analisi e previsioni.

Un modello accurato deve non solo rappresentare la città in maniera fedele, ma anche consentire un'elaborazione efficace dei dati, fornendo una piattaforma digitale capace di supportare applicazioni e *software* di gestione urbana.

Tuttavia, le attuali capacità computazionali impongono di trovare un equilibrio tra il livello di dettaglio (LOD) e la dimensione del modello, per sfruttare appieno le potenzialità dei dati senza sovraccaricare i sistemi informatici. Solo così si possono garantire analisi accurate e previsioni affidabili, riducendo al contempo i costi e gli errori.

È importante sottolineare che, sebbene ci siano numerosi studi sul tema della gestione dei dati nelle *smart city* e nei *digital twin*, la ricerca attuale, soprattutto a livello europeo, si sta concentrando sull'adozione di standard uniformi per dati, modelli e schemi di progettazione. Questi standard sono fondamentali per garantire l'interoperabilità tra i vari sistemi e applicazioni utilizzati, permettendo una maggiore efficienza nella gestione dei dati eterogenei prodotti da diverse fonti all'interno della città. L'interoperabilità non solo riduce i tempi e gli errori, ma diminuisce anche i costi, rendendo più accessibili e sostenibili le tecnologie digitali su scala urbana. Tuttavia, la strada verso una piena integrazione dei dati richiede ulteriori sforzi, soprattutto per superare le barriere imposte dai *software* proprietari, che spesso

utilizzano standard frammentati e non compatibili.

In conclusione, l'implementazione di un *digital twin* urbano richiede un approccio olistico che combini tecnologie avanzate, standardizzazione dei dati e capacità computazionali elevate. Solo attraverso la continua evoluzione di queste componenti sarà possibile realizzare *digital twin* capaci di rispondere alle complesse esigenze delle città moderne, migliorando la qualità della vita e ottimizzando la gestione delle risorse urbane.

AI

L'intelligenza artificiale emerge come un pilastro fondamentale per i *digital twin* urbani, consentendo loro di evolvere in strumenti dinamici e intelligenti. Grazie a tecnologie come il *machine learning* e il *deep learning*, i *digital twin* possono analizzare dati complessi in tempo reale, identificare schemi, prevedere eventi e ottimizzare risorse. Questi progressi permettono una gestione urbana più efficiente, sostenibile e reattiva, supportando la manutenzione predittiva delle infrastrutture e migliorando la pianificazione e la *governance*.

La ricerca ha evidenziato che l'integrazione dell'IA nei *digital twin* può ridurre i costi operativi, migliorare l'affidabilità dei sistemi e contribuire alla resilienza urbana.

Tuttavia, l'integrazione dell'intelligenza artificiale nei *digital twin* pone anche sfide significative. La qualità e la quantità dei dati raccolti, come abbiamo visto, influenzano direttamente l'efficacia di questi sistemi, e la frammentazione degli standard di dati e *software* rappresenta un ostacolo alla piena interoperabilità. È necessario sviluppare *framework* condivisi per garantire l'integrazione tra tecnologie diverse e promuovere la standardizzazione, riducendo i costi di implementazione e migliorando l'accessibilità delle soluzioni digitali.

Guardando al futuro, l'intelligenza artificiale nei *digital twin* offre opportunità straordinarie, la capacità dei *digital twin* di integrare l'intelligenza artificiale con altre tecnologie, come i big data, l'IoT e il BIM, li rende strumenti indispensabili per trasformare le città in ambienti più vivibili, efficienti e resilienti.

Concludendo, l'adozione dell'intelligenza artificiale nei *digital twin* urbani rappresenta un passo fondamentale verso una gestione urbana più intelligente e sostenibile. Le potenzialità dell'intelligenza artificiale, combinate con tecnologie complementari, non solo migliorano la capacità di risposta delle città alle sfide contemporanee ma aprono anche nuove possibilità per la co-progettazione con cittadini e *stakeholder*. Per realizzare pienamente questi benefici, sarà essenziale continuare a investire nella ricerca e nello sviluppo, garantendo un'implementazione etica e inclusiva che tenga conto delle esigenze sociali, ambientali ed economiche delle città del futuro, andando oltre lo sviluppo tecnico e concentrarsi sugli aspetti sociali, morali e giuridici legati alla progettazione e all'uso della tecnologia.

Coinvolgimento degli stakeholder e cittadini

La ricerca sui *digital twin* urbani è spesso messa in relazione con il concetto consolidato di *smart city*, affrontando questioni centrali come la democrazia, la sovranità dei dati e i modelli e strumenti per la loro gestione. Mentre la *smart city* rappresenta una fiducia diffusa nelle tecnologie digitali per migliorare la sostenibilità ambientale e la qualità della vita dei cittadini, essa porta con sé anche una serie di criticità. Tra queste emergono i significativi investimenti privati dell'industria tecnologica, l'affidabilità delle scelte urbane basate su algoritmi, spesso slegati da una visione complessiva della città, e le implicazioni etiche e di *privacy* legate alla raccolta di dati dai cittadini, spesso inconsapevoli del loro utilizzo e del monitoraggio a cui sono sottoposti.

L'equilibrio tra competenze private e pubbliche è un tema chiave. Da un lato, il coinvolgimento delle grandi aziende tecnologiche è fondamentale per lo sviluppo di progetti complessi come i *digital twin*, dall'altro, ciò comporta limitazioni in termini di accessibilità, condivisione e interoperabilità dei dati. Come visto nel paragrafo precedente, questa dinamica crea barriere alla partecipazione attiva dei cittadini e all'emergere di nuove opportunità per le piccole imprese locali. Diventa quindi necessario esplorare come sviluppatori indipendenti e comunità locali possano essere coinvolti nella creazione di modelli virtuali su misura per le specifiche esigenze del territorio, evitando l'approccio gerarchico imposto dalle grandi multinazionali.

Nel corso di questa ricerca, sono stati esaminati diversi casi pilota di *digital twin* urbani, che mirano a superare tali limitazioni. Un esempio è il *digital twin* urbano di Docklands di Dublino, accessibile online e aperto al contributo dei cittadini, che possono aggiornare i dati e fornire *feedback*. In altri casi, come nella regione di Cambridge e nella città di Herrenberg, il coinvolgimento diretto dei residenti è stato una componente fondamentale del processo progettuale, valorizzando la co-produzione di conoscenza e creando un dialogo tra attori locali e amministrazioni. Questi progetti pilota rappresentano un modello concettuale che potrebbe tracciare la strada per futuri sviluppi metodologici, permettendo di valutare in fase pre-decisionale le potenzialità di un'idea e i relativi investimenti.

In ogni modo, malgrado i progressi, una delle principali sfide rimane il numero limitato di partecipanti coinvolti. Questo evidenzia la necessità di ampliare il coinvolgimento delle comunità locali, delle associazioni e di altri attori urbani. Inoltre, poiché tali esperienze sono ancora locali e legate a specifici contesti normativi e sociali, non è possibile generalizzarle o esportarle facilmente in altre realtà. Saranno necessari ulteriori studi per capire se e come i

digital twin urbani possano realmente democratizzare le scelte politiche, supportare la gestione temporale delle città e produrre nuove conoscenze utili a migliorare la pianificazione urbana.

Le ricerche finora condotte e i casi studio analizzati hanno dimostrato che i *digital twin* possono supportare, ma non sostituire completamente, le tradizionali metodologie partecipative.

Nei casi studio si è visto come le pratiche partecipative abbiano integrato strumenti digitali, come app per smartphone o dispositivi portatili, con *workshop* dedicati alla raccolta di *feedback* e all'esplorazione dei requisiti desiderati dagli utenti. Questa sinergia tra approcci digitali e fisici ha contribuito a creare una base di conoscenze pratiche capace di influenzare, e potenzialmente reindirizzare, lo sviluppo dei *digital twin* urbani.

Tuttavia, per trarre pieno beneficio sia dagli strumenti tradizionali che da quelli digitali, è necessario sviluppare un'integrazione tra i due, sia a livello metodologico che pratico. Ciò richiede la creazione di nuovi strumenti e la formazione di operatori in grado di fungere da "facilitatori" nei processi partecipativi, e da "mediatori" tra la dimensione fisica e digitale.

La letteratura scientifica concorda nel ritenere che le esperienze fino ad oggi condotte per portare le istanze dei cittadini nei processi decisionali supportati dai *digital twin* siano ancora in una fase sperimentale, poiché molti dei dati necessari per alimentare tali modelli non sono facilmente accessibili a causa della frammentazione nella proprietà dei dati e delle infrastrutture, nonché degli interessi commerciali in gioco.

Il vero impatto positivo dei *digital twin* urbani si realizzerà quando i vari attori urbani non si limiteranno a scegliere tra scenari di intervento già predefiniti, ma potranno partecipare attivamente alla co-progettazione del modello,

fin dalla sua concezione iniziale. Solo allora, i *digital twin* potranno diventare strumenti inclusivi, capaci di rispondere e contribuire non solo alle esigenze tecniche della pianificazione urbana, ma anche alle aspettative sociali e democratiche delle comunità.

Oltre la scala urbana

Un'importante direzione di ricerca futura riguarda l'ampliamento dell'orizzonte di applicazione dei *digital twin* urbani verso una dimensione nazionale, superando i confini della singola città. Un esempio significativo di questa tendenza è rappresentato dal programma *national digital twin* (NDTp) del Regno Unito, gestito dal *centre for digital built britain* (CDBB). Questa iniziativa ambiziosa mira a creare un'infrastruttura di *digital twin* a livello nazionale, fornendo un sistema di gemelli digitali interconnessi. Il CDBB ha recentemente completato la sua missione quinquennale, pubblicando rapporti che documentano i progressi ottenuti. Un elemento chiave di questo programma è rappresentato dai "*gemini principles*", una serie di principi guida elaborati per facilitare la creazione di un ecosistema di *digital twin*, basato su un approccio federato di "*system-of-systems*". I *gemini papers* raccolgono le lezioni apprese e offrono una visione condivisa dalla comunità internazionale coinvolta nello sviluppo di *digital twin*, fornendo un modello per altre città che desiderano intraprendere un percorso simile e potenzialmente federare i propri gemelli digitali nella rete nazionale.

Oltre a questa iniziativa nazionale, l'Europa ha avviato un progetto ambizioso denominato *Destination Earth*, volto a esplorare e comprendere fenomeni naturali e sociali a scala globale. Questo progetto prevede lo sviluppo di una piattaforma cloud in grado di raccogliere dati provenienti da fonti eterogenee, come i satelliti, e di condividerli attraverso un cruscotto aperto e accessibile. L'obiettivo

principale è quello di promuovere la collaborazione tra più *stakeholder*, facilitando la comprensione e la gestione delle problematiche ambientali e sociali su larga scala.

Un'altra iniziativa degna di nota è il progetto “*Digital Urban European Twins for Smarter Decision Making*” (DUET), che coinvolge 15 partner europei e sperimenta gemelli digitali urbani in tre aree pilota: la regione delle Fiandre in Belgio, Pilsen nella Repubblica Ceca e Atene in Grecia. Ciascuno di questi *test-bed* parte da livelli differenti di maturità digitale e di disponibilità di dati, con l'obiettivo comune di migliorare i processi decisionali. DUET utilizza modelli che simulano le dinamiche urbane e i fenomeni ambientali, migliorando la capacità di previsione e coordinamento nelle emergenze, riducendo il traffico e, l'impronta di carbonio delle città coinvolte. Questo progetto propone soluzioni economiche e adattabili, facilmente replicabili da altre città con sforzi limitati, contribuendo così a una gestione urbana più sostenibile ed efficiente.

Queste iniziative dimostrano l'evoluzione del concetto di *digital twin*, non solo in termini di scala ma anche di ambizione. Tra il 2019 e il 2024, si è assistito a una proliferazione di prototipi di *digital twin* urbani in Europa, come quelli di Dublino, Cambridge e Herremberg, che hanno giocato un ruolo pionieristico nello sviluppo di queste tecnologie.

È evidente che nei prossimi anni assisteremo a una diffusione sempre più ampia dei *digital twin* urbani, sostenuta dal rapido avanzamento delle tecnologie digitali, dall'integrazione dei sistemi IoT, dall'intelligenza artificiale e dalla crescente disponibilità di big data. Questi strumenti non solo rivoluzioneranno la gestione delle città, rendendola più efficiente e sostenibile, ma rappresenteranno anche un potente catalizzatore per la ricerca interdisciplinare, l'innovazione tecnologica e la formazione di nuove competenze professionali. I *digital twin* si configureranno come piattaforme dinamiche e interattive

in grado di supportare la sperimentazione di scenari urbani complessi, la valutazione dell'impatto ambientale delle scelte progettuali, nonché lo sviluppo di soluzioni smart per la mobilità, l'energia e la gestione delle risorse. In questo scenario, università, pubbliche amministrazioni e aziende saranno chiamate a collaborare per definire nuovi modelli operativi e culturali, basati su una governance dei dati condivisa, sull'interoperabilità dei sistemi e su una visione olistica dell'ambiente costruito.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

Alam, T. (2021). Applicazioni IoT basate su cloud e il loro ruolo nelle città intelligenti.

Alavi, AH, Jiao, P., Buttlar, WG, Lajnef, N., (2018). Città intelligenti abilitate dall'Internet delle cose: stato dell'arte e tendenze future.

Arup. (2019). Gemelli digitali nella pianificazione urbana. Arup. Londra.

Atitallah, S. B., Driss, M., Boulila, W., Ben Ghézala, H., (2020). Sfruttare l'apprendimento profondo e l'analisi dei big data IoT per supportare lo sviluppo delle città intelligenti: revisione e direzioni future. *Computer science review*. Elsevier.

Barkham, R., Bokhari, S., Saiz, A., (2022). Big data urbani: gestione delle città e mercati immobiliari. In P. M. Pardalos, S. T. Rassia, A. Tsokas (a cura di), *Artificial Intelligence, Machine Learning, and Optimization Tools for Smart Cities*. Springer.

Barmounakis, E., Geroliminis, N., (2020). Sulla nuova era del monitoraggio del traffico urbano con dati massivi di droni: l'esperimento sul campo su larga scala. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Elsevier.

Banihashemi, F., Maderspacher, J., Brasche, J., Lang, W. (2017). Efficacia delle misure passive di adattamento climatico negli edifici residenziali in Germania. Università tecnica di Monaco. Monaco.

Bartos, M., Kerkez, B. (2021). *Pipedream: un modello gemello digitale interattivo per sistemi di drenaggio naturali e urbani*. Basilea.

Barresi, A. (2023). Gemello digitale urbano e pianificazione urbana per città sostenibili. *TECHNE: Journal of Technology for Architecture and Environment*. Firenze University Press. Firenze.

Battistoni, F. (2021). Nicos Komninos: la smart city nasce

dall'intelligenza collettiva. Forum PA.

Batty, M. (2013). Big data, città intelligenti e pianificazione urbana. Dialoghi di Geografia Umana.

Batty, M. (2018). Intelligenza artificiale e smart city. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science.

Bibri, S. E., Huang, J., Jagatheesaperumal, S. K., Krogstie, J. (2024). L'interazione sinergica tra intelligenza artificiale e digital twin nella pianificazione ambientale di città intelligenti sostenibili: una revisione sistematica completa. Scienze ambientali ed ecotecnologie.

Bolton, A., Butler, L., Dabson, I., Enzer, M., Evans, M., Fenemore, T., Harradence, F., Keaney, E., Kemp, A., Luck, A. (2018). Principi dei gemelli: Valori guida per il gemello digitale nazionale e il quadro di gestione delle informazioni. Centre for digital built Britain.

Borgman, C. L. (2015). Big data, little data, non data: la ricerca nel mondo in rete. MIT Press. Cambridge.

Boschert, S., Rosen, R. (2016). Gemello digitale: l'aspetto della simulazione. In P. Hehenberger D. Bradley, a cura di Mechatronic Futures: Sfide e soluzioni per i sistemi meccatronici e i loro progettisti. Springer. Londra.

Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., Rezgui, Y. (2020). Verso un gemello digitale semantico per l'edilizia: indicazioni per la ricerca futura. Automation in Construction. Elsevier. Amsterdam.

Boschert, S., & Rosen, R. (2016). Gemello digitale: l'aspetto della simulazione. In P. Hehenberger D. Bradley (a cura di), Mechatronic Futures: sfide e soluzioni per i sistemi meccatronici e i loro progettisti. Springer.

Botín-Sanabria, D. M., Mihaita, A.-S., Peimbert-García, R. E., Ramírez-Moreno, M. A., Ramírez-Mendoza, R. A., Lozoya-Santos, J. d. J. (2022). Sfide e applicazioni della tecnologia dei gemelli digitali: una revisione completa. Remote Sensing. Basilea. MDPI.

Buscher, V. (2019). *Il gemello digitale: verso un quadro significativo*. Londra. Arup.

Cacciari, M. (2004). *La città*. Laterza. Roma-Bari.

Calzati, S. (2023). Non è più hype, non è ancora mainstream? Ricalibrare le aspettative e la realtà dei gemelli digitali delle città: una prospettiva di studio di caso. *Frontiers in Big Data*.

Caprari, G., Castelli, G., Montuori, M., Camardelli, M., Malvezzi, R., (2022). Gemello digitale per la pianificazione urbana nell'era del Green Deal: stato dell'arte e prospettive future. *Sustainability*.

Caragliu, A., Del Bo, C., Nijkamp, P., (2011). Città intelligenti in Europa. *Journal of Urban Technology*.

Carpo, M., (2017). *La seconda svolta digitale, Il design oltre l'intelligenza*. MIT Press. Cambridge.

Carpo, M., (2020). *Storia brevissima, ma si spera veridica, della svolta numerica in architettura*. Casabella.

Carvalho, R., da Silva, A. R., (2021). Requisiti di sostenibilità dei sistemi basati su gemelli digitali: una revisione sistematica della letteratura. Basilea. MDPI.

Casini, M. (2022). *Edilizia 4.0*. Roma. Maggioli Editore.

Castelli, G., Cesta, A., Diez, M. (2019). Intelligenza urbana: un modello modulare, completamente integrato e in evoluzione per il gemellaggio digitale delle città. In *Atti della 16° Conferenza Internazionale sulle Reti Ottiche ad Alta Capacità e le Tecnologie Abilitanti/Emergenti*.

CB Insights. (2021). *Che cos'è una Smart City*. CB Insights. New York.

Cenere, S., (2017). *Smart city e adattamento ai cambiamenti climatici: i casi Genova e Copenaghen a confronto*.

Charitonidou, M., (2021). *Spazi pubblici nella nostra società basata sui dati: i miti dell'universalismo digitale*.

Charitonidou, M., (2022). *Gemelli digitali su scala urbana nella società basata sui dati: sfidare l'universalismo digitale nel processo decisionale di pianificazione urbana*.

Chen, L., Sharman, R., Rao, H. R., Upadhyaya, S., Pinsonneault,

A., (2021). Modello di maturità del gemello digitale basato sui principi gemini per la gestione patrimoniale.

Cheng, J. C. P., Chen, W., Chen, K., Wang, Q. (2020). Framework di pianificazione della manutenzione predittiva basato sui dati per componenti MEP basato su BIM e IoT utilizzando algoritmi di machine learning. Automation in construction. Elsevier. Amsterdam.

Città di Helsinki., (2017-2021). La città più funzionale del mondo: la strategia della città di Helsinki.

Città di Helsinki., (2021). La città di Helsinki espande la digitalizzazione con il gemello digitale in tutta la città.

Cinquepalmi, F., Mecca, S., Pennacchia, E., Agostinelli, **S., Astiaso Garcia, D.** (2021). Verso città in (ri)evoluzione. Fragilità urbane e prospettive nel XXI secolo. FrancoAngeli. Roma.

Ciribini, A. L. C. (2016). BIM e digitalizzazione dell'ambiente costruito. Palermo. Grafill.

Cisco Systems. (2014). Il modello di riferimento dell'Internet delle cose. San Jose, CA: Cisco Systems.

Commissione Europea. (2015). Riqualificazione energetica: la carta vincente per il nuovo inizio dell'Europa. Bruxelles. Commissione Europea.

Commissione Europea. (2020). Tecnologie abilitanti per l'Industria 5.0: risultati di un workshop con i leader tecnologici europei. Bruxelles. Commissione Europea.

Commissione Europea. (2021). Costruire un futuro resiliente ai cambiamenti climatici: una nuova strategia dell'UE sull'adattamento ai cambiamenti climatici. Bruxelles. Commissione Europea.

Commissione Europea. (2021). Industria 5.0: una visione trasformativa per l'Europa: governare le trasformazioni sistemiche verso un'industria sostenibile. Bruxelles. Commissione Europea.

Commissione Europea. (2021). Archivio delle pubblicazioni del JRC. Centro comune di ricerca. Bruxelles.

- COPA-DATA.** (2021). Significato di IoT e IIoT – Internet (industriale) delle cose. Salisburgo. COPA-DATA GmbH.
- Curdes, G. (2010). Morfologia urbana e cambiamenti climatici: quale morfologia può sopravvivere. Milano. FrancoAngeli.
- Cureton, P., Dunn, N.** (2020). Gemelli digitali delle città e futuri evasivi. In A. Aurigi N. Odendaal, Plasmare l'intelligenza per città migliori: ripensare e plasmare le relazioni tra spazio urbano e tecnologie digitali. Londra, San Diego, Cambridge, Oxford. Academic Press.
- Dadi, S.,** (2018). Applicazioni GIS alle Smart Cities.
- D'Ambrosio, V., Sgobbo, A.,** (2023). Comunità energetica rinnovabile: un'opportunità di rigenerazione urbana eco-sociale per l'edilizia pubblica. *Journal of Technology for Architecture and Environment*.
- Dasgupta, S., Rahman, M. Jones, S.,** (2023). Sfruttare la tecnologia del digital twin per il controllo adattivo dei segnali stradali: migliorare le prestazioni delle intersezioni semaforiche e la soddisfazione degli utenti. arXiv.
- Delgado, JMD, Oyedele, L.,** (2021). Gemelli digitali per l'ambiente costruito: apprendimento da modelli concettuali e di processo nella produzione.
- De Masi, D.,** (2000). La società post-industriale. FrancoAngeli. Milano.
- Dembski, F., Deckert, A., Ulmer, F., Ruddat, M., Wössner, U.,** (2020). Gemelli digitali urbani per città intelligenti e cittadini: il caso di studio di Herrenberg. Germania.
- Dembski, F., Wössner, U., Yamu, C.,** (2019). Digital twin, realtà virtuale e sintassi spaziale: impegno civico e supporto decisionale per città intelligenti e sostenibili. Beijing.
- Deng, T., Zhang, K., Shen, Z.,** (2021). Una revisione sistematica di una città gemella digitale: un nuovo modello di governance urbana verso le città intelligenti.
- D'Hauwers, R., Walravens, N., Ballon, P.,** (2021). Da un gemello digitale urbano inside-in a un outside-out: modelli di business e sfide di implementazione. *ISPRS Annali di Fotogrammetria,*

Telerilevamento e Scienze dell'Informazione Spaziale. Gottinga. Copernicus Publications.

Eisenman, P., (1992). Oltre lo sguardo. L'architettura nell'epoca dei media elettronici. Editoriale Domus. Milano.

Elhoseny, H., Elhoseny, M., Abdelrazek, S., El-Bakry, H., Riad, A., (2016). Utilizzo dell'architettura orientata ai servizi (SOA) nelle città intelligenti.

Eyre, J., Freeman, C. (2018). Applicazioni immersive dei gemelli digitali industriali. In Atti della 15^a Conferenza Internazionale EuroVR (pp. 9). Londra: EuroVR Association.

Fan, C., Zhang, C., Yahja, A., Mostafavi, A., (2021). Disaster city digital twin: una visione per l'integrazione dell'intelligenza artificiale e umana per la gestione dei disastri. International Journal of Information Management. Amsterdam. Elsevier.

Floros, G., (2017). Indagine sulle capacità di integrazione tra IFC e CityGML LOD3 per la modellazione urbana 3D. Tesi di dottorato, Università di Newcastle. Newcastle. Università di Newcastle.

Fjeld, T. M. B. (2020). Digital twin – Verso una comprensione congiunta all'interno del settore AEC/FM. Norwegian university of science and technology.

Fortune Business Insights. (2023). Dimensioni del mercato dei gemelli digitali, quota e analisi dell'impatto del COVID-19, per tipo (gemello digitale di prodotto, gemello digitale di processo e gemello digitale di sistema), per settore e previsioni regionali, 2023-2030. Fortune Business Insights.

Främling, K., Holmström, J., Loukkola, J., Nyman, J., Kaustell, A. (2006). Agenti di prodotto per la gestione delle informazioni sugli oggetti fisici. ResearchGate.

Francisco, A., Mohammadi, N., Taylor, J. E., (2020). Gestione energetica abilitata da gemello digitale della città intelligente: verso il benchmarking energetico degli edifici urbani in tempo reale.

Gałązka, E., Leppäaho, A., Vanne, J., (2023). CiThruS2: ambiente virtuale open source per la simulazione di

operazioni e pilotaggio di droni in tempo reale.

Garnett, R. e Adams, M. (2018). LiDAR, una tecnologia per assistere le città intelligenti e la resilienza al cambiamento climatico.

Gartner. (2019). Identifica le 10 principali tendenze tecnologiche strategiche.

Ge, X., Tu, S., Mao, G., Wang, C.-X., Han, T. (2016). Reti cellulari ultra-dense 5G. IEEE Wireless Communications. Piscataway.

Gelernter, D. (1993). Mirror Worlds: Il software diurno mette l'universo in una scatola da scarpe. Come accadrà e cosa significherà. New York. Oxford University Press.

Gerhard, C. (2010). Morfologia urbana e cambiamenti climatici: quale morfologia può sopravvivere. Milano. FrancoAngeli.

Glaessgen, E., Stargel, D. (2012). Il paradigma del gemello digitale per i futuri veicoli della NASA e dell'Aeronautica degli Stati Uniti. Atti della 53° Conferenza AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Strutture, Dinamica strutturale e materiali. American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Grieves, M. W. (2005). Gestione del ciclo di vita del prodotto: il nuovo paradigma per le imprese. International Journal of Product Development. Basingstoke. Inderscience Publishers.

Giaveno, S. (2021). Smart City e gemelli digitali.

Giaveno, S. (2021). Smart City e gemelli digitali: definizioni, metodologie e applicazioni.

Gil, J. (2020). Modellazione delle informazioni sulla città: un quadro concettuale per la ricerca e la pratica nella pianificazione urbana digitale.

Gockel, B. T. (2012). Il gemello digitale della cellula: alcune sfide per la realizzazione.

C., Li, J., Ling, X., Yao, S., (2020). Un sistema operativo per la generazione di modelli LoD3 mediante dati multi-sorgente e modifica interattiva intuitiva.

- Hammi, B., Khatoun, R., Zeadally, S., Fayad, A., Khoukhi, L.** (2018). *Tecnologie IoT per le smart city*. Elsevier. Amsterdam.
- Heikinheimo, V., Tenkanen, H., Bergroth, C., Järvi, O., Hiippala, T., Toivonen, T.** (2020). *Comprendere l'uso degli spazi verdi urbani dalle informazioni geografiche generate dagli utenti*. *Landscape and Urban Planning*. Elsevier. Amsterdam.
- Hall, R. E., Bowerman, B., Braverman, J., Taylor, J., Todosow, H., Von Wimmersperg, U.** (2000). *La visione di una città intelligente*. Brookhaven National Laboratory. NY. Brookhaven National Laboratory.
- Harrison, R.** (2021). *Un framework connettivo per supportare il ciclo di vita dei sistemi di produzione cyber-fisici*.
- Hassan, M. U., Alaliyat, S.** (2024). *Verso la creazione di uno strumento di creazione di gemelli digitali: una prospettiva di mobilità intelligente nelle smart city*.
- Hayou, S.** (2023). *Scala commutativa di larghezza e profondità nelle reti neurali profonde*. *Journal of Machine Learning Research*. MIT Press. Cambridge.
- Hemment, D. e Townsend, A.** (2013). *Cittadino intelligente*.
- Hossain, S. A., Rahman, M. A., Hossain, M. A.,** (2018). *Framework di edge computing per abilitare la consapevolezza situazionale nella città intelligente basata su IoT*. *Journal of Parallel and Distributed Computing*. Elsevier.
- Iansiti, M., & Lakhani, K. R.,** (2017). *La verità sulla blockchain*. Harvard Business Review. Harvard Business Publishing. Boston.
- Ignatius, M., Wong, N.H., Martin, M., Chen, S.,** (2019). *Integrazione virtuale di Singapore con simulazione energetica e modellazione della chioma per la valutazione del clima*. Basilea.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).** (2021). *Riscaldamento globale di 1,5 °C. Rapporto speciale dell'IPCC sugli impatti del riscaldamento globale di 1,5 °C sopra i livelli preindustriali e relativi percorsi di emissione di gas serra*.

globali. Ginevra. IPCC.

Jones, P., (2014). Regioni energetiche intelligenti. Cardiff: The Welsh School of Architecture, Cardiff University.

Joss, S., Sengers, F., Schraven, D., Caprotti, F., Dayot, Y., (2019). La città intelligente come discorso globale: trame e snodi critici in 27 città. *Journal of Urban Technology*.

Jóźwik, B., Gavryshkiv, A.-V., Galewska, K., (2022). L'urbanizzazione e il consumo energetico cambiano il ruolo nel degrado ambientale nei paesi dell'Unione Europea? *Environmental Science & Policy*. Amsterdam. Elsevier.

Jucevičius, R., Patašienė, I., Patašius, M., (2014). Dimensione digitale della smart city: analisi critica. Amsterdam: Elsevier.

Juárez-Juárez, M. G., Botti, V., Giret Boggino, A. S. (2021). Gemelli digitali: revisione e sfide. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. ASME International.

Jung, M., Reinisch, C., Kastner, W. (2012). Integrazione dei sistemi di automazione degli edifici e IPv6 nell'Internet delle cose. In 2012 Sixth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing.

Katarzyna, N. (2014). Logistica delle città intelligenti sul modello di cloud computing.

Kaur, M., Mishra, V., Maheshwari, P. (2019). La convergenza di Digital Twin, IoT e Machine Learning: trasformare i dati in azione.

Kaur, M. J., Mishra, V. P., Maheshwari, P. (2020). La convergenza di digital twin, IoT e machine learning: trasformare i dati in azione. In *digital twin technologies and smart cities*. Springer.

Kavitha, B. C., Vallikannu, R., Sankaran, K. S. (2020). Metodo di gestione dei dati simultanei con consapevolezza dei ritardi per l'ambiente di edge computing mobile collaborativo IoT. *Microprocessors and Microsystems*. Elsevier.

Knutov, E., De Bra, P., Pechenizkiy, M. (2011). Processo di adattamento generico.

Ku, H. B., Kwok, J. Y. C. (2022). Il manuale SAGE di ricerca-

azione. Londra: SAGE Publications.

Kubina, M., Šulyová, D., & Vodák, J. (2021). Confronto tra gli standard delle smart city, l'implementazione ei modelli di cluster delle città in Nord America e in Europa.

Kuusela, K., & Partanen, J. (2022). Un sacco di pianificazione, scarsa guida: valutare il grado di attuazione del piano generale nella città di Tampere, Finlandia.

Ketzler, B. (2020). Gemelli digitali per le città: una revisione dello stato dell'arte. *Digital twin technologies and smart cities*. Springer.

Khayyal, H. K. (2022). Creazione e analisi spaziale della modellazione 3D della città basata sui dati GIS. *Civil Engineering Journal*.

Khelifi, F., Bradai, A., Benslimane, A., Rawat, P., Atri, M. (2019). Un'indagine sui sistemi di localizzazione nell'Internet of things. *Mobile networks and applications*. Springer. Londra.

Kim, H. (2019). Localizzazione delle vulnerabilità locali nelle aree urbane utilizzando dati visivi crowdsourcing da rilevamento partecipativo. In *Computing in Civil Engineering 2019: Data, Sensing, and Analytics*. ASCE.

Kirstein, P. T., Ruiz-Zafra, A. (2018). Utilizzo di modelli e handle per la fornitura su larga scala di sicurezza e IoT nell'ambiente costruito. In *Living on the internet of things: Cybersecurity of the IoT - 2018. The institution of engineering and technology*.

Klebanov, B. (2018). La simulazione come strumento efficace per la pianificazione strategica e la trasformazione delle città intelligenti. *SGEM International multidisciplinary scientific conferences on social sciences and Arts*.

Kor, M., Yitmen, I., Alizadehsalehi, S. (2022). Un'indagine per l'integrazione del deep learning e dei gemelli digitali verso la costruzione 4.0. *Smart and Sustainable Built Environment*. Emerald Publishing.

Koukofikis, A., Coors, V., Gutbell, R. (2018). Visualizzazione

interoperabile di modelli di città 3D utilizzando il servizio di rappresentazione 3D standard di OGC. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Copernicus Publications.

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sihn, W. (2018). Gemello digitale nella produzione: una revisione e classificazione della letteratura categoriale. IFAC-Papers OnLine. Elsevier.

Lee, S., Kwon, H., Cho, H., Jongbok, K., Lee, D. (2016). Casi di studio internazionali di città intelligenti: Singapore, Repubblica di Singapore. Inter-American Development Bank.

Lu, Q., Xie, X., Parlikad, A. K., Schooling, J. (2020). Sviluppo di un gemello digitale a livello di edificio e di città: caso di studio del campus di West Cambridge. Amsterdam. Elsevier.

Lu, X., Ota, K., Dong, M., Yu, C., & Jin, H. (2017). Previsione delle emissioni di carbonio dei trasporti con Big Data urbani. Lu, Y., & Ogunlana, SO (2016). Applicazioni Blockchain nella gestione delle costruzioni.

LaGrange, E. (2019). Sviluppo di un gemello digitale: la tabella di marcia per l'ottimizzazione di petrolio e gas. In stti della SPE offshore europe conference and exhibition. Society of petroleum engineers.

Lee, D., Lee, S. (2021). Gemello digitale per il coordinamento della supply chain nella costruzione modulare. Applied Sciences. MDPI.

Lee, J., Kim, J., Seo, J. (2019). Scenari di attacchi informatici alle smart city e i loro effetti a catena. In Atti della 2019 International Conference on Platform Technology and Service.

Li, X., Liu, H., Wang, W., Zheng, Y., Lv, H., Lv, Z., (2022). Analisi dei big data dell'internet delle cose nei gemelli digitali della città intelligente basata sul deep learning. Future Generation Computer Systems. Elsevier. Amsterdam.

Lim, K. Y. H., Zheng, P., Chen, C. H., (2020). Una rassegna

all'avanguardia del gemello digitale: tecniche, gestione del ciclo di vita del prodotto ingegneristico e prospettive di innovazione aziendale. *Journal of Intelligent Manufacturing*. Springer. Londra.

Lin, Y. C., Cheung, W. F., (2020). Sviluppo di un sistema di gestione del monitoraggio ambientale basato su WSN/BIM per parcheggi nelle città intelligenti. *Journal of Management in Engineering*. American Society of Civil Engineers.

Liu, Q., Zhang, H., Leng, J., Chen, X., (2019). Progettazione rapida individualizzata a doppia guida digitale di un sistema di produzione automatizzato di officina di flusso. *International journal of production research*. Taylor & Francis. Abingdon.

Lu, Q. (2019). Sviluppo di un gemello digitale dinamico a livello di edificio: utilizzo del campus di Cambridge come caso di studio. *Journal of Management in Engineering*. American society of civil engineers.

Lu, Q., Xie, X., Parlikad, A. K., Schooling, J. M., (2020). Rilevamento delle anomalie tramite gemelli digitali per il monitoraggio delle risorse costruite in fase di funzionamento e manutenzione. *Automation in Construction*. Elsevier. Amsterdam.

Lu, Q., Parlikad, A. K., Woodall, P., Ranasinghe, G. D., Xie, X., Liang, Z., Konstantinou, E., Heaton, J., Schooling, J., (2020). Sviluppo di un gemello digitale a livello di edificio e città: studio di caso del campus di West Cambridge. *Journal of Management in Engineering*. American society of civil engineers.

Maloney, A. (2019). La differenza tra una simulazione e un gemello digitale. Monaco di Baviera. Siemens.

Madakam, S. (2014). Città intelligenti: Sei dimensioni. *Journal of Information Engineering and Applications* o simile.

Marr, B., (2020). Queste 25 tendenze tecnologiche definiranno il prossimo decennio. Londra. Wiley.

Mavrokapnidis, D., Mohammadi, N., & Taylor, J. (2021). Dinamiche della comunità nei gemelli digitali delle città

intelligenti: un approccio basato sulla visione artificiale per il monitoraggio e la previsione dell'esposizione collettiva ai pericoli urbani. Cambridge. Massachusetts Institute of Technology.

Mayaud, J., Anderson, S., Tran, M., & Radic, V. (2019). Approfondimenti da mappe auto-organizzate per prevedere la domanda di accessibilità per le infrastrutture sanitarie. Oxford: University of Oxford, department of geography.

Ma, Z., Liu, S. (2018). Una revisione delle tecniche di ricostruzione 3D nell'ingegneria civile e delle loro applicazioni. Automation in Construction. Elsevier. Amsterdam.

Ma, Z., Ren, Y. (2017). Applicazione integrata di BIM e GIS: una panoramica. Procedia Engineering. Elsevier. Amsterdam.

Major, P. (2021). L'uso di un gemello digitale basato sui dati di una città intelligente: uno studio di caso di Ålesund, Norvegia. In Atti della Conferenza Internazionale IEEE 2021 sulle Smart Cities.

Marcucci, E., Gatta, V., Le Pira, M., Hansson, L. Bråthen, S., (2020). Gemelli digitali: una discussione critica sul loro potenziale per supportare l'elaborazione delle politiche e la pianificazione nella logistica urbana. Ricerca in Transportation Business & Management. Elsevier. Amsterdam.

Medhat, G., Aneiba, A., Basurra, S., Batty, O., Elmisery, AM, Kovalchuk, Y., Rehman, MHU (2019). Internet delle cose e data mining: dalle applicazioni alle tecniche e ai sistemi. Future Generation Computer Systems. Elsevier. Amsterdam.

Mohamadiazar, N., Ebrahimian, A., e Hosseiny, H. (2024) Integrazione del deep learning, dell'elaborazione delle immagini satellitari e dell'analisi spazio-temporale per la previsione delle inondazioni urbane. Journal of Hydrology. Elsevier. Amsterdam.

Monson, C. (2019). La panoramica dei gemelli digitali nell'Industria 4.0: gestire l'intero ecosistema. In atti del

convegno nazionale su industria 4.0, Politecnico di Milano. Milano.

Moran, D., Pichler, P.-P., Zheng, H., Muri, H., Klenner, J., Kramel, D., Többen, J., Weisz, H., Wiedmann, T. & Wyckmans, A. (2022). Stima delle emissioni di CO₂ per 108.000 città europee. Environmental Research Letters. Publishing. Bruxelles.

Mullally, G., Dunphy, N., McCarthy, J., Connolly, L., Harris, C., Lennon, B. & Gaffney, C., (2016). Cittadinanza energetica e impegno pubblico nelle trasformazioni dei sistemi energetici: riflessioni su un concetto emergente. Energy Research & Social Science. Elsevier. Amsterdam.

Mazzetto, S. (2024). Una revisione dell'integrazione dei gemelli digitali urbani, sfide e direzioni future nello sviluppo delle città intelligenti. Milano: Politecnico di Milano.

Mêda, P., Calvetti, D., Hjelseth, E., Sousa, H. (2021). Concettualizzazioni incrementali di digital twin mirate alla costruzione circolare basata sui dati. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.

Mohammadi, N., Taylor, JE (2017). Gemelli digitali delle città intelligenti. Cambridge. Georgia Institute of Technology.

Musiolik, J., & Carabias-Hütter, V. (2020). Rapporto sulle linee guida per le città intelligenti. Zurigo. Empa – Swiss Federal laboratories for materials science and technology.

Nam, T., Pardo, T. (2011). Concettualizzare la smart city con le dimensioni della tecnologia, delle persone e delle istituzioni. Albany. Center for Technology in government, university at Albany.

Nawari, O. N. (2021). Tecnologie blockchain: Hyperledger Fabric nei processi di lavoro BIM. Il Cairo. Hindawi publishing corporation.

Nazioni Unite. (2018). Obiettivo di sviluppo sostenibile: rendere le città inclusive, sicure, resilienti e sostenibili. New York: Dipartimento degli affari economici e sociali delle nazioni unite.

Nguyen, HX, Trestian, R., To, D., Tatipamula, M. (2021). Digital twin per 5G e oltre. Basilea. MDPI Multidisciplinary digital publishing institute.

Nochta, T., Badstuber, NE, Wan, L. (2019). Decisioni basate sulle prove in contesti multi-stakeholder: il caso dei gemelli digitali cittadini per la pianificazione e la gestione. Cambridge. University of Cambridge, centre for smart infrastructure and construction.

Nazioni Unite. (2018). La popolazione mondiale è sempre più urbanizzata: più della metà vive in aree urbane. New York. Dipartimento degli Affari Economici e Sociali delle Nazioni Unite.

Nikooheemat, S., Diakité, AA, Zlatanova, S., Vosselman, G. (2020). Ricostruzione 3D interna da nuvole di punti per un routing ottimale in edifici complessi a supporto della gestione dei disastri. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.

O'Dwyer, E., Pan, I., Charlesworth, R., Butler, S., & Shah, N. (2020). Integrazione di uno strumento di gestione dell'energia e di un gemello digitale per il coordinamento e il controllo di sistemi energetici intelligenti multi-vettoriali. Basilea. MDPI Multidisciplinary digital publishing institute.

Offenhuber, D., Ratti, C. (2014). Decodificare la città: urbanistica nell'era dei big data. Cambridge (MA). MIT Press.

Pang, J., Li, J., Xie, Z., Huang, Y., Cai, Z. (2020). Gemello digitale della città collaborativa per la pandemia di COVID-19: una soluzione di apprendimento federato. Pechino. Tsinghua university press.

Parlikad, AK e Schooling, J. (2019). Programma nazionale digital twin: Liberare il valore dei dati connessi. Cambridge. Centre for digital built britain.

Pedersen, AN, Borup, M., Brink-Kjær, A., Christiansen, LE, e Mikkelsen, PS (2021). Gemelli digitali viventi e prototipazione per sistemi idrici urbani: verso la creazione di valore multiuso utilizzando modelli e sensori. Basilea.

MDPI Multidisciplinary digital publishing institute.

Perboli, G., Fedorov, S., Rosano, M. (2020). Il concetto europeo di smart city: un'analisi tassonomica. Madrid.

Pettit, C., Bakelmun, A., Lieske, SN, Glackin, S., Hargroves, K. 'Charlie', Thomson, G., Shearer, H., Dia, H., Newman, P. (2018). Sistemi di supporto alla pianificazione per città intelligenti. Amsterdam. Elsevier.

Porto di Rotterdam. (2019). Processo di spedizione intelligente. Rotterdam. Autorità portuale di Rotterdam.

Porto di Rotterdam. (2021). L'autorità portuale di Rotterdam avvia la sperimentazione del dissuasore intelligente all'ECT. Rotterdam. Autorità portuale di Rotterdam.

Panettiere, M. (2020). L'importanza della tecnologia GIS nell'ambito di una smart city. Istituto Geografico Militare. Roma.

Papadonikolaki, E., Anumba, C. J. (2024). In che modo i gemelli digitali possono supportare la visione Net Zero? IEEE Transactions on Engineering Management. IEEE transactions on engineering management. New York.

Pappagallo, A., Warshaw, L. (2017). Industria 4.0 e il gemello digitale: la produzione incontra la sua corrispondenza. FrancoAngeli. Milano.

Pereira, AP (2021). Un modello descrittivo di informazioni urbane in 3D basato sul BIM delle infrastrutture: rafforzamento delle capacità come strategia per l'implementazione. Journal of Urban Technology. Taylor & Francis. Londra.

Petrova-Antonova, D., (2019). Quadro metodologico per la transizione digitale e la valutazione delle prestazioni delle città intelligenti. In atti della 4° conferenza internazionale sulle tecnologie intelligenti e sostenibili. Spalato.

Pitton F., (2017). Digital twin: mitigazione del comportamento emergente imprevedibile e indesiderabile nei sistemi complessi. FrancoAngeli. Milano.

Progettazione architettonica AD. (2020). Progettazione urbana della città digitalizzata. Wiley. Hoboken.

Qi, Q. (2018). Digital twin e big data verso la produzione intelligente e l'Industria 4.0: confronto a 360 gradi. In Atti della Conferenza internazionale IEEE 2018 sui big data.

Ratti, C. (2013). Città intelligente, cittadino intelligente. Milano. Egea.

Ratti, C. (2017). La città di domani: come le reti stanno cambiando il futuro urbano. Giulio Einaudi Editore. Torino.

Rauch, W., Urich, C., Bach, PM, Rogers, BC, De Haan, FJ, Brown, RR, Mair, M., McCarthy, DT, Kleidorfer, M., Sitzenfrei, R. (2017). Modellazione delle transizioni nei sistemi idrici urbani. Basilea. MDPI Multidisciplinary digital publishing institute.

Rundel, S., & De Amicis, R. (2023). Sfruttamento del gemello digitale e del motore di gioco per simulazioni e visualizzazioni del traffico. Losanna. Frontiers Media.

Rafiq, M., Jalal, A., (2025). IoT-Sensori basati su smartphone per un riconoscimento accurato della locomozione e della localizzazione. IEEE. Informatica Industriale.

Ramu, S. P., (2022). Gemelli digitali abilitati all'apprendimento federato per le città intelligenti: concetti, progressi recenti e direzioni future. Journal of Smart Cities.

Rathore, M., (2021). Il ruolo dell'intelligenza artificiale, dell'apprendimento automatico e dei big data nel gemellaggio digitale: una revisione sistematica della letteratura, sfide e opportunità. Journal of digital twin technologies.

Reckien, D., Salvia, M., Heidrich, O., Church, J. M., Pietrapertosa, F., De Gregorio-Hurtado, S., Dawson, R. J. (2018). In che modo le città stanno pianificando di rispondere al cambiamento climatico? Valutazione dei piani locali per il clima di 885 città dell'Unione Europea. Journal of Cleaner Production.

Reply.com. (2021). 5G e smart city: soluzioni più intelligenti per un futuro iperconnesso. Reply. Torino.

Reti di governance urbana sostenibile. (2020). Tecnologie di pianificazione basate sui dati e sistemi software per città

intelligenti. Ministero delle infrastrutture e della mobilità sostenibili. Roma.

Ricciardi, G. (2023). Gemelli digitali per città climaticamente neutre e resilienti. Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura e Studi Urbani. Milano.

Rinnovabili.it. (2021). La smart city crea più problemi di quanti ne risolve. Roma.

Ritchie, H. e Roser, M. (2018). Urbanizzazione. Oxford. Our World in Data.

Ruohomäki, T., Airaksinen, E., Huuska, P., Kesäniemi, O., Martikka, M., Suomisto, J. (2018). Piattaforma smart city che abilita il gemello digitale. Forum Virium Helsinki. Helsinki, Finlandia.

Ryghaug, M., Skjølsvold, T. M., Heidenreich, S., (2018). Creare cittadinanza energetica attraverso la partecipazione materiale. Università di Oslo, dipartimento di studi tecnologici e sociali. Oslo, Norvegia.

Sacchi, L. (2019). Il futuro delle città. La nave di Teseo. Siracusa.

Sacchi, L. (2021). Il mestiere di architetto. Lettera Ventidue. Siracusa.

Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., Teicholz, P., (2018). Manuale BIM: una guida alla modellazione delle informazioni edilizie per proprietari, progettisti, ingegneri, appaltatori e facility manager (3° ed.). Hoboken. John Wiley & Sons.

Saeed, Z. O., Mancini, F., Glusac, T., Izadpanahi, P., (2022). Città del futuro, gemellaggio digitale e ambito urbano: una revisione sistematica della letteratura. Buildings.

Saieg, P., Sotelino, E. D., Nascimento, D., Caiado, M., (2018). Interazioni tra Building Information Modeling e sostenibilità nell'industria architettonica, ingegneristica e delle costruzioni: una revisione sistematica. Journal of Cleaner Production.

Salheb, N. (2020). Conversione automatica di CityGML in IFC. Göttingen, Germania. Copernicus Publications.

Santhanavanich, T. (2022). L'infrastruttura di dati spaziali di un gemello digitale urbano nel dominio energetico degli edifici utilizzando gli standard OGC. *Annali della fotogrammetria, del telerilevamento e delle scienze dell'informazione spaziale*. Copernicus Publications, Göttingen, Germania.

Sawhney, A., Riley, M., Irizarry, J. (2020). *Costruzione 4.0: una piattaforma di innovazione per l'ambiente costruito*. Routledge, Londra, Regno Unito.

Shafto, M. (2010). *Roadmap di Modellazione, simulazione, informazione tecnologica ed elaborazione*. NASA. Washington.

Shahrour, I. (2018). *Utilizzo del GIS nei progetti di smart city*. GIM International. Geomares Publishing. Lemmer.

Shahzad, M. (2022). *Gemelli digitali negli ambienti costruiti: un'indagine sulle caratteristiche, le applicazioni e le sfide*. Buildings. MDPI. Basilea.

Shirowzhan, S. (2020). *Digital twin e CyberGIS per migliorare la connettività e misurare l'impatto della pianificazione della costruzione di infrastrutture nelle città intelligenti*. *International Journal of Geo-Information*. MDPI. Basilea.

Silva, B. N., Khan, M., Han, K., (2020). *Integrazione dell'architettura di smart city incorporata nell'analisi dei big data con il web of things RESTful per un'efficiente fornitura di servizi e gestione dell'energia*. *Future generation computer systems*. Elsevier. Amsterdam.

Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E. P., Qiao, Y., Murray, N., Devine, D. (2021). *Digital twin: dall'origine al futuro*. *Applied system innovation*. MDPI. Basilea.

Singh, V., Willcox, K. E., (2018). *Progettazione ingegneristica con digital thread*. In *Atti della conferenza strutture, dinamiche strutturali e materiali*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston. Virginia. Stati Uniti.

Tomko, M., Winter, S. (2019). *Oltre i gemelli digitali – Un commento*. Basilea. Londra. SAGE Publications.

- Teisserenc, B., & Sepasgozar, S. M. E.** (2021). Adozione della tecnologia Blockchain attraverso digital twin nel settore edile 4.0: un approccio PESTELS. Buildings. Basilea: MDPI.
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., Sui, F.,** (2018). Digital twin Guidando la progettazione, la produzione e l'assistenza dei prodotti con i Big Data. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Springer. Londra.
- Tao, F., Qi, Q., Liu, A., Kusiak, A.,** (2018). Digital twin e big data verso lo smart manufacturing e l'industria 4.0: confronto a 360 gradi. Future Generation Computer Systems. Elsevier. Amsterdam.
- Tao, F., Zuo, Y., Xu, L. D., Zhang, L.,** (2014). Percezione intelligente basata su IoT e accesso alle risorse di produzione verso la produzione cloud. Transactions on Industrial Informatics.
- Tao, F., Zhang, M., Liu, Y., Nee, A. Y. C.,** (2019). Il gemello digitale nell'industria: stato dell'arte. IEEE Transactions on Industrial Informatics.
- Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M.** (2019). Framework di progettazione del prodotto basato su gemelli digitali. International Journal of Production.
- Terrazas, G., Ferry, N., Ratchev, S.,** (2019). Un framework basato su cloud per la gestione dei Big Data in officina e l'analisi del computing elastico.
- Tomko, M., Winter, S.,** (2019). Oltre i gemelli digitali – Un commento. Ambiente e pianificazione: analisi urbana e scienza della città. Pubblicazioni SAGE.
- Van der Schaar, M.** (2024). Digital twins: Cosa sono, perché ne abbiamo bisogno e in che modo differiscono dagli altri concetti. Van der Schaar Lab.
- Wang, Y., Zhang, W., Zhang, F., Yin, L., Zhang, J., Tian, C., Jiang, W.,** (2020). Analisi del flusso di passeggeri della metropolitana basata sui dati delle smart card.
- Wang, Z.,** (2020). L'analisi del problema e il suggerimento

della soluzione nel processo di costruzione del modello informativo della città. Serie di conferenze IOP: Scienze della Terra e dell'Ambiente. Pubblicazione IOP.

Wärmefjord, K., Söderberg, R., Lindkvist, L., Lindau, B., Carlson, J. S., (2017). Dati di ispezione a supporto di un gemello digitale per la garanzia della geometria. In atti del congresso internazionale di ingegneria meccanica (IMECE 2017) (Vol. 2). American Society of Mechanical Engineers (ASME).

White, G., Zink, A., Codecà, L., Clarke, S., (2021). Un gemello digitale per la smart city per il feedback dei cittadini. Cities.

White, G., Zink, A., Codecà, L., & Clarke, S. (2021). Una città intelligente gemella digitale per il feedback dei cittadini. Amsterdam. Elsevier.

Yang, F. (2020). Un'indagine sulla fusione di dati multisorgente per gemelli digitali urbani. Journal of Urban Technology. Taylor & Francis.

Zhao, Z., Lin, P., Shen, L., Zhang, M. Huang, G. Q., (2020). Sistema di tracciamento collaborativo abilitato dall'IoT Edge Computing per le risorse di produzione nel parco industriale. Advanced Engineering Informatics. Amsterdam. Elsevier.

Zhou, Y., Wang, L., Love, PED, Ding, L., Zhou, C., (2019). Ricostruzione tridimensionale (3D) di strutture e paesaggi: un nuovo metodo di fusione di punti e linee. Automazione nell'edilizia. Amsterdam. Elsevier.

GLOSSARIO

A

AAEC (Architettura, Ingegneria e Costruzioni)

Settore dell'edilizia e delle infrastrutture che integra progettazione architettonica, ingegneria e costruzione. Il BIM e i digital twin si sviluppano proprio in ambito AEC.

AI (Intelligenza Artificiale)

Tecnologie informatiche che permettono ai sistemi digitali di apprendere ed elaborare decisioni complesse, particolarmente utili nella simulazione e gestione dei digital twin.

Approccio data-driven

Metodo basato sull'utilizzo intensivo di dati (storici e in tempo reale) per orientare decisioni progettuali, operative e strategiche.

AR (Realtà Aumentata)

Tecnologia che sovrappone informazioni digitali (testi, immagini, dati) al mondo reale. Usata in edilizia e manutenzione per ispezioni, visualizzazioni e training.

As-built

Modello digitale che rappresenta l'opera effettivamente costruita, con tutte le modifiche e variazioni rispetto al progetto iniziale.

B

BDS (Building Description System)

Modello proposto da Eastman come precursore del BIM, per la descrizione strutturata degli edifici attraverso un linguaggio informatico.

BIM (Building Information Modeling)

Metodo di progettazione e gestione digitale basato su modelli 3D intelligenti arricchiti da dati temporali, economici e gestionali.

Bill of Materials (BoM)

Elenco quantitativo dei materiali e delle lavorazioni necessari per un'opera, derivato dal modello BIM (Quantity Take-Off).

Blockchain

La blockchain è un registro digitale, condiviso e immutabile, che registra le transazioni in blocchi collegati tra loro attraverso la crittografia. È una tecnologia di contabilità distribuita che consente di documentare le transazioni in modo sicuro e trasparente, senza bisogno di un ente centrale di controllo.

C**CAD (Computer-Aided Design / Engineering)**

Software per la progettazione e simulazione assistita al calcolatore. Spesso integrati nei processi BIM per l'analisi tecnica.

Clash Detection

Procedura di verifica automatica dei conflitti all'interno di un modello BIM (es. interferenze tra impianti e strutture).

Code Checking

Verifica automatizzata della conformità normativa e progettuale all'interno dei modelli BIM.

Computational Design

Metodo progettuale basato su algoritmi e scripting per generare geometrie e soluzioni architettoniche ottimizzate.

Cybersecurity

Insieme di strumenti e pratiche per proteggere sistemi digitali e dati da minacce informatiche.

G**GIS (Geographic Information System)**

Sistema per la raccolta, gestione e analisi di dati georeferenziati, utile per la pianificazione urbana e

l'integrazione con i modelli BIM.

GDRTS (General Directorate of Road Transport Services)

Direzione generale dei trasporti stradali in Albania.

Gestisce il database nazionale dei veicoli registrati.

GovTech (Government Technology Agency of Singapore)

Agenzia governativa di Singapore che supporta lo sviluppo e l'adozione di soluzioni tecnologiche nei servizi pubblici.

H

HaMIS (Haven Management Informatie Systeem)

Sistema informativo per la gestione dei porti, sviluppato nei Paesi Bassi. Coordina regolamenti, controlli e attività operative negli scali marittimi.

I

ICMQ

Organismo italiano di certificazione per processi, figure professionali e prodotti nel settore delle costruzioni, accreditato anche per la certificazione BIM.

IFC (Industry Foundation Classes)

Formato dati aperto per la condivisione di modelli BIM tra software diversi, promosso da buildingSMART.

Industria 4.0

Integrazione di tecnologie digitali nei processi produttivi. Include IoT, AI, robotica, digital twin.

IoT (Internet of Things)

Rete di oggetti fisici (come sensori) in grado di comunicare dati al digital twin per monitoraggio e controllo.

L

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)

Certificazione ambientale per edifici sostenibili, basata su parametri come risparmio energetico, uso di materiali e impatto ambientale.

LiDAR

Tecnologia laser per rilievi topografici 3D, utile nella digitalizzazione di infrastrutture esistenti.

LoD (Level of Development)

Livello di dettaglio del modello BIM, sia nella parte geometrica che informativa (es. LOD 100, LOD 500).

M**Machine Learning**

Tipo di AI che consente ai sistemi digitali di imparare dai dati per migliorare automaticamente le proprie prestazioni.

N**NRF (National Research Foundation)**

Fondazione di ricerca del governo di Singapore, sostiene progetti innovativi nell'ambito della digitalizzazione e della sostenibilità urbana.

P**PE (Physical Entity)**

Entità fisica rappresentata digitalmente (es. veicolo, semaforo, edificio) all'interno del digital twin.

PLM (Product Lifecycle Management)

Approccio per la gestione dell'intero ciclo di vita di un'opera o infrastruttura, dalla progettazione alla manutenzione.

PUB (Public Utilities Board)

Agenzia nazionale per la gestione delle risorse idriche a Singapore. Utilizza tecnologie smart per garantire sostenibilità idrica.

Q

Quantity Take-Off

Calcolo automatico delle quantità di materiali e componenti a partire dal modello BIM, utile per computi metrici e analisi dei costi.

S

SLA (Singapore Land Authority)

Ente governativo di Singapore responsabile della gestione delle proprietà e dei dati territoriali. Collabora a progetti di digital twin urbano.

Static Twin

Modello digitale non aggiornato in tempo reale. Serve come base iniziale o di riferimento.

T

TDT (Traffic Digital Twin)

Gemello digitale dedicato alla gestione del traffico urbano, integrato con sensori, dati in tempo reale e algoritmi predittivi.

Twin Transition

Approccio integrato che combina transizione digitale e transizione ecologica per uno sviluppo urbano sostenibile.

V

VR (Virtual Reality)

Tecnologia immersiva che simula ambienti tridimensionali, utile per progettazione, ispezione, manutenzione e formazione in ambito AEC.

W

WBS (Work Breakdown Structure)

Scomposizione gerarchica e funzionale di un progetto in unità gestibili, utile per pianificazione e controllo di tempi e costi.

