

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
CAMPUS DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI INFORMATICA – SCIENZA E INGEGNERIA
Corso di Laurea Triennale in Informatica

**Citizen Engagement e Digital twin nel
contesto della sostenibilità
ambientale: stato dell'arte,
opportunità, e sfide future**

Relatore:

Prof. Catia Prandi

Correlatori:

Dott. Gianni Tumedei

Giacomo Mantani

Presentata da:

Jacopo Francesco

Amoretti

Sessione II
Anno Accademico 2023-2024

A chi c'è sempre stato.
A chi è arrivato da poco ma già conta tanto.
A chi non ha mai smesso di meravigliarsi.

Introduzione

L'interazione tra tecnologia e sostenibilità rappresenta un campo di sempre maggior interesse, in particolare nel contesto delle strategie urbane volte a promuovere un futuro più sostenibile. Tra le innovazioni più promettenti, il Digital Twin si distingue per la sua capacità di creare una rappresentazione virtuale dettagliata e dinamica di oggetti fisici o sistemi complessi. Questa tecnologia consente di monitorare, simulare e ottimizzare in tempo reale le prestazioni di un'ampia gamma di processi e infrastrutture, migliorando così la gestione delle risorse e riducendo l'impatto ambientale.

Parallelamente, il Citizen Engagement evidenzia l'importanza di un coinvolgimento attivo dei cittadini nelle decisioni e nelle politiche che li riguardano. Questo concetto, che va oltre la semplice partecipazione, implica una collaborazione diretta tra cittadini e istituzioni per co-progettare soluzioni condivise, aumentando l'accettabilità sociale e la sostenibilità a lungo termine delle iniziative proposte.

La sinergia tra il Digital Twin e il coinvolgimento dei cittadini apre nuovi orizzonti per affrontare le sfide ambientali utilizzando tecnologie all'avanguardia, favorendo una partecipazione più diretta e significativa dei cittadini nell'ambito della sostenibilità.

Questa tesi esplora lo stato dell'arte, le opportunità e le sfide future legate al Digital Twin e al Citizen Engagement. Inizialmente, nel capitolo 1 viene delineato cos'è il Citizen Engagement e che ruolo ha nella sostenibilità ambientale. Il capitolo 2 approfondisce la tecnologia del Digital Twin, esplorando le sue origini, le applicazioni attuali e le prospettive future, nonché le

sfide che ne condizionano l'evoluzione. Infine, nel capitolo 3 vengono mostrati tre casi di studio che illustrano come l'integrazione del coinvolgimento cittadino nell'uso del Digital Twin possa effettivamente migliorare la sostenibilità ambientale nelle aree urbane. Questa integrazione permette di migliorare la qualità delle decisioni ambientali fornendo ai decisori una comprensione più profonda delle implicazioni delle loro scelte e offrendo ai cittadini opportunità concrete per esprimere le loro opinioni e preferenze.

Indice

Introduzione	i
1 Citizen Engagement	1
1.1 Introduzione	1
1.1.1 Storia e definizione	1
1.1.2 Citizen engagement vs Citizen participation	3
1.1.3 Citizen Engagement nella sostenibilità ambientale	3
1.1.4 Approcci moderni al Citizen Engagement	5
1.2 Citizen Engagement attraverso la Gamification	6
1.2.1 Definizione e Principi	6
1.2.2 Applicazioni della Gamification nella sostenibilità	8
1.3 Citizen Science come strumento di Citizen Engagement	9
1.3.1 Concetti fondamentali di Citizen Science	9
1.3.2 Applicazioni della citizen science raccolta nella dati ambientali	10
1.4 Tecnologie pervasive e raccolta dati	12
1.4.1 Sensori e dispositivi IoT per il monitoraggio ambientale	14
1.5 Applicazioni mobili per l'engagement ambientale	16
1.5.1 Il ruolo delle app nella sensibilizzazione e partecipazione ambientale	16
1.5.2 Esempi di app per il coinvolgimento ambientale	17
1.5.2.1 iNaturalist	17
1.5.2.2 eBird	19

2	Il Digital Twin e la Sostenibilità Ambientale	21
2.1	Introduzione	21
2.1.1	Origini e sviluppo del concetto	21
2.1.2	Caratteristiche principali	23
2.1.3	Casi d'uso	24
2.2	Il Digital Twin nel contesto della sostenibilità ambientale . . .	25
2.2.1	Ruolo del Digital Twin nella gestione ambientale . . .	25
2.2.2	Ottimizzazione delle risorse e riduzione dell'impatto ambientale	26
2.3	Esempi di applicazione del Digital Twin nella sostenibilità . .	27
2.3.1	Smart Cities e gestione delle risorse urbane	27
2.3.2	Gestione sostenibile dell'industria manifatturiera	29
2.3.3	Digital Twin e manutenzione predittiva per la sosteni- bilità	31
2.3.3.1	Predizione dell'energia basata su dati	32
2.3.3.2	Gestione sostenibile dell'agricoltura	33
2.4	Sfide e prospettive future	35
2.4.1	Tecnologie Abilitanti	36
3	Digital Twin e Citizen Engagement: Casi di studio	41
3.1	Introduzione	41
3.2	Herrenberg e il coinvolgimento dei cittadini	42
3.2.1	Quadro Generale	42
3.2.2	Composizione del DT	44
3.2.3	Progettazione partecipativa	46
3.3	Helsinki e l'importanza degli open data	47
3.3.1	Profilo del Caso di Studio	47
3.3.2	Lo standard CityGML	49
3.3.3	Atlante Climatico Regionale	50
3.3.4	Open Data	51
3.4	Progetto DUET: una nuova architettura per i dati	53
3.4.1	Introduzione al progetto	53

3.4.2	Architettura T-Cell	55
3.4.2.1	Flusso dei dati	55
3.4.3	Modelli usati	56
3.4.3.1	Modello del traffico	58
3.4.3.2	Modello della qualità dell'aria	59
3.4.3.3	Modello dell'inquinamento acustico	60
	Conclusioni	63
	Bibliografia	65
	Ringraziamenti	75

Elenco delle figure

1.1	I tre ambiti principali dell'Ubiquitous Computing	13
1.2	Sistema SEM per la contaminazione delle acque	15
1.3	Mappa di iNaturalist con segnalazioni	18
1.4	Esempi di funzionalità dell'app	19
2.1	Componenti essenziali del Digital Twin	22
2.2	L'architettura della manifattura intelligente	30
2.3	Percentuale di documenti che considerano un criterio dato, una categoria e una "Sustainability Dimension (SD)"	31
2.4	Distribuzione degli studi negli anni	32
2.5	Modellazione basata sulla fisica: Essa può modellizzare solo una parte della fisica nota	39
3.1	Vista aerea del centro storico di Herrenberg,in primo piano le strade solitamente molto trafficate	43
3.2	Rappresentazione 3D dei dati empirici qualitativi dei cittadini	47
3.3	Uso della realtà aumentata per mostrare il DT ai cittadini durante gli eventi partecipativi	48
3.4	Modello dell'energia solare di Helsinki 3D+	51
3.5	Il modello a 5 stelle di Tim Berners-Lee	52
3.6	Architettura T-Cell	56
3.7	Flusso dei dati nel sistema DUET	57
3.8	Modello del traffico	59
3.9	payload del modello della qualità dell'aria	60

3.10 Mappa dell'inquinamento acustico	61
-------------------------------------------------	----

Elenco delle tabelle

2.1	Sfide comuni e tecnologie abilitanti	36
-----	------------------------------------------------	----

Capitolo 1

Citizen Engagement

In questo capitolo verrà illustrato il Citizen Engagement. Si partirà dalla sua storia declinandolo fino alla questione della sostenibilità ambientale, introducendo brevemente le principali tecnologie usate.

1.1 Introduzione

1.1.1 Storia e definizione

Il Citizen Engagement è definito come il coinvolgimento attivo dei cittadini nelle attività e nelle questioni che riguardano le loro vite e la comunità in generale. Esso mette l'accento sul coinvolgere i cittadini nella definizione delle politiche pubbliche e nei servizi offerti per promuovere la trasparenza e la collaborazione tra istituzioni governative e il pubblico.

Alcuni aspetti fondamentali del Citizen Engagement sono [1]:

- **Partecipazione:** I cittadini devono avere la possibilità di contribuire con le loro opinioni e feedback allo sviluppo e all'implementazione di politiche, programmi e progetti che hanno un'influenza sulla loro comunità e sulla società.
- **Accesso alle informazioni:** I cittadini devono avere accesso a informazioni tempestive, precise e attinenti riguardo le azioni, le politiche,

i servizi e le risorse del governo per poter prendere decisioni informate e avere piena fiducia verso le autorità responsabili.

- **Trasparenza:** Le istituzioni devono essere trasparenti con i loro processi decisionali, l'impiego delle risorse e i risultati ottenuti, permettendo ai cittadini di capire in che modo vengono prese le decisioni.
- **Responsabilità:** Siccome i governi, le organizzazioni e i funzionari pubblici sono responsabili delle loro azioni i cittadini devono avere strumenti per gestire reclami, cattiva condotta o corruzione.
- **Collaborazione:** I cittadini devono collaborare attivamente con agenzie organizzative e altre parti interessate per affrontare sfide comuni, raggiungere obiettivi reciproci e promuovere il benessere sociale, economico e ambientale.

Storicamente il concetto di Citizen Engagement affonda le sue radici nelle civiltà antiche e ha subito un'importante evoluzione nel corso dei secoli. Già nelle società basate sulla parentela, dall'Africa dell'Est a quelle della foresta Amazzonica, tradizionalmente le decisioni venivano prese con il consenso delle persone. Nell'antica Grecia, specialmente ad Atene, si formò la democrazia diretta, dove si discuteva sulle questioni della polis tramite assemblee. È importante sottolineare che questo sistema è cresciuto organicamente dai bisogni, dalle convinzioni e dalle azioni degli stessi Ateniesi.

Anche durante il rinascimento si testimonia una propensione dei sovrani e delle amministrazioni locali di consultare le comunità su questioni fiscali e amministrative, rendendosi conto che il coinvolgimento diretto poteva semplificare l'attuazione delle decisioni governative.

È nel XX secolo, specialmente dopo la Seconda Guerra Mondiale, che i governi democratici aumentarono gli sforzi per coinvolgere i cittadini nelle politiche pubbliche. Qui si vede la nascita delle pratiche quali le inchieste pubbliche e le consultazioni ufficiali su progetti infrastrutturali e urbanistici.

L'obiettivo finale era quello di aumentare la trasparenza e di raccogliere dati per permettere decisioni più informate e condivise.

Con l'avvento dell'era digitale il Citizen Engagement ha avuto una trasformazione significativa. Grazie alle piattaforme online i governi hanno lanciato iniziative di open government. In queste il cittadino può contribuire alle decisioni politiche con sondaggi e opinioni.

Recentemente anche i social media e le applicazioni mobili hanno ampliato enormemente la possibilità di Citizen Engagement. Tramite questi strumenti è facile raccogliere feedback realtime e includere anche parti della popolazione che prima erano difficili da raggiungere [2].

1.1.2 Citizen engagement vs Citizen participation

Una differenza fondamentale da tenere a mente è quella fra il Citizen Engagement e la Citizen Participation. Sebbene possano sembrare due concetti molto simili, essi presentano una differenza sostanziale.

Il Citizen Engagement è intrapreso dal governo stesso. Esso si rivolge formalmente ai cittadini e chiede loro di fornire input tramite gli strumenti dati. Nella Citizen Participation il coinvolgimento viene dalle persone stesse. I cittadini si mettono in contatto con il governo e partecipano a eventi specifici, per esempio votando. Perciò la differenza principale sta nel soggetto coinvolgente, nella Citizen Engagement le iniziative puntano a creare una relazione a lungo termine e profonda mentre nella Citizen Participation si ha solitamente un evento sporadico o comunque singolo.

Certamente entrambe condividono uno stesso obiettivo: una migliore comunicazione fra il governo e il pubblico [3].

1.1.3 Citizen Engagement nella sostenibilità ambientale

Il Citizen Engagement è di vitale importanza nei confronti del raggiungimento della sostenibilità ambientale. Esso fornisce l'occasione di partecipare

attivamente alle decisioni e alle azioni che hanno un impatto sull’ecosistema, rendendo possibile affrontare le sfide ambientali globali come il cambiamento climatico, la degradazione della biodiversità e l’inquinamento [4].

Per esempio nel contesto delle energie rinnovabili il coinvolgimento dei cittadini assume un ruolo fondamentale. Lo sviluppo di nuove tecnologie “pulite” in sé ha dimostrato di non essere abbastanza efficace per permettere una buona transizione energetica [5]. Grazie al coinvolgimento delle persone queste tecnologie possono esprimere il loro vero potenziale. Infatti, proprio per il fatto che richiedono un cambiamento nei modelli di business energetico, è sempre più necessario co-progettarle insieme al pubblico stesso. Questo renderà i cittadini da “consumatori passivi” a individui attivamente coinvolti nel sistema energetico [6].

Il coinvolgimento dei cittadini può essere attuato con strumenti innovativi come la citizen science, la gamification e le tecnologie pervasive. La citizen science, o scienza partecipata, come riporta l’Oxford English Dictionary è “l’attività scientifica condotta da membri del pubblico indistinto in collaborazione con scienziati o sotto la direzione di scienziati professionisti e istituzioni scientifiche” [7]. Un esempio di cui si parlerà nel capitolo finale (1.5.2.1) è iNaturalist ¹, un progetto che consente alle persone di documentare diversi tipi di biodiversità per supportare la conservazione delle specie animali o vegetali a rischio [8].

La gamification è un altro modo per coinvolgere i cittadini in pratiche sostenibili, portando l’elemento del gioco in questioni apparentemente non correlate al gioco. Meccaniche come punti, badge e classifiche possono motivare i consumatori a comportarsi in modo ecologico quotidianamente. L’applicazione mobile EcoChallenge è un esempio calzante, in cui la gamification è rappresentata da sfide ambientali “contro” gli amici dell’utente per assumere abitudini più sostenibili [9].

Infine, le tecnologie pervasive o ubiquitous computing, integrano nuove fonti di informazione e comunicazione nei nostri spazi vitali quotidiani. I

¹<https://www.inaturalist.org>

sensori e i gadget intelligenti misurano in tempo reale la qualità dell'aria, il consumo di energia e altri parametri per aiutare i cittadini a prendere decisioni equilibrate e ben informate [10].

1.1.4 Approcci moderni al Citizen Engagement

Oltre agli aspetti principali del Citizen Engagement citati in precedenza, nei tempi moderni si sono sviluppati quattro nuovi approcci possibili: **Multi-channel approach**, **Analytics**, **Personalized Interface**, **Open Data** [11] [12].

Il primo approccio si riferisce all'uso di molteplici canali di comunicazione e interazione per coinvolgere i cittadini nelle decisioni pubbliche. Esso mira a raggiungere più cittadini possibili affiancando ai mezzi tradizionali (eventi culturali, incontri ecc..) a quelli digitali quali piattaforme di partecipazione online, questionari online, pagine web e social media. Una forma di partecipazione tradizionale non è sempre sufficiente per raggiungere un pubblico diversificato. Ad esempio i cittadini giovani potrebbero giovare maggiormente di questo approccio, data la loro intrinseca difficoltà nel raggiungimento da parte del governo.

Il secondo approccio permette ai cittadini di esprimere le loro opinioni e di generare dati vitali per i governi tramite le Citizen Engagement Dashboards. In queste piattaforme vengono raccolti tutti i dati demografici e anche le opinioni su alcuni argomenti specifici. L'obiettivo è poter analizzare e comparare i dati per avere una precisa visione specifica o d'insieme allo stesso tempo. Per esempio le città potrebbero voler confrontare le opinioni su un determinato argomento fra il quartiere meno abbiente e quello più abbiente; oppure fra età, sesso, livello di educazione ecc.

Il terzo approccio è quello di fornire un'interfaccia personalizzata ai cittadini. In questo modo, tramite applicazioni mobili e siti web, l'utente può consultare dati relativi a questioni fondamentali quali la mobilità, i servizi sanitari ecc.. Il fatto di permettere la libera scelta aumenta il coinvolgimen-

to dei cittadini e il loro punto di vista sull'importanza di quelle aree. La personalizzazione è vitale per garantire attenzione e interesse.

L'ultimo approccio è particolarmente legato alla sempre più frequente proliferazione di dati pubblici. Gli open data consentono, innanzitutto, una maggiore trasparenza, poiché i cittadini possono essere aiutati a capire, ad esempio, come le istituzioni spendono i loro soldi. Inoltre grazie all'accessibilità di queste informazioni i cittadini stessi possono creare o co-creare con il governo stesso servizi pubblici migliori per la loro città. Ad esempio l'accesso ai dati sul crimine può condurre a prendere misure collettive per aumentare la propria sicurezza [11] [12].

1.2 Citizen Engagement attraverso la Gamification

1.2.1 Definizione e Principi

La gamification è l'utilizzo di elementi e meccaniche provenienti dai giochi in contesti non ludici con l'obiettivo di coinvolgere e motivare le persone a raggiungere specifici obiettivi. Questo tipo di approccio usa il coinvolgimento emotivo legato ai giochi per influenzare il comportamento delle persone in più ambiti quali l'educazione, il marketing, la salute pubblica e il coinvolgimento dei cittadini.

Le dinamiche fondamentali dei giochi in questo ambito sono: **Punti da accumulare, Livelli da raggiungere, Ricompense o doni da ottenere, Distintivi da esibire.**

Queste dinamiche stimolano gli istinti primari dell'essere umano quali: competizione, status sociale, compensi e successo [13].

L'implementazione della gamification necessita di una grande comprensione del pubblico target e degli obiettivi desiderati. È fondamentale che venga attuata in modo etico, evitando pratiche di manipolazione e permettendo sempre a tutte le categorie di utenti di poterne usufruire, garantendo

accessibilità.

I principi da seguire per creare una gamification etica sono [14]:

- **Definire obiettivi chiari:** È fondamentale chiarire gli obiettivi e i risultati che ci si aspetta dal sistema di gamification implementato. Questo porta a prevenire la manipolazione degli utenti.
- **Dare priorità alla trasparenza:** La trasparenza sui dati raccolti, salvati e usati dal sistema di gamification è importante per l'utente. Egli deve avere sempre una chiara idea delle possibili implicazioni delle sue azioni.
- **Fornire sempre un consenso informato e opzioni di rinuncia:** Il consenso informato permette agli utenti di essere consapevoli dello scopo e dell'impatto della gamification. Inoltre, fornire sempre la possibilità in ogni momento di tirarsi indietro permette di dare un'ulteriore sicurezza.
- **Porre un'equilibrio fra ricompensa e sforzo:** Bisogna evitare situazioni in cui il sistema ricompensi in modo sproporzionato certi individui o crei un vantaggio negativo contro i principi di uguaglianza.
- **Considerare il benessere a lungo termine:** Evitare elementi e meccaniche che possano sviluppare una dipendenza portando a comportamenti dannosi per l'utente.
- **Considerare il Feedback dell'utente:** Raccogliere continuamente i feedback degli utenti è utile per apportare miglioramenti al design di gamification. In questo modo è possibile creare un sistema che sia adatto agli utenti finali stessi.
- **Incoraggiare l'inclusività e la collaborazione:** Incoraggiare la cooperazione e il lavoro di gruppo permette di creare un ambiente di supporto e inclusivo.

- **Implementare regolari valutazioni sull'etica:** Condurre regolari valutazioni sull'etica permette di individuare eventuali problemi etici e apportare le dovute modifiche per migliorare il sistema.

1.2.2 Applicazioni della Gamification nella sostenibilità

La gamification è stata applicata con risultati promettenti in diverse situazioni legate alla sostenibilità ambientale, mostrando il suo importante ruolo nell'incoraggiare la responsabilità ecologica e sensibilizzare la popolazione su temi di natura ambientale. Con l'intento di introdurre elementi ludici nello stile di vita di tutti i giorni, la gamification spinge gli individui ad adottare comportamenti sostenibili, facendo sì che le azioni ecologiche diventino in questo modo più coinvolgenti e più motivanti [15].

Studi condotti sul campo hanno dimostrato l'efficacia della gamification nel promuovere comportamenti sostenibili, particolarmente nell'ambito della conservazione ambientale e della sensibilizzazione. Ad esempio, uno studio [16] ha analizzato il ruolo degli strumenti digitali di gamification nel promuovere la consapevolezza ambientale, in particolare attraverso il progetto europeo GoBeEco che ha sviluppato un'applicazione web mirata a incentivare gli utenti ad adottare uno stile di vita rispettoso dell'ambiente e sostenibile. Quest'app ha quindi avuto un'influenza significativa sui comportamenti delle persone verso la sostenibilità, rendendole più consapevoli dell'impatto delle loro azioni quotidiane.

Inoltre, uno studio di Tania Ouariachi et al. [17], mostra come la gamification possieda un enorme potenziale per favorire il coinvolgimento cognitivo, emotivo e comportamentale su questioni ambientali. Il successo delle piattaforme di gamification deriva dalla varietà di attributi inclusi nel proprio design. All'aumentare di essi si crea una connessione fisica e mentale sempre maggiore con gli utenti, portando allo sviluppo di cambiamenti comportamentali pro-ambiente.

Questi studi illustrano collettivamente che la gamification può essere uno strumento potente nell'educare e coinvolgere il pubblico nelle pratiche sostenibili, offrendo un approccio più interattivo e coinvolgente all'educazione ambientale e all'azione.

Un modo diffuso di utilizzare la gamification nel contesto della sostenibilità è attraverso la promozione dell'uso efficiente dell'energia. Piattaforme come "Opower" usano elementi ludici per portare gli utenti a ridurre il consumo energetico domestico. Gli utenti vengono messi a confronto con i consumatori vicini a loro e premiati con badge per i risparmi ottenuti. Questo permette così alle persone di modificare i propri comportamenti e avere una maggiore consapevolezza sull'uso delle risorse energetiche [18].

Mentre nel settore della mobilità sostenibile, la gamification è stata utilizzata con successo per promuovere l'uso di mezzi di trasporto ecologici. Ad esempio, l'app "UbiGreen" usa meccaniche di gioco per incentivare l'uso della bicicletta e dei trasporti pubblici, assegnando punti e badge agli utenti che adottano comportamenti sostenibili. Questo approccio ha portato a un aumento significativo dell'uso di mezzi di trasporto ecocompatibili [19].

1.3 Citizen Science come strumento di Citizen Engagement

1.3.1 Concetti fondamentali di Citizen Science

Il termine "citizen science" o scienza partecipativa, identifica la partecipazione dei membri non professionisti del pubblico alla ricerca scientifica. Questa attività ha acquisito sempre maggiore diffusione non solo per la necessità della raccolta dati su larga scala, ma anche per aumentare l'alfabetizzazione scientifica e l'influenza politica tramite la partecipazione diretta della popolazione [20].

La partecipazione nella citizen science varia notevolmente; alcune attività potrebbero implicare il coinvolgimento dei partecipanti nella raccolta

di dati ambientali mentre altre potrebbero chiedere loro di analizzare i dati o segnalare osservazioni. La partecipazione può essere categorizzata inoltre come contributiva, collaborativa e co-creativa, a seconda del grado di coinvolgimento dei cittadini nei processi di ricerca [21].

L'Associazione Europea di Citizen Science ha identificato, in definitiva, dieci principi chiave per assicurare la qualità e l'efficacia delle attività di citizen science. Tra questi principi troviamo la precisione dei metodi impiegati, il rispetto verso i partecipanti coinvolti, la disponibilità dei dati raccolti e il riconoscimento del contributo fornito dai cittadini [22].

La citizen science solleva importanti questioni etiche e sociali. È essenziale garantire l'accessibilità e l'inclusività per permettere a tutti i gruppi sociali di contribuire e trarre beneficio dalla scienza. Inoltre, la tutela della privacy dei dati e la condivisione equa dei risultati sono aspetti cruciali per mantenere la fiducia e il sostegno della comunità [23].

La partecipazione della comunità alla scienza spesso consente di giungere a nuove conclusioni sulla raccolta di informazioni e sullo sviluppo di politiche migliori. Coinvolgere un gran numero di persone offre un vantaggio enorme per la raccolta di grandi quantità di dati su vastissima scala ed è particolarmente utile nei settori della biodiversità ecologica e della sostenibilità ambientale [24].

1.3.2 Applicazioni della citizen science raccolta nella dati ambientali

La citizen science ha un ruolo cruciale nella raccolta di dati ambientali, contribuendo significativamente alla ricerca ecologica e alla gestione sostenibile delle risorse naturali. Attraverso la partecipazione diretta, i cittadini non solo assistono nella raccolta di dati, ma arricchiscono anche la ricerca con la loro conoscenza locale e l'impegno comunitario.

Molti progetti di citizen science raccolgono dati fondamentali di base, i quali si sono rivelati molto utili per rispondere a situazioni di emergenza come il disastro ambientale della piattaforma petrolifera Deepwater Horizon

nel Golfo del Messico [25]. Altri progetti invece monitorano frequentemente la mortalità di una particolare popolazione o specie in modo da identificare le minacce verso le specie autoctone e verso le persone stesse.

Il punto chiave della citizen science è la sua capacità di entrare in contatto con persone in luoghi e su scale che normalmente sarebbero impossibili da raggiungere, rendendola vitale per la ricerca ambientale. La raccolta di informazioni geospaziali riguardanti i fattori abiotici come il clima, la qualità dell'acqua, l'inquinamento atmosferico e i dati sulla distribuzione e l'abbondanza degli organismi permette di ottenere informazioni a livello geografico esteso [25].

Il monitoraggio della biodiversità è uno dei settori maggiormente influenti della citizen science. I cittadini possono contribuire alla raccolta di dati su flora e fauna i quali permettono di contribuire nel campo dell'ecologia del paesaggio. Questa disciplina si occupa di capire in che modo la composizione dei paesaggi circostanti influenzi il tipo e il numero di organismi e quanto bene essi sopravvivano e si riproducano. La raccolta di informazioni geospaziali riguardanti i fattori abiotici come il clima, la qualità dell'acqua, l'inquinamento atmosferico e dati sulla distribuzione e abbondanza degli organismi, sono ottenuti a larghe scale geografiche. Alcuni dati possono essere acquisiti tramite immagini satellitari e altre tecnologie di rilevamento a distanza che saranno trattate nel prossimo capitolo; tuttavia altri necessitano dell'intervento di un team di ricerca come quelli riuniti nelle attività di Citizen Science.

Un esempio celebre della sua applicazione nella raccolta dei dati è quello del Lost Ladybug Project [25]. I ricercatori dell'Università di Cornell (USA) avviarono il progetto per studiare il preoccupante declino di alcune specie di coccinelle autoctone che un tempo erano abbondanti ma sono diventate misteriosamente rare nel tempo. Persone di tutte le età potevano partecipare alla raccolta dei dati inviando fotografie su un database online per consentire agli scienziati di analizzare la distribuzione geografica delle varie specie ed approfondire le conoscenze sul comportamento degli insetti. Inaspettatamente,

grazie all'osservazione di un utente, si è scoperto che la coccinella a nove punti (*Coccinella novemnotata*) non era estinta come si pensava; questo evento è stato significativo per quanto riguarda l'efficacia e il valore della citizen science nei confronti della conservazione delle specie e nella biodiversità.

Per concludere, la citizen science è un'approccio fondamentale e sempre più riconosciuto per il monitoraggio ambientale e la conservazione delle specie. Il suo successo e la sua efficacia continuano a crescere grazie all'integrazione con metodi scientifici tradizionali e all'adozione di tecnologie avanzate che facilitano la raccolta e l'analisi dei dati [25].

1.4 Tecnologie pervasive e raccolta dati

Le tecnologie pervasive, conosciute anche come “ubiquitous computing”, sono quelle tecnologie dove l'elaborazione delle informazioni è interamente integrata all'interno di oggetti e attività di tutti i giorni. Questo paradigma, in opposizione a quello “desktop”, si basa sul fatto che l'utente può usare diverse tecnologie simultaneamente, anche nel corso di attività giornaliere. Inoltre, esso può essere incosciente del fatto che queste tecnologie stiano svolgendo le loro operazioni [26].

Come si può vedere in Figura 1.1, tre vasti ambiti dell'applicazione delle tecnologie pervasive sono gli smartphone, le Wearable Technology e più in generale l'Internet of Things. Ognuno di questi settori ha avuto un impatto profondo sul modo in cui viviamo, lavoriamo e interagiamo con l'ambiente circostante.

Gli smartphone hanno rivoluzionato la comunicazione personale, trasformando non solo il modo in cui interagiamo socialmente ma anche come accediamo alle informazioni e gestiamo le nostre attività quotidiane. Oltre a fungere da dispositivi di comunicazione, gli smartphone servono come centri per il controllo di numerose altre tecnologie connesse, funzionando come veri e propri hub personali di interazione con l'ecosistema IoT.

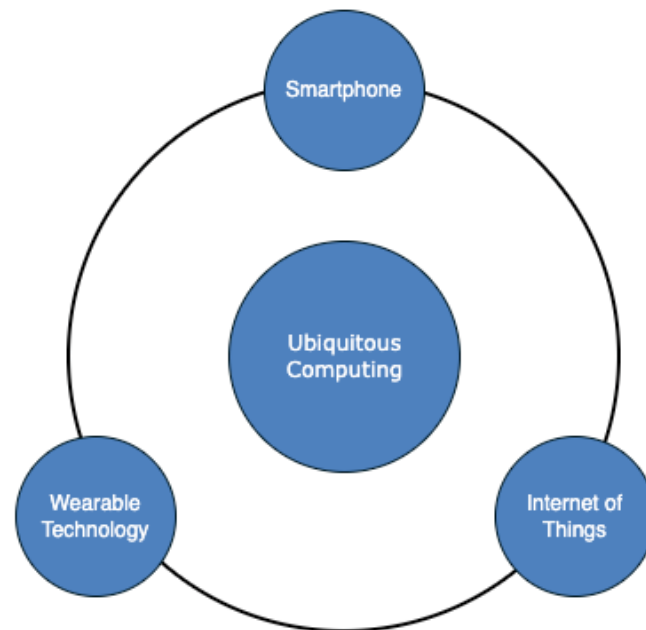


Figura 1.1: I tre ambiti principali dell'Ubiquitous Computing

Le tecnologie indossabili come gli smartwatch e i dispositivi per il fitness hanno amplificato questa integrazione consentendo la connettività e la raccolta di dati direttamente sul corpo degli individui. Queste apparecchiature monitorano una vasta gamma di parametri vitalmente importanti - dall'esercizio fisico al battito cardiaco fino al sonno - offrendoci informazioni preziose per migliorare il benessere personale e la prevenzione nella salute. In aggiunta a ciò attraverso l'utilizzo di questi strumenti portatili, le persone possono ricevere notifiche in tempo reale, gestire appuntamenti e controllare altri dispositivi smart collegati tramite interfacce sempre più user-friendly ed intuitive [26].

Infine l'IoT ha rivoluzionato diversi aspetti del mondo contemporaneo; collegando oggetti di uso quotidiano come frigoriferi e lampadine alla rete internet, permettendo loro di comunicare ed essere gestiti da remoto. Questa vasta rete di dispositivi connessi permette la raccolta e l'analisi di dati su lar-

ga scala migliorando l'efficienza nei settori come l'industria manifatturiera, la gestione energetica e la logistica urbana. In aggiunta, l'IoT sta svolgendo un ruolo cruciale nello sviluppo delle cosiddette “smart cities”, dove la gestione del traffico e dell'inquinamento integrate alla sicurezza pubblica e ai servizi di emergenza si basano su una comunicazione costante e un'analisi predittiva volta a rendere gli ambienti urbani più sicuri, efficienti e sostenibili [26].

1.4.1 Sensori e dispositivi IoT per il monitoraggio ambientale

L'Environmental Monitoring (EM), o Monitoraggio Ambientale, coinvolge principalmente il controllo degli inquinanti e la gestione efficace dei disastri ambientali. Alcuni esempi di applicazione possono essere l'inquinamento dell'acqua, l'inquinamento dell'aria, le radiazioni pericolose, i cambiamenti climatici e i terremoti. Inoltre grazie a recenti progressi nella scienza e nella tecnologia, in particolare nell'intelligenza artificiale e nel Machine Learning (ML), l'EM si è evoluto in un sofisticato sistema di monitoraggio ambientale intelligente, chiamato in inglese “smart environment monitoring” (SEM). Questi sistemi utilizzano Internet of Thing (IoT), intelligenza artificiale (AI) e sensori wireless.

Le reti di sensori wireless permettono il trasferimento dei dati e quindi la comunicazione tra dispositivi IoT, usati per monitorare, registrare e gestire diverse condizioni ambientali.

Ora si introducono alcuni esempi di utilizzo dei dispositivi IoT nel monitoraggio ambientale.

In figura 1.2 possiamo vedere un sistema SEM basato su cloud attivo nel monitoraggio della contaminazione delle acque marine. Qui, grazie a connessioni wireless, i vari dispositivi IoT e sensori di monitoraggio comunicano fra di loro permettendo l'analisi delle acque. Questa classificazione è possibile tramite l'implementazione all'interno di questi di tecnologie che si servono dell'AI, nello specifico del ML. In questo modo l'organizzazione incaricata

della gestione delle varie fonti idriche può, tramite accesso al cloud, attuare controlli di qualità in base alle segnalazioni ricevute dai sensori.

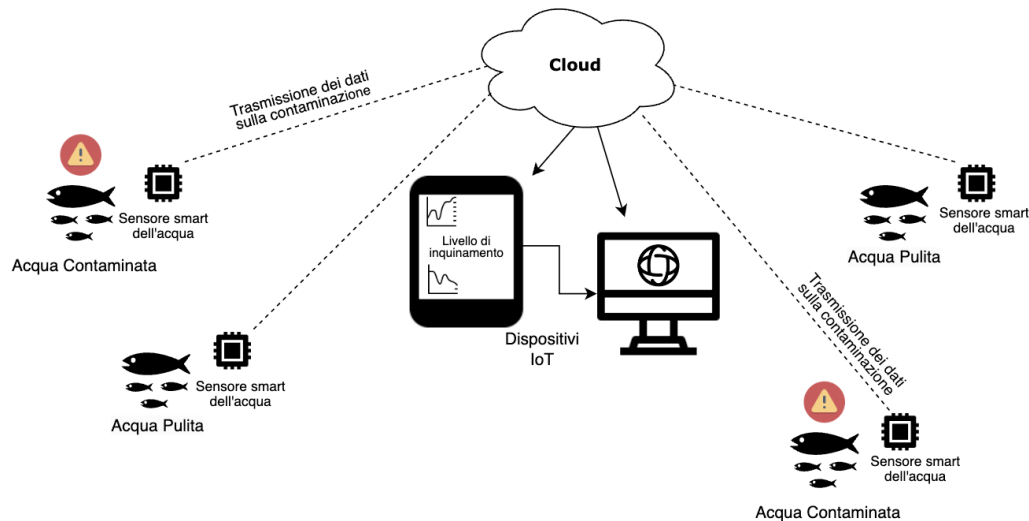


Figura 1.2: Sistema SEM per la contaminazione delle acque

Un altro esempio di sistema SEM è nel campo dell'inquinamento atmosferico nelle città. Con un funzionamento simile all'esempio precedente, tramite sensori di rilevamento del particolato è possibile evidenziare le aree di maggior inquinamento inviando i dati in cloud. Inoltre questo concetto può essere esteso utilizzando sensori di umidità, temperatura, raggi infrarossi, raggi UV ecc.. dando vita così a una vera e propria "smart city", in modo da ottimizzare i costi e gestire in modo efficiente ogni risorsa [27].

1.5 Applicazioni mobili per l'engagement ambientale

1.5.1 Il ruolo delle app nella sensibilizzazione e partecipazione ambientale

Le app per dispositivi mobili stanno avendo un ruolo sempre più cruciale nell'insegnamento e nella promozione della sostenibilità ambientale; esse figurano come validi strumenti per sensibilizzare e coinvolgere attivamente le persone sulle questioni ambientali.

In base allo studio di Schaal e Lude (2015) [28], smartphone e tablet con funzionalità come il GPS e l'accesso a risorse digitali offrono soluzioni innovative per imparare ad esplorare l'ambiente naturale. Questi dispositivi permettono il raggiungimento di luoghi remoti e particolarmente significativi dal punto di vista ecologico, facilitando un'interazione più profonda con la natura attraverso esperienze dirette.

Un punto favorevole delle applicazioni mobili è la loro capacità di arricchire queste esperienze. Questo avviene grazie ai servizi che offrono quali: simulazioni digitali di ecosistemi, informazioni storiche e scientifiche o strumenti per l'analisi scientifica dei dati ambientali.

Un altro aspetto che si è dimostrato utile è l'apprendimento basato sulla localizzazione. Qui viene sfruttata la tecnologia di geolocalizzazione integrata negli smartphone per far vedere contenuti educativi in relazione alla posizione fisica dell'utente, questa si è dimostrata efficace nel motivare gli studenti e nell'accrescere una maggiore consapevolezza ambientale.

Infine ricerche come quelle di Ruchter et al. [29] hanno dimostrato che l'utilizzo dei dispositivi mobili può aumentare la motivazione degli studenti rispetto all'uso di guide cartacee o guide tradizionali.

Certamente, nonostante i benefici, è rilevante riflettere attentamente sull'utilizzo delle app nel quadro dell'educazione all'aperto. Il pericolo principale è quello della "alienazione dalla natura", dove l'attenzione può trasferirsi da-

gli aspetti naturali all'interfaccia tecnologica. Per ovviare a questo problema si pone vitale la pianificazione e l'integrazione delle tecnologie con metodi pedagogici e la giusta progettazione delle attività che si vogliono svolgere. L'obiettivo finale deve perciò essere di migliorare l'interazione diretta con l'ambiente e non di sostituirla.

Quindi, in conclusione, le app rappresentano un complemento considerevole nella sensibilizzazione e partecipazione ambientale, coadiuvando l'esperienza educativa e favorendo un impegno attivo e consapevole verso la sostenibilità ambientale. La sua efficacia dipenderà dalla capacità di chi ne usufruirà di integrare queste tecnologie in modo etico e pedagogicamente solido, inquadrando gli obiettivi educativi.

1.5.2 Esempi di app per il coinvolgimento ambientale

1.5.2.1 iNaturalist

Un esempio celebre di app volte al coinvolgimento ambientale è iNaturalist. Questo servizio nato nel 2008 ha avuto un impatto significativo sulla citizen science e sull'impegno del pubblico nella ricerca ambientale. All'interno della piattaforma gli utenti possono caricare le loro osservazioni sulla biodiversità, le quali vengono poi validate dalla comunità online. Il servizio ha ottenuto il traguardo dei 25 milioni di dati registrati e di contributi provenienti da ogni parte del mondo, questa piattaforma è dimostrazione di come la tecnologia possa promuovere l'impegno individuale a favore della conservazione della diversità biologica.

La caratteristica più importante di iNaturalist è proprio il fatto che può rendere più agevole la condivisione e la scalabilità dei dati sulla biodiversità grazie all'uso di meccanismi sociali che prima di tutto incoraggiano gli utenti e in secondo luogo facilitano la raccolta e la condivisione delle informazioni.

Grazie alla piattaforma, che dedica spazio per collaborare al riconoscimento delle specie vegetali e animali, si alimentano nuove ricerche scientifiche e

si supportano azioni di conservazione basate su dati attendibili ed accessibili a tutti.

L'abilità di coinvolgere di iNaturalist emerge nella sua capacità di motivare gli utenti offrendogli un senso di appartenenza ad una comunità molto vasta e la possibilità di contribuire in positivo alle problematiche ambientali globalmente rilevanti. Collaborazioni con ricercatori e conservazionisti rafforzano questa dinamica creando un ciclo virtuoso di impegno che potenzia sia la quantità che la qualità dei dati raccolti.

iNaturalist è quindi un ottimo esempio di come le app possano essere utilizzate per aumentare la consapevolezza e l'interesse ambientale su scala mondiale. Fornendo strumentazioni per una partecipazione impegnata questo servizio non solo istruisce e coinvolge ma permette a ogni persona di diventare un attore attivo nel campo della sostenibilità ambientale [30].

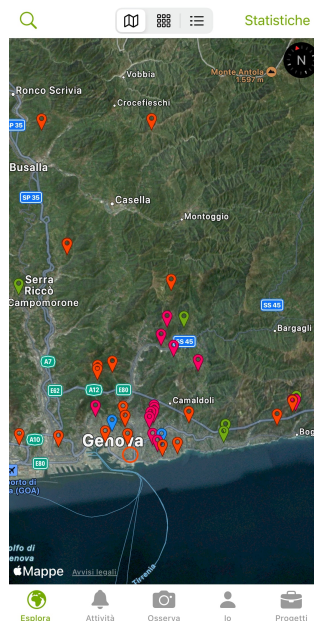


Figura 1.3: Mappa di iNaturalist con segnalazioni²

²<https://www.inaturalist.org>

1.5.2.2 eBird

eBird è un altro esempio importante di app mobile volta al coinvolgimento dei cittadini nella sostenibilità ambientale, in particolare nel campo della biodiversità ornitologica. eBird è nato inizialmente come un progetto di citizen science e poi è diventata un'impresa collettiva che ha incluso scienziati come i biologi della conservazione e sviluppatori app, con l'obiettivo di aumentare la quantità e la qualità dei dati che si raccoglievano.

Anche qui eBird funziona bene nell'engagement dei cittadini poiché le tecnologie che usa semplificano la raccolta e la condivisione delle osservazioni ornitologiche. Gli utenti dell'app, che sono principalmente birdwatchers, hanno la possibilità di caricare le loro osservazioni contribuendo ad alimentare una enorme base di dati. Tutti i dati sono chiaramente accessibili liberamente e usati da molti utenti fra cui ricercatori.

L'apertura e disponibilità dei dati rende eBird un modello di come i dati raccolti dai cittadini possono integrarsi efficacemente nelle scienze ambientali. Le collaborazioni con gli specialisti hanno fatto sì che aumentassero sia la quantità che la qualità dei dati raccolti, requisito fondamentale per massimizzare il valore di ciò che la citizen science può fornire. eBird illustra perfettamente il potenziale delle app mobili di citizen science per mobilitare il pubblico verso la sostenibilità ambientale, migliorando contemporaneamente sia la comprensione scientifica sia le azioni di conservazione [31].

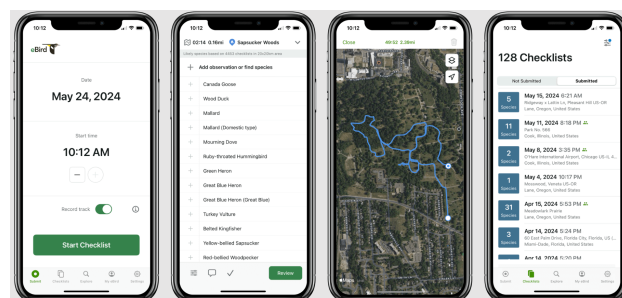


Figura 1.4: Esempi di funzionalità dell'app³

³<https://ebird.org/about/ebird-mobile/>

Capitolo 2

Il Digital Twin e la Sostenibilità Ambientale

2.1 Introduzione

Questo capitolo mostra cos'è il Digital Twin (DT) o Gemello Digitale, il suo ruolo vitale nella sostenibilità ambientale e alcune sue applicazioni pratiche.

2.1.1 Origini e sviluppo del concetto

Nel 2003 il Professore Grieves dell'Università del Michigan introduce per la prima volta il concetto di Digital Twin nel suo corso di gestione del ciclo di vita del prodotto. Da quel momento il significato è andato ad evolversi sempre di più assumendo varie forme. In generale, il gemello digitale è definito come la rappresentazione virtuale di un oggetto fisico durante il suo intero ciclo di vita. Esso usa dati in tempo reale e modelli di simulazione per comprendere e ottimizzare il suo funzionamento.

I componenti principali che definiscono un Gemello Digitale, mostrati in figura 2.1, sono quindi la componente fisica, la sua rappresentazione virtuale e la connessione bidirezionale dei dati fra le due parti.

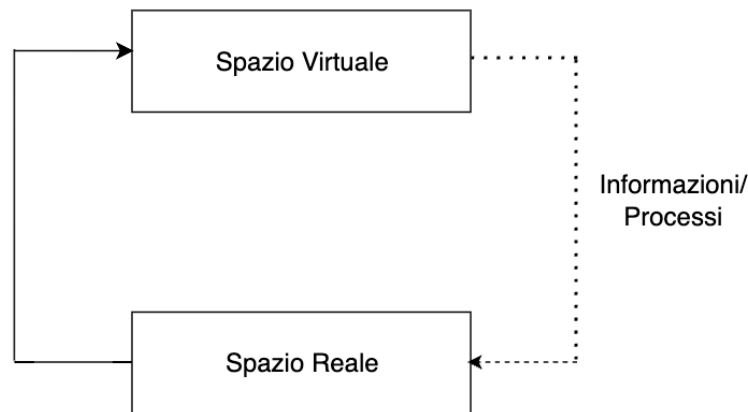


Figura 2.1: Componenti essenziali del Digital Twin

Il concetto di Digital Twin ha avuto anche un'applicazione storica durante il salvataggio dell'Apollo 13. Gli ingegneri della NASA svilupparono un gemello del modulo di comando e un gemello del modulo del sistema elettrico. Grazie a ciò, in meno di due ore, riuscirono a salvare le vite di tre astronauti a bordo. Questa fu una straordinaria applicazione della tecnologia del Gemello Digitale, la quale da lì maturò fino ad oggi.

Il Digital Twin si è spostato dall'idea alla realtà molto più velocemente negli ultimi anni. Si pensa che il suo legame con tecnologie come realtà aumentata, Internet of Things e Intelligenza Artificiale sarà sempre più stretto. Grazie al suo forte successo recente il mercato di questa tecnologia è stato valutato 6.9 miliardi di dollari nel 2022 e ci si aspetta possa raggiungere i 73.5 miliardi di dollari nel 2027, una crescita quindi del 60% [32] [33].

2.1.2 Caratteristiche principali

Il Digital Twin è definito da tre principali aspetti: l'acquisizione dei dati, la loro modellazione e la loro applicazione. Questi tre ambiti sono affiancati da 4 tecnologie che permettono di collezionare e salvare dati in tempo reale, ottenere informazioni per produrre conoscenza e creare una rappresentazione digitale di un oggetto fisico. Esse sono [32]:

1. **Internet of Things:** Già spiegata esaustivamente nello scorso capitolo, si riferisce alla gigantesca rete di "cose" connesse. Il DT se ne serve come tecnologia primaria in ogni applicazione. I sensori IoT vengono usati per collezionare dati da oggetti fisici reali. I dati trasmessi sono poi usati per creare una copia fisica dell'oggetto. Inoltre la trasmissione di questi dati è in tempo reale, fondamentale per avere un costante aggiornamento dello stato dell'oggetto.
2. **Intelligenza Artificiale:** L'AI può aiutare il DT fornendo strumenti di analisi avanzata capaci di analizzare automaticamente i dati ottenuti ricavandone informazioni preziose, facendo predizioni e dando consigli su come evitare potenziali problemi.
3. **Realtà estesa (XR):** Questo termine descrive le tecnologie immersive come la Realtà Virtuale (VR), la Realtà Aumentata (AR) e la Realtà Mista (MR). Queste tecnologie uniscono il mondo fisico e quello virtuale estendendo la realtà che possiamo sperimentare. Il DT usa la XR per modellare digitalmente oggetti fisici, permettendo a utenti di interagire con il contenuto digitale.
4. **Cloud Computing:** Il Cloud Computing si riferisce ai servizi ospitati su internet. Esso permette al DT di salvare grandi moli di dati sul Cloud virtuale e di accedervi facilmente da qualsiasi luogo. Questa tecnologia velocizza i tempi di accesso e supera le difficoltà relative al salvataggio di grandi quantità di dati.

2.1.3 Casi d'uso

Le aree dove la tecnologia del Digital Twin ad oggi viene più utilizzata sono quelle dell'ingegneria e dell'industria manifatturiera. Tuttavia, siccome essa è sempre più in espansione, viene usata in tante altre industrie quali: aerospazio, educazione, costruzione, automazione, agricoltura, commercio, salute, mineraria e militare.

Nel settore aerospaziale, i gemelli digitali sono usati per monitorare e prevedere le prestazioni di aerei e veicoli spaziali. La NASA, per esempio, ha adottato il concetto di Digital Twin per migliorare la sicurezza e l'affidabilità delle missioni spaziali, permettendo la simulazione e l'analisi in tempo reale dei sistemi aerospaziali [34].

Nel campo dell'edilizia, il Digital Twin viene impiegato per creare modelli virtuali di edifici e infrastrutture. Questo permette infatti di ottimizzare la progettazione, la costruzione e la gestione degli edifici, migliorando l'efficienza energetica e riducendo i costi operativi [35].

In automazione e nell'industria manifatturiera, i gemelli digitali sono vitali per sviluppare sistemi di produzione intelligenti. Essi permettono di simulare i processi produttivi, ottimizzare le operazioni e prevedere eventuali guasti o inefficienze, aumentando la produttività e la qualità dei prodotti [36].

Nel settore dell'agricoltura, il Digital Twin può essere utilizzato per monitorare le condizioni delle colture, del suolo e delle risorse idriche. Attraverso la modellazione virtuale delle aziende agricole, è possibile ottimizzare l'uso delle risorse, aumentare la resa delle colture e promuovere pratiche agricole sostenibili.

Nel campo della sanità, i gemelli digitali di organi o interi sistemi biologici aiutano nella personalizzazione dei trattamenti medici. Ad esempio, la creazione di un gemello digitale del cuore di un paziente può supportare i medici nella pianificazione di interventi chirurgici complessi e nella previsione delle risposte ai trattamenti [32] [33].

2.2 Il Digital Twin nel contesto della sostenibilità ambientale

2.2.1 Ruolo del Digital Twin nella gestione ambientale

La tecnologia del Digital Twin ha un impatto sempre più forte nei confronti della sostenibilità ambientale e del cambiamento climatico. I DT possono trasformare il modo in cui le organizzazioni monitorano e gestiscono l'impatto ambientale delle loro operazioni.

Il Digital Twin quindi permette di adottare in modo più semplice strategie sostenibili tramite la precisa gestione delle risorse e l'ottimizzazione delle operazioni. Ad esempio, il monitoraggio in tempo reale delle emissioni di CO₂ e l'uso efficiente dell'energia negli edifici possono essere migliorati molto grazie a esso.

La simulazione e la previsione del consumo energetico sono due dei principali vantaggi attribuiti al Digital Twin nell'ambito ambientale. Infatti la sua capacità di analizzare dati da varie fonti permette una gestione ambientale migliore e soprattutto più integrata.

Anche nel campo idrico il DT ha avuto ottimi riscontri. Come indicato in un articolo di Zekri et al. [37], i digital twin danno un contributo sostanziale nella gestione delle risorse idriche grazie alla simulazione degli interventi possibili di gestione del ciclo dell'acqua, avendo l'effetto di trovare politiche di conservazione decisamente più efficaci.

È importante sottolineare però che la tecnologia del Digital Twin non si limita solo a queste applicazioni. Le preoccupazioni riguardo al cambiamento climatico sono sempre più in crescita e stanno diventando sempre più tangibili agli occhi della società. In particolare gli eventi atmosferici estremi hanno creato numerose pressioni verso i decisori politici che devono attuare misure a lungo e breve termine per avere cambiamenti strutturali che possano portare a una società più sostenibile. Inoltre, queste misure spesso richiedono ingenti investimenti e creano effetti visibili solo dopo anni o addirittura

decenni. I sistemi informativi attuali hanno raggiunto un ottimo livello di efficacia da poter soddisfare una vasta gamma di esigenze legate alla pianificazione e all'implementazione di politiche ambientali. In alcune aree, come quella del cambiamento climatico, è necessario però avere un progresso superiore alla media. In quest'ottica nel 2021, la presidente della Commissione Europea Ursula Von der Leyen ha lanciato un'iniziativa chiamata Destination Earth (DestinE) con l'obiettivo di creare un gemello digitale del pianeta Terra, in modo da capire meglio gli effetti del cambiamento climatico e i disastri ambientali. In questo modo è possibile vedere il Digital Twin come un potenziamento dei normali sistemi di informazione, i quali possono avere limitazioni in termini di dettaglio, integrazione e capacità di simulazione in tempo reale [38].

2.2.2 Ottimizzazione delle risorse e riduzione dell'impatto ambientale

Come spiegato in precedenza, il Digital Twin ha un ruolo importante nell'ottimizzazione delle risorse e nella conseguente riduzione dell'impatto ambientale. Uno degli ambiti in cui è possibile vedere meglio applicato questo concetto è senz'altro quello manifatturiero.

I DT consentono di ottimizzare l'uso di materie prime ed energia riducendo così le emissioni di inquinanti. L'azienda Siemens, ad esempio, usa i gemelli digitali per simulare la linea di produzione ottenendo una riduzione sostanziale del consumo energetico e delle emissioni di CO₂ [39].

Nel settore dell'energia invece, i DT sono utili per ottimizzare gli impianti energetici e le reti di distribuzione. In questo modo è possibile integrare fonti rinnovabili in modo più efficace. Per esempio è possibile migliorare le prestazioni delle turbine eoliche, aumentando la produzione di energia e riducendo i costi di manutenzione [40].

Nell'ambito urbano infine, il DT può addirittura coincidere con un'intera città, dando vita alla così detta Smart City (2.3.1), di cui si parlerà più nello specifico in seguito [41].

2.3 Esempi di applicazione del Digital Twin nella sostenibilità

In questa sezione verranno esaminati alcuni esempi significativi dell'applicazione del Digital Twin nell'ambito ambientale, mostrando come questa tecnologia possa rappresentare una leva strategica per promuovere la sostenibilità e affrontare le sfide legate profondamente al cambiamento climatico.

2.3.1 Smart Cities e gestione delle risorse urbane

All'inizio del nuovo millennio si è verificata una grande espansione delle città che ha portato con sé sfide e opportunità uniche per i centri urbani di tutto il mondo. Questo tipo di espansione urbana non è semplicemente un cambiamento demografico, ma una complessa interazione di fattori socioeconomici, tecnologici e ambientali.

Chiaramente, per accogliere e sostenere la crescita delle aree urbane è fondamentale garantire anche sostenibilità e qualità della vita per gli abitanti delle città. Per rispondere a queste esigenze è vitale integrare la tecnologia nella pianificazione e nello sviluppo urbano. Inoltre, il concetto di "Smart City" ha guadagnato popolarità, enfatizzando l'uso di strumenti digitali e approcci basati sui dati per migliorare la vita urbana. In questa ottica il Digital Twin viene gradualmente inserito nelle aree di pianificazione urbana e gestione delle infrastrutture.

Le potenziali applicazioni del DT nello sviluppo urbano sono vastissime. Essi ci forniscono un approccio olistico basato sui dati per affrontare le sfide urbane. Ad esempio, simulando scenari urbani, gli urbanisti possono anticipare e mitigare problemi che vanno dalla congestione del traffico al degrado ambientale. Modelli digitali dettagliati permettono di analizzare l'impatto delle nuove costruzioni sull'ambiente circostante, ottimizzare l'uso dell'energia negli edifici e migliorare la gestione dei rifiuti. In aggiunta, integrando i

DT con IoT e AI l'analisi predittiva diventa ancora più accurata, l'allocazione delle risorse viene ottimizzata e si promuove il coinvolgimento dei cittadini.

Un esempio concreto è rappresentato dalla città di Singapore, che ha sviluppato il progetto Virtual Singapore, un gemello digitale tridimensionale dell'intera città. Questo strumento consente di simulare flussi di traffico, gestire emergenze e pianificare lo sviluppo urbano in maniera sostenibile. Allo stesso modo, Helsinki utilizza un Digital Twin per migliorare l'efficienza energetica degli edifici e coinvolgere i cittadini nei processi decisionali attraverso piattaforme interattive [42].

Come ogni tecnologia promettente essa presenta dei limiti. Le città si fanno carico di ostacoli che vanno dalle preoccupazioni sulla privacy dei dati al fatto che è richiesto un cambiamento significativo negli approcci di pianificazione tradizionali. La raccolta e l'analisi di enormi quantità di dati sollevano questioni etiche riguardanti la protezione delle informazioni personali e la sicurezza informatica. Inoltre, l'implementazione dei Digital Twin richiede investimenti significativi in infrastrutture tecnologiche e competenze specializzate, rendendo difficile l'adozione per città con risorse limitate. Nonostante queste sfide, i DT forniscono alle città la capacità di immaginare un futuro urbano sostenibile, resiliente e inclusivo. Essi facilitano la transizione verso modelli di economia circolare, promuovendo l'efficienza nell'uso delle risorse e riducendo l'impatto ambientale. Inoltre, attraverso la simulazione di scenari futuri, le amministrazioni possono prepararsi meglio agli effetti del cambiamento climatico, come l'innalzamento del livello del mare o eventi meteorologici estremi [42].

Sebbene le possibilità dei DT nella pianificazione siano ampie, la loro applicazione nel campo della sostenibilità è ancora agli albori. Inoltre l'integrazione delle dinamiche della comunità sociale nel DT è un ambito ancora emergente che ha bisogno di sviluppo. Capire a pieno i comportamenti umani e le interazioni sociali all'interno del contesto urbano digitale è importantissimo per creare città che siano non solo smart, ma anche vivibili e centrate sulle persone. Quindi, per concludere, si può affermare che il Digital Twin

sia la rappresentazione tangibile di una tecnologia promettente per affrontare le difficoltà dell'urbanizzazione del nostro tempo. Superando le problematiche principali e sfruttando appieno il potenziale di questa tecnologia, le città possono porsi verso modelli più sostenibili ed equi, soprattutto migliorando la qualità della vita di tutti i cittadini. [42] [43].

2.3.2 Gestione sostenibile dell'industria manifatturiera

Nell'era dell'Industria 4.0, l'industria manifatturiera è al centro di una rivoluzione digitale e sostenibile. In passato, questo settore è stato uno di quelli con più impatto ambientale in termini di consumo di risorse e produzione di rifiuti, ma oggi sta prendendo parte a una trasformazione verso pratiche più sostenibili e intelligenti.

Il Digital Twin in questo contesto grazie alla sua capacità di fare analisi predittive e prendere decisioni in tempo reale è vitale per poter migliorare l'efficienza e mitigare l'impatto ambientale. In particolare è possibile ottimizzare il design del prodotto, migliorare le tecniche di manutenzione e addirittura ridurre il consumo energetico e i materiali di scarto.

L'applicazione del DT si inserisce così nel contesto più ampio dell'intelligent manufacturing o manifattura intelligente, che unisce strumenti fisici con algoritmi di intelligenza artificiale per creare sistemi di produzione più efficienti. È importante sottolineare che il DT si può applicare secondo tre aspetti: nel design del prodotto, nella manifattura e nel product service.

La manifattura intelligente si pone come ponte di collegamento fra le tecnologie che usano intelligenza artificiale e le tecnologie avanzate di manifattura. La figura 2.2 mostra l'architettura dell'intelligent manufacturing secondo tre dimensioni principali quali: life cycle o ciclo di vita, system level o livello sistemico e intelligent features o caratteristiche intelligenti [44] [45].

1. **Ciclo di vita:** Questa dimensione attraversa le fasi di design, produzione, logistica, vendita e servizio del prodotto. Grazie alla capacità

intrinseca del Digital Twin di evolvere insieme al prodotto esso permette di monitorarlo e ottimizzarlo in ogni fase del suo ciclo di vita. Questo permette di prevedere problemi, ottimizzare processi e personalizzare i prodotti in base alle necessità, il tutto in tempo reale.

2. **Livello Sistemico:** Questa dimensione va dal livello dei dispositivi individuali (come i sensori) fino al livello dell'impresa intera. Ogni livello di questo sistema può giovare dal fatto che il DT fornisce dati dettagliati e aggiornati, migliorando l'interconnessione tra i dispositivi fisici e quelli digitali.
3. **Caratteristiche Intelligenti:** Queste caratteristiche sono quelle che permettono l'integrazione e l'automazione intelligente e la condivisione di dati. L'uso dell'intelligenza artificiale permette di trasformare i dati raccolti dai digital twin e dargli valore per il fine di ottimizzare la produzione.

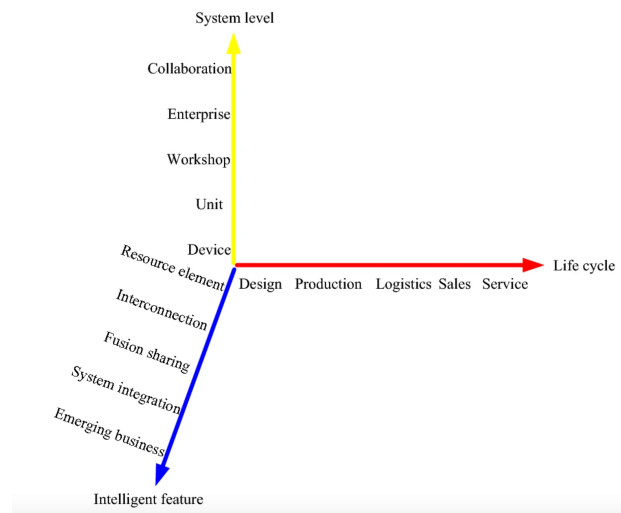


Figura 2.2: L'architettura della manifattura intelligente [44]

In una revisione sistematica della letteratura [46] è stato evidenziato in che percentuale e in accordo a quali criteri gli autori citassero la tematica della sostenibilità secondo le tre principali aree quali: Economica, Ambientale

e Sociale. Il risultato, come mostrato in figura 2.3 è una forte propensione al fattore economico e una minore attenzione a quello sociale. Il problema del consumo di energia è quello che viene preso più in considerazione. Esso è in grado di influenzare sia il fattore economico , grazie a una riduzione dei costi, ma soprattutto quello ambientale grazie al minor utilizzo di risorse [46].

S D	% SD	Category	% C	Criteria	% Cr.
Economic	95,8 %	Industrial costs	95,8 %	Energy Cost	62,5%
				Material/Resource Cost	37,5%
				Maintenance Cost	12,5%
				Other Industrial cost	29,2%
		Performance	16,7 %	Productivity	12,5%
				Revenue	4,2%
Environmental	83,3 %	Resource consumption	62,5 %	Energy efficiency / Energy saved	62,5%
				Material / Other Resource saved	37,5%
		Pollutant	20,8 %	Waste generation	12,5%
				Carbon / Co2 emissions	8,3%
				Forest management	4,2%
Social	54,2 %	Community	16,7 %	Public safety	12,5%
				Land use	4,2%
		Employee	33,3 %	Employee Safety	25,0%
				Working condition	12,5%
				Labor Productivity	8,3%
		Customer	20,8 %	Customer satisfaction with the product	12,5%
				Customer satisfaction (due to cost or services)	8,3%

Figura 2.3: Percentuale di documenti che considerano un criterio dato, una categoria e una "Sustainability Dimension (SD)" [46]

2.3.3 Digital Twin e manutenzione predittiva per la sostenibilità

Il Digital Twin nella letteratura scientifica è menzionato come uno dei principali strumenti per supportare la produzione e le attività di manutenzione per mantenere l'obiettivo della sostenibilità ambientale. Per soddisfare

questo traguardo è necessario considerare le tre dimensioni della sostenibilità simultaneamente, quali: quella economica, ambientale e sociale.

Il DT possiede molti benefici per migliorare le performance industriali: può essere usato per simulare, verificare, monitorare, ottimizzare, svolgere diagnosi e prognosi e supportare il processo decisionale. Per questo motivo il DT è particolarmente efficace nel soddisfare il requisito di produzione e manutenzione sostenibile. Secondo Franciosi et al. [46] e come è possibile notare in figura 2.4 il numero di pubblicazioni che considerano il DT in questo settore sono in forte crescita dal 2018, dando spazio a grandi possibilità future di applicazione di questa tecnologia.

Come spiegato nel paragrafo precedente il DT può essere usato nella pianificazione, monitoraggio e miglioramento generale del processo di manifattura. Esso però può essere utilizzato specificamente per attività relative alla manutenzione. In questo contesto il DT è impiegato largamente nell'analisi predittiva che include la diagnosi (ad esempio sul comportamento dell'energia dei macchinari) e la predizione della probabilità di guasti futuri (ad esempio nel settore agricolo). Ora si descriveranno brevemente queste due principali aree in due loro applicazioni tipiche.

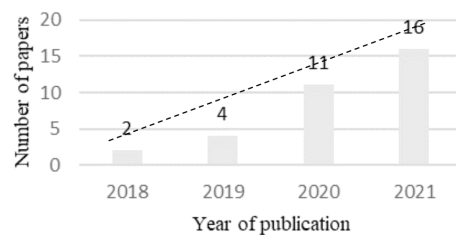


Figura 2.4: Distribuzione degli studi negli anni [46]

2.3.3.1 Predizione dell'energia basata su dati

I sistemi di manutenzione predittivi basati sull'energia permettono di monitorare la salute e lo stato della strumentazione.

Un approccio non invasivo, il cui interesse da parte delle industrie sta crescendo sempre di più, è quello del "non-intrusive load monitoring (NILM)". Nato come strumento per monitorare il consumo energetico nelle abitazioni smart è ora usato per tenere traccia del consumo dei sistemi di produzione (come i macchinari per la manifattura industriale) tramite un quantitativo minimo di sensori [47].

NILM misura la potenza in entrata di un circuito elettrico tramite un contatore smart per estrapolare i dati relativi al consumo della macchina. In questo modo l'efficienza è migliorata mentre i costi sono ridotti. Inoltre, per rispondere al problema di interrompere un'intera linea di produzione per un guasto a una macchina, la gestione della salute delle macchine tramite diagnosi e prognosi basate sul comportamento del consumo di potenza è stata cruciale per la realizzazione della manifattura smart. Così il Digital Twin permette di essere usato come riferimento per vedere se il funzionamento della macchina reale procede come aspettato o sperimenta guasti [47].

La modellazione energetica dei macchinari industriali si concentra principalmente su quella che è la lavorazione del prodotto (taglio, fresatura, lavorazione ecc..) andando a cercare relazioni specifiche nei consumi energetici. Ad esempio Liang et al. [48] hanno mostrato una modellazione energetica basata su Reti Neurali Artificiali (ANN) per l'ottimizzazione dell'energia usata durante la lavorazione considerando le dinamiche di invecchiamento delle macchine durante il ciclo di vita di produzione. Oppure Zou et al. [49] propongono un metodo di modellazione di produzione stocastica basato sui dati per identificare e prevedere potenziali risparmi energetici e il loro impatto sulla produzione [47].

2.3.3.2 Gestione sostenibile dell'agricoltura

L'agricoltura è un pilastro del sistema economico di uno stato. C'è tanta aspettativa nei confronti di questo settore, dovuta principalmente alla popolazione in continua crescita. Ma, nonostante questo, vi è un declino graduale nella forza lavoro agricola. Questo fatto è dovuto alle calamità na-

turali, governi che non supportano regolamentazioni, fluttuazioni nei prezzi di mercato, cambiamenti climatici improvvisi, erosione del terreno, perdita di biodiversità, cambiamenti nei gusti dei consumatori e bisogno di imparare nuove tecnologie. Per questo motivo ora più che mai è fondamentale adottare metodi di produzione più efficienti e sostenibili [50].

Il concetto di DT applicato all'agricoltura è ancora alle sue fasi iniziali. Questo ritmo lento può essere dovuto a varie ragioni quali mobilità delle risorse (come il bestiame), mancanza di mezzi di comunicazione nelle fattorie remote, mancanza di finanziamenti, i continui cambiamenti climatici, la mancanza della volontà di condividere le informazioni sulla proprio azienda agricola e la mancanza di competenze tecniche da parte degli agricoltori.

Sreedevi et al. [50] propongono, per contribuire in modo significativo alla ricerca in questo campo, un modello basato su Digital Twin e IoT per connettere risorse differenti in modo da avere un quadro complessivo agricolo più chiaro. Gli agricoltori potranno avere conoscenza di vari parametri e come impattano sul comportamento della fattoria, del rendimento totale e soprattutto del consumo delle risorse. Questo permetterà agli agricoltori di prendere decisioni migliori e diminuire l'impatto ambientale sulle risorse naturali.

Il DT fornisce agli operatori agricoli aggiornamenti in tempo reale delle condizioni dell'intero sistema. Ad esempio fornendo fattori ambientali quali temperatura, NH₃, CO₂, umidità, polvere, che contribuiscono al benessere del bestiame. Oppure è possibile capire le prestazioni di energia di nuovi ventilatori per un porcile ancora prima di installarli realmente.

Quando si parla della pianificazione del campo, della semina e della raccolta di successo ci sono più parametri da prendere in considerazione. Ad esempio, un DT può essere impiegato nella raccolta delle patate. Il gemello digitale simula la macchina incaricata nella raccolta insieme alle fasi di lavorazione della materia prima che si svolgerebbero realmente. Questo è possibile grazie a vari sensori integrati per visualizzare le condizioni delle patate in tempo reale. I dati simulati possono essere usati per regolare le

impostazioni delle macchine in condizioni di raccolta ottimali, con un errore minimo.

In questa ottica il Digital Twin si pone come un candidato eccellente per rendere i metodi agricoli efficienti e sostenibili, riducendo e mitigando i danni ambientali di uno dei settori più inquinanti al mondo ¹.

2.4 Sfide e prospettive future

Come visto nei capitoli precedenti il Digital Twin è una tecnologia estremamente promettente che accrescerà la sua fama sempre di più nel futuro. Come ogni tecnologia però deve affrontare diverse sfide, soprattutto per rendersi completamente indistinguibile dalla sua controparte fisica.

In primo luogo, il successo del Digital Twin dipende dalla connessione biunivoca in tempo reale fra l'oggetto fisico e la sua parte digitale. Le sfide principali per permettere questo sono relative alla risoluzione dei dati forniti dai sensori, la latenza nella comunicazione, il grande volume di dati, la loro generazione, varietà e veridicità e infine la loro elaborazione.

In secondo luogo, siccome il modello fisico evolve nel tempo, è necessario che anche quello digitale si aggiorni e mantenga comunque la compatibilità con le sue versioni precedenti.

In terzo luogo, siccome i gemelli digitali svolgono e svolgeranno mansioni sempre più vitali e delicate, ci sarà bisogno di una maggiore trasparenza e interpretabilità delle decisioni prese da essi.

Infine, il DT deve essere presentato all'utente finale in modo che risulti indistinguibile dalla risorsa fisica e più facile e intuitivo da utilizzare. Tutte queste sfide sono riassunte nella tabella 2.1 insieme alle relative tecnologie abilitanti specifiche.

¹<https://www.consilium.europa.eu/it/policies/industrial-emissions/>

Tabella 2.1: Sfide comuni e tecnologie abilitanti

Sfide	Tecnologie Abilitanti
Organizzazione dei dati, privacy dei dati e sicurezza, qualità dei dati	Piattaforme digitali, crittografia e tecnologie blockchain, tecnologie big data
Comunicazione in tempo reale di dati e latenza	Compressione dei dati, tecnologie di comunicazione come il 5G e internet delle cose
Realismo fisico	Tecnologie dei sensori, simulatori ad alta fedeltà basati sulla fisica, modelli basati sui dati
Modellazione in tempo reale	Analisi e modellazione ibride, modellazione di ordine ridotto, modelli multivariati basati sui dati
Aggiornamenti continui del modello	Cibernetica dei big data, analisi e modellazione ibride, assimilazione dei dati, compressed sensing e regressione simbolica
Trasparenza e interpretabilità	Analisi e modellazione ibride, intelligenza artificiale spiegabile
Calcolo su larga scala	Infrastruttura computazionale, edge, fog e cloud computing
Interazione con asset fisici	Interfaccia uomo-macchina, elaborazione del linguaggio naturale, realtà aumentata e realtà virtuale

2.4.1 Tecnologie Abilitanti

Dopo aver descritto le principali sfide della tecnologia del Digital Twin si pone quindi necessario mostrare le tecnologie che potranno rispondere a

queste. Le tecnologie abilitanti possono essere descritte entro quattro principali categorie: modellazione basata sulla fisica, modellazione basata su dati, cibernetica dei big data, interfaccia uomo macchina. Queste categorie sono metodologie generali che possono essere declinate in numerose applicazioni pratiche specifiche, come quelle mostrate nella tabella 2.1.

La prima categoria affronta il problema del realismo e dell'accuratezza. Qui, grazie all'osservazione del fenomeno fisico, si può sviluppare una comprensione parziale di esso e poi si può modellarla attraverso equazioni che governano il comportamento osservato. Esso si divide in tre principali categorie:

1. **Modello Sperimentale:** Questo metodo consiste nello svolgere un esperimento in laboratorio o in situazioni reali su larga scala per raccogliere dati su un processo o fenomeno specifico. Basandosi sui dati raccolti i ricercatori possono sviluppare correlazioni o modelli matematici di quantità che non possono essere direttamente misurate a causa della loro natura (ad esempio perché la misurazione è troppo costosa o tecnicamente impossibile). I modelli ottenuti vengono poi usati per informare e migliorare il DT.
2. **Modello Tridimensionale (3D):** Nel modello tridimensionale si vuole ottenere una rappresentazione matematica di qualsiasi superficie di un oggetto. Nella maggior parte dei Digital Twin il 3D è il punto di partenza poiché esso è proprio l'input dei simulatori fisici.
3. **Simulatori Numerici ad Alta Fedeltà:** Per aggiungere realismo fisico a qualsiasi DT, le equazioni derivate dalla modellazione fisica devono essere risolte. Per equazioni semplici è possibile usare soluzioni analitiche, ma la maggior parte delle volte, data la loro complessità, vanno risolte numericamente al computer (flusso dei fluidi, dinamica dei solidi, reazioni chimiche ecc.). Questi simulatori hanno avuto poco successo perché necessitano di un'alta capacità computazionale, possono avere grosse incertezze nella modellazione e negli input portando a

risultati errati o fuorvianti e infine, per la loro difficoltà nell'assimilare dati storici a lungo termine, non riescono ad adattarsi o apprendere da nuove informazioni.

A differenza dei modelli basati su dati, trattati in seguito, i modelli fisici hanno generalmente meno bias siccome sono governati dalle leggi della natura. Per lo stesso motivo, essi sono altamente interpretabili permettendo di comprendere e spiegare i risultati in modo chiaro.

I modelli basati su dati usano un vasto insieme di dati raccolti da sensori IoT e altre fonti. Spesso integrano tecniche di machine learning per analizzare i dati e identificare pattern o tendenze. Essi sono estremamente flessibili e quindi si adattano rapidamente a cambiamenti nelle condizioni ambientali senza dover per forza riformulare le basi fisiche del modello. Questo permette di rispondere alla sfida del calcolo su larga scala e degli aggiornamenti continui del modello.

Questa tipologia di modelli è basata sull'assunzione che siccome il dato è la manifestazione sia della fisica conosciuta sia di quella non conosciuta, sviluppando un modello di questo tipo è possibile spiegare la fisica nella sua interezza. Infatti, come mostrato in figura 2.5, il modello basato su fisica esclude una grossa parte del fenomeno fisico a causa della sua parziale conoscenza e delle numerose ipotesi poste.

Come ogni metodo, esso presenta svantaggi. Il modello basato su dati dipende fortemente dalla loro qualità, completezza e precisione, inoltre essi non forniscono una comprensione profonda dei processi fisici sottostanti.

Dopo aver introdotto le prime due tecnologie abilitanti è possibile passare all'area della cibernetica dei big data. Essa è lo studio dei sistemi di controllo e di comunicazione in organismi viventi e macchine, tramite l'analisi avanzata dei big data. Questa particolare categoria di dati è un'insieme così grande e complesso che le applicazioni tradizionali di elaborazione dei dati sono insufficienti per gestirli efficacemente. La cibernetica dei big data permette l'integrazione continua di nuovi dati e feedback in tempo reale,

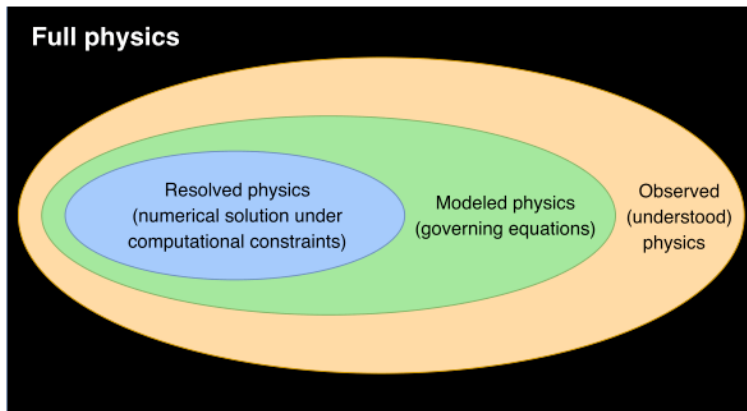


Figura 2.5: Modellazione basata sulla fisica: Essa può modellizzare solo una parte della fisica nota [51].

facilitando aggiornamenti dinamici e l'adattamento dei modelli digitali per riflettere accuratamente gli stati fisici.

Infine, l'interfaccia uomo-macchina permette di rendere più efficace e veloce la comunicazione e l'interazione. Quest'area si serve di tecnologie quali la realtà aumentata e la realtà virtuale, l'elaborazione del linguaggio naturale e il controllo gestuale. Grazie a essa sarà possibile sempre di più migliorare l'interazione con i sistemi digitali e fisici garantendo una comunicazione rapida ed efficace tra gli umani e le macchine, una visualizzazione degli asset chiara e immediata e un'interazione sempre più naturale e intuitiva, riducendo il carico cognitivo e migliorando l'efficienza operativa.

Capitolo 3

Digital Twin e Citizen Engagement: Casi di studio

3.1 Introduzione

Dopo aver parlato del Citizen Engagement, mostrandone l'origine e le sue declinazioni (capitolo 1), e dopo aver trattato il Digital Twin nel contesto della sostenibilità ambientale (capitolo 2), non rimane che unire questi due concetti e analizzare alcuni casi di studio. Questi esempi, tutti a livello europeo, vogliono mostrare la possibilità di applicazione del Digital Twin nella promozione del coinvolgimento dei cittadini e della sostenibilità ambientale.

Questo capitolo si focalizza sull'applicazione del DT nelle smart city (sottosezione 2.3.1), dove la tecnologia non solo favorisce la sostenibilità ambientale ma diventa fondamentale per garantire il coinvolgimento dei cittadini. Infatti, a differenza di altri settori come quello citato in precedenza della manifattura (sottosezione 2.3.2), dove il DT viene usato principalmente per ottimizzare i processi e aumentare l'efficienza produttiva, nel contesto urbano esso rafforza il dialogo tra cittadini e amministrazioni, migliorando la qualità della vita urbana e promuovendo pratiche sostenibili.

3.2 Herrenberg e il coinvolgimento dei cittadini

3.2.1 Quadro Generale

Come abbiamo visto in precedenza parlando di smart city (sottosezione 2.3.1), le applicazioni del DT sono vastissime. Questa tecnologia permette di adottare un approccio olistico basato sui dati per affrontare le sfide urbane e quindi sostenere la crescita di esse nell'ottica di un futuro maggiormente sostenibile.

In questo contesto il "High-Performance Computing Center (HLRS)" di Stoccarda ha deciso di implementare a Herrenberg, cittadina di appena trentamila abitanti, un Digital Twin. Situata nel Baden-Württemberg, nel sud-ovest della Germania, la città fa parte della regione metropolitana di Stoccarda, che ospita circa 5,2 milioni di persone. Herrenberg ha vissuto una rapida crescita urbana, particolarmente marcata durante il periodo dell'industrializzazione e nel dopoguerra.

La regione di Stoccarda è caratterizzata da una collocazione suburbana frammentata tra insediamenti urbani e paesaggi rurali di bassa densità abitativa. Questo porta essa a distinguersi per un elevato volume di traffico, principalmente dovuto alla necessità di pendolarismo, comunità frammentate e una mancanza di governance spaziale. Come è possibile vedere in figura 3.1, il nucleo storico omogeneo di Herrenberg e la sua periferia frammentata sono fortemente influenzati dal traffico automobilistico, conseguenza di decisioni pianificatorie e realizzazioni antecedenti. Questo aspetto rende la città particolarmente esposta all'inquinamento ambientale causato da emissioni e rumore, specialmente lungo la strada principale che circonda il centro storico e funge da distributore del traffico su tre strade federali [52].

Per affrontare queste sfide urbane, è stato sviluppato il piano integrato di mobilità IMEP 2030, che coinvolge attivamente i cittadini e si propone come linea guida per lo sviluppo della mobilità nel prossimo decennio. Gli scenari

urbani del piano IMEP 2030 sono stati utilizzati come applicazioni di test per il gemello digitale urbano, con l'obiettivo di testare un nuovo approccio per migliorare il processo di pianificazione collaborativa.

Il Digital Twin può essere visualizzato grazie alla Realtà Virtuale su grandi display 3D in modo da permettere contemporaneamente l'informazione a persone con background professionali di diverso tipo. Questa tecnologia quindi, durante le decisioni, aiuta a creare consenso fra le parti interessate permettendo non solo di affrontare le problematiche della città ma anche di coinvolgere i cittadini nei processi di pianificazione urbana e progettazione.

Il gemello digitale di Herrenberg differisce da altri studi basati sulla simulazione nel campo delle smart cities. Infatti il modello combina diverse fonti di dati urbani derivanti da analisi e simulazioni, inclusi i dati sociali ottenuti tramite il coinvolgimento dei cittadini. In questo modo è possibile raggiungere i giovani e le fasce della popolazione che solitamente sono meno incluse in questi processi decisionali [52].



Figura 3.1: Vista aerea del centro storico di Herrenberg: in primo piano le strade solitamente molto trafficate [52]

3.2.2 Composizione del DT

A questo punto è importante delineare la composizione del gemello digitale con le varie tecnologie usate.

Il DT è impostato come segue [52]:

1. Un modello 3D dell'ambiente cittadino
2. Un modello matematico di rete stradale che utilizza la teoria e il metodo della sintassi spaziale
3. Una simulazione di mobilità urbana con il software SUMO
4. Una simulazione del flusso d'aria con OpenFOAM, un'applicazione di fluidodinamica computazionale
5. Una simulazione dell'inquinamento che utilizza dati provenienti da una rete di sensori
6. Dati quantitativi sulle rotte pedonali e ciclistiche e dati sociali qualitativi che indicano come vengono percepiti i luoghi urbani e documentazione fotografica dei luoghi

1. Il modello 3D: Il Digital Twin si basa su un solido modello 3D della città basato su dati geografici e informazioni fornite dalle autorità regionali. Per ottenere un'alta qualità d'immagine e allo stesso tempo rapidità è stato usato uno scanner laser ad alta precisione posto su un treppiede. Le immagini catturate coprono la maggior parte del centro della città medievale, e le relative zone sono state scansionate con un'accuratezza proporzionale alla loro criticità per quanto riguarda l'impatto ambientale.

2. Il modello matematico di rete stradale e la sintassi spaziale: Per analizzare il movimento potenziale dei mezzi e dei pedoni il team di ricerca ha deciso di utilizzare la sintassi spaziale.

Questa comprende un insieme di teorie e tecniche per l'analisi delle configurazioni spaziali volte ad approfondire la relazione fra società e spazio. Grazie a essa è stato possibile prevedere quali strade avessero un alto potenziale di essere usate o comunque di sperimentare traffico. Il grafo della rete stradale è stato creato usando un software open source multi piattaforma chiamato depthmapX.

I risultati della sintassi spaziale sono stati poi associati ai dati relativi alle emissioni, raccolti con l'aiuto di una rete di sensori. Questi poi sono stati integrati a loro volta con dati di flusso d'aria per simulare la distribuzione del particolato nel sistema urbano. Ciò ha consentito la stima della quantità di emissioni anche in alcune aree della città non coperte da sensori.

Inoltre, è stato anche possibile testare scenari al fine di verificare gli effetti degli interventi spaziali in relazione all'impatto del traffico e delle emissioni. Oltre a calcolare quindi la situazione della rete stradale preesistente, sono stati testati nove diversi scenari di pianificazione del traffico per la riduzione della congestione e dell'inquinamento nel nucleo della città per quanto riguarda la loro applicabilità ed efficienza.

3. Simulazione della mobilità urbana con SUMO: Per ampliare il modello i ricercatori hanno usato il software open source SUMO in modo da comprendere ancora meglio il comportamento del traffico. I risultati della simulazione creata dal programma sono mostrati su un display 3D come macchine, camion, autobus, biciclette e anche pedoni che si muovono dentro allo spazio virtuale.

4. Flusso dell'aria: La simulazione del flusso d'aria è stata arricchita da dati meteorologici e climatici ufficiali. In questo modo è stato possibile da parte dei ricercatori di mettere in relazione le emissioni con il potenziale volume di traffico e la distribuzione delle emissioni tenendo conto del vento e di fattori come la temperatura e l'umidità. Entrambe le simulazioni del flusso del vento e dell'inquinamento sono state eseguite con OpenFOAM, un'applicazione di fluidodinamica computazionale open source.

5. Rete di sensori: È stata creata una rete di sensori per raccogliere dati empirici sul particolato, sulla temperatura e sull'umidità. I sensori, sviluppati dai ricercatori del Centro di calcolo ad alte prestazioni di Stoccarda, sono stati consegnati a casa dei cittadini selezionati tramite un progetto di Citizen Science. Durante l'installazione, infatti, gli esperti hanno assistito i cittadini quando necessario durante la fase di montaggio. I sensori sono stati posti in strade con vari livelli di traffico. È stata quindi documentata la loro posizione precisa compresa l'altezza da terra. La posizione esatta non è visibile nella visualizzazione, per garantire la privacy.

Dati come particolato (PM 2.5 e 10), temperatura e umidità estrapolati dalla rete, sono stati correlati con i risultati dell'analisi della sintassi spaziale per i segmenti di strada adiacenti, e combinati con il flusso del vento e la simulazione dell'inquinamento per saperne di più sulla distribuzione del particolato nelle geometrie spaziali delle strade e nella topografia urbana.

6. Percorsi di movimento delle persone, dati sociali ed immagini fotografiche: Per raccogliere questo tipo di dato empirico è stata creata un'applicazione mobile chiamata "Reallabor Tracker". Grazie a questo servizio è possibile registrare i percorsi dei cittadini mostrando le aree maggiormente frequentate e stazionarie, il tempo di movimento e la velocità. Inoltre sono state implementate funzionalità di cattura audio e video con georeferenziazione e di valutazione personale degli spazi pubblici. In questo modo i cittadini hanno la possibilità di registrare il rumore del traffico o altri suoni, individuare le barriere urbane e commentare con la loro opinione sotto forma di nota allegata. In figura 3.2 è possibile vedere la rappresentazione 3D dei dati qualitativi empirici integrati nel Digital Twin della città.

3.2.3 Progettazione partecipativa

La rappresentazione del gemello digitale tramite realtà virtuale e aumentata, come mostrato in figura 3.3, può supportare in modo significativo la comunicazione e il processo decisionale tra politici, personale amministrativo

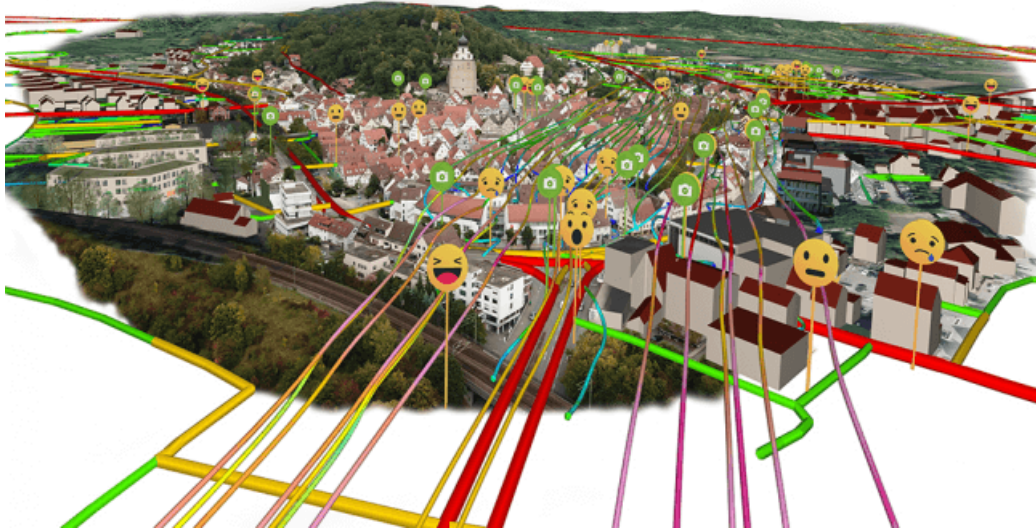


Figura 3.2: Rappresentazione 3D dei dati empirici qualitativi dei cittadini [52]

responsabile e cittadini. Ciò è permesso dalla riduzione della complessità e dalla rappresentazione spaziale e visiva. In questo modo è possibile organizzare eventi dove mostrare i risultati ottenuti in un linguaggio accessibile a tutti, quindi non per forza specialistico; rendendo la partecipazione più attraente e avendo la possibilità di includere gruppi di persone che altrimenti non sarebbero facilmente raggiungibili normalmente, come bambini, adolescenti, residenti con un background migratorio, barriere linguistiche o con un minor livello di istruzione.

3.3 Helsinki e l'importanza degli open data

3.3.1 Profilo del Caso di Studio

I modelli virtuali 3D sono stati usati per molto tempo con il solo scopo di visualizzazione, in modo da mostrare il paesaggio urbano ai cittadini.



Figura 3.3: Uso della realtà aumentata per mostrare il DT ai cittadini durante gli eventi partecipativi [52]

A differenza dei modelli più semplici, i modelli 3D semantici decompongono gli oggetti in componenti basati su criteri logici piuttosto che grafici. Quindi ogni parte del modello è definita e organizzata secondo la sua funzione o il suo significato all'interno del contesto urbano, invece che solo per il suo aspetto visivo. Questo, perciò, permette di associare metadati, processi ed eventi agli oggetti del modello della città, arricchendo particolarmente il modello con informazioni oltre alla tradizionale rappresentazione spaziale.

Parallelamente allo sviluppo del modello di città 3D, le città stanno anche sviluppando le loro piattaforme urbane digitali. Il termine si riferisce a una raccolta di servizi web, interconnessi da interfacce dati, che condividono informazioni con gli stakeholders. Il servizio chiave in queste piattaforme è "l'open data catalog", che la città di Helsinki ha aperto già dal 2011 riuscendo a riunire più di 800 set di dati creati da numerose organizzazioni al suo interno. Esso non è altro che una raccolta strutturata di dati accessibili pubblicamente che le organizzazioni mettono a disposizione di chiunque per facilitare la loro diffusione e il loro utilizzo.

La città di Helsinki ha iniziato a sperimentare con i modelli 3D già dal

1980 mentre si stava decidendo come sviluppare un'area del centro. I primi edifici modellati in 3D furono l'edificio delle poste principale, l'hotel Sokos, il Museo Nazionale e infine la stazione ferroviaria. Dal 2002 è diventata prassi mostrare i nuovi piani urbanistici della città ai cittadini tramite questa modalità 3D.

Dal 2010, con l'avvento delle nuove tecnologie di modellazione urbana quali le tecnologie topografiche, la scansione laser, la fotografia aerea obliqua e i metodi di modellazione stessi, si è registrato un significativo miglioramento della qualità del DT e una maggior facilità nello sviluppo di questo. Inoltre la standardizzazione di sistemi come le interfacce dei servizi informativi e l'uso del modello di dati aperto CityGML ha promosso lo sviluppo della modellazione urbana avanzata durante questo decennio, apportando progressi significativi nel settore. Ad oggi il gemello digitale della città è in continua espansione ed evoluzione proprio come la città stessa [53] [54].

3.3.2 Lo standard CityGML

L'organizzazione principale per la standardizzazione geospaziale è l'Open Geospatial Consortium (OGC). Esso è un consorzio di oltre 500 aziende, agenzie governative, organizzazioni di ricerca e università che partecipano allo sviluppo di standard geospaziali disponibili al pubblico.

Lo standard principale sviluppato da OGC per i modelli 3D delle città è CityGML. Esso è basato sul "Geography Markup Language (GML)" che è un linguaggio di markup geografico sviluppato per la modellazione, il trasporto e l'archiviazione delle informazioni geografiche. GML è un'estensione del linguaggio di markup XML, specificamente progettato per gestire dati complessi legati alla geografia.

CityGML rappresenta gli oggetti del mondo fisico con quattro aspetti: semantica, geometria, topologia e apparenza. Ogni oggetto può essere rappresentato fino a cinque livelli di dettaglio. Lo standard è diviso in moduli che forniscono supporto per la rappresentazione degli edifici, l'uso del suolo, l'arredo urbano e così via. I moduli sono estensibili senza dover rilasciare

una nuova versione del modello, questa peculiarità è stata fondamentale per la misura delle emissioni solari, le simulazioni di emissioni acustiche o i test per calcolare l'effetto delle inondazioni. Per quanto riguarda l'aspetto esterno dell'oggetto, CityGML fornisce molte opzioni. Esso è fondamentale per il coinvolgimento dei cittadini e sarà importante renderlo maggiormente dettagliato considerando il sempre più frequente uso della Realtà Aumentata e della Realtà Virtuale [53].

3.3.3 Atlante Climatico Regionale

Durante il progetto mySMARTLife Helsinki ha reso pubblici dataset relativi all'energia nel modello 3D della città. L'obiettivo era quello di incrementare la conoscenza e la consapevolezza dei cittadini della possibilità di aumentare l'efficienza energetica e la produzione di energie rinnovabili, in particolare nelle fasi di ristrutturazione di un immobile in modo da raggiungere gli ambiziosi obiettivi climatici di Helsinki. Secondo i ricercatori rendere i dati energetici accessibili porta numerosi benefici motivando gli stakeholder a intervenire.

Infatti, con il rilascio pubblico del dataset, nel 2018, è stato sviluppato uno strumento di visualizzazione della perdita di calore degli edifici e quindi, in conseguenza, "L'atlante Climatico Regionale", un servizio del modello 3D che contiene informazioni sulle energie rinnovabili e sulle possibilità di miglioramento energetiche in tutta la regione di Helsinki.

Il servizio di visualizzazione, come è possibile vedere in figura 3.4, è una mappa di calore che misura la radiazione termica di superficie di ogni tetto degli edifici grazie a una termocamera. È presente inoltre una legenda che spiega i colori visualizzati in termini di qualità dell'isolamento del tetto. Il servizio può essere usato sia dai proprietari degli immobili sia dalle aziende che pianificano ristrutturazioni. Questo significa che lo strumento è una risorsa utile per chi ha interesse a migliorare l'efficienza energetica degli edifici, permettendo di avere accesso a dati fondamentali che possono influenzare le decisioni su dove e come intervenire per ottimizzare l'isolamento termico.



Figura 3.4: Modello dell'energia solare di Helsinki 3D+ [53]

Oltre a questa mappa l'Atlante contiene una grande quantità di informazioni specifiche per ciascun edificio, dati relativi all'energia e alla ristrutturazione, nonché informazioni sul consumo di acqua, teleriscaldamento ed elettricità. Nell'Atlante è possibile visualizzare una stima indicativa del consumo energetico per quasi ogni edificio di Helsinki. Il modello include anche calcoli relativi all'energia solare per tutte le superfici di tetti e pareti degli edifici, quindi informazioni sulla quantità di energia da radiazione solare che le superfici ricevono annualmente e mensilmente [53] [54].

3.3.4 Open Data

Il caso di studio della città di Helsinki è particolarmente significativo per il rilievo che pone all'uso aperto dei dati.

Come citato da Ruohomäki et al. [53] la chiave per un uso di successo degli open data è creare una cultura cittadina nella quale si adotti un approccio basato sulla trasparenza e sulla condivisione dei dati come parte integrante delle attività e delle decisioni della città. I dati aperti sono disponibili gratuitamente per chiunque ne voglia usufruire, devono avere una licenza che permetta il loro riutilizzo e, soprattutto, devono essere compren-

sibili al momento della pubblicazione, altrimenti si rischia di limitarne l'uso involontariamente.

Per capire la qualità di un dato pubblicato è possibile usare il modello a 5 stelle di Tim Berners-Lee illustrato in figura 3.5. I dati sotto la prima categoria hanno una licenza aperta ma non sono in formato aperto, quindi non sono elaborabili dall'utente (PDF). Nella seconda categoria, invece, i dati devono essere in formato strutturato. Le tre stelle richiedono che il dato sia non proprietario (ad esempio CSV invece di Excel). I dati nella quarta categoria devono essere dotati di un'URI mentre per le 5 stelle i dati devono anche essere collegati ad altri dataset [53] [55].

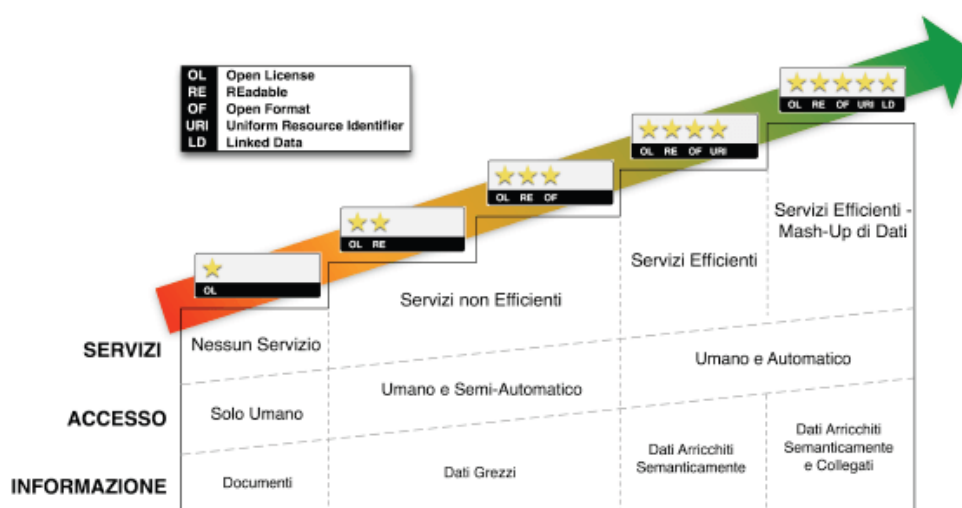


Figura 3.5: Il modello a 5 stelle di Tim Berners-Lee [55]

Parallelamente a queste considerazioni tecniche, il Ministero dei Trasporti e delle Comunicazioni della Finlandia ha pubblicato un paper che introduce una modalità operativa basata su principi centrati sull'uomo per la gestione e il trattamento dei dati personali [56]. Questo modello ha come obiettivo quello di promuovere trasparenza e proprietà dei dati personali, in linea con

i requisiti del GDPR, ma con un approccio che pone l'individuo al centro. Questo modello si basa su tre principi fondamentali:

1. **Controllo e privacy a misura di individuo:** Ogni persona deve avere il pieno controllo dei propri dati personali, decidendo chi può accedervi, come possono essere utilizzati e per quale scopo.
2. **Dati usabili:** I dati devono essere comprensibili, analizzabili e utilizzabili in modo efficace da chi ne ha bisogno. Questo implica che essi siano strutturati, accessibili e garantiscano interoperabilità.
3. **Ambiente di business aperto:** L'ambiente di business deve essere trasparente e collaborativo riducendo le barriere d'accesso ai dati per le piccole e medie imprese.

Questo modello supporta l'approccio delle smart city nella raccolta e gestione dei dati, dove i cittadini sono considerati attori consapevoli e partner nella co-creazione, invece che semplici destinatari passivi. Questo principio di gestione dei dati dovrebbe costituire una colonna portante delle piattaforme di dati urbani per garantire un loro sviluppo di successo [53].

3.4 Progetto DUET: una nuova architettura per i dati

3.4.1 Introduzione al progetto

DUET (Digital Urban European Twins) è un'iniziativa europea di innovazione che sfrutta le funzionalità avanzate del cloud, dei dati dei sensori e dell'analisi sotto forma di gemelli digitali. In questo modo è possibile aiutare il processo decisionale del settore pubblico a diventare più democratico ed efficace. DUET è sviluppato e testato in tre città e regioni differenti: Le Fiandre (Belgio), Pilsen (Cechia) e Atene (Grecia).

Il percorso verso l'adozione del Digital Twin nasce in modo differente per ognuno dei tre trial: Le Fiandre sono partite dalla loro infrastruttura di dati spaziali e da un primo prototipo di Digital Twin, Pilsen da un'ampia gamma di set di dati e di strumenti di modellazione del traffico, ma non da una soluzione integrata, infine Atene, che era nelle prime fasi della sua trasformazione digitale, partiva da zero. Tuttavia, ciò che ha unito i tre è la convinzione che la tecnologia dei gemelli digitali sia fondamentale per un'efficace elaborazione delle politiche future.

L'obiettivo di DUET è quello di responsabilizzare i cittadini, migliorare la capacità di previsione e simulazione degli scenari, rafforzare il coordinamento durante le emergenze, ottimizzare le prestazioni aziendali e ridurre il traffico e le emissioni di carbonio. Il progetto fornisce una soluzione conveniente che le città possono adattare in base alle loro necessità e al loro contesto cittadino.

Grazie all'interfaccia semplice e condivisa DUET permette ai policy maker di creare soluzioni innovative per rispondere alle sfide urbane. Inoltre, nonostante la soluzione DUET sia progettata principalmente per città e pubbliche amministrazioni, essa può essere utilizzata da altri settori. L'architettura di base è costruita tenendo a mente l'interoperabilità. In quanto tale, la tecnologia DUET può supportare il processo decisionale durante un evento sportivo, in una fabbrica, nella sala di controllo di un porto e così via. Gli utenti possono caricare qualsiasi modello purché rispetti i requisiti di struttura del sistema, dopodiché potranno eseguire simulazioni, analizzare dati, visualizzare approfondimenti e tanto altro.

È importante sottolineare come DUET rappresenti un tentativo di colmare la carenza di standard per la costruzione dei Digital Twin nella letteratura, attraverso l'implementazione di un'architettura specifica chiamata T-Cell. Questo framework garantisce interoperabilità e facilita il flusso di informazioni da diverse fonti di dati statici, storici, aperti e in tempo reale, traducendole in output e approfondimenti facilmente digeribili per i decisori delle smart city [57] [58].

3.4.2 Architettura T-Cell

Il framework T-Cell mostrato in figura 3.6 si basa su un'entità centrale, che funge anche da data broker, per integrare diversi modelli di dati tramite interfacce di programmazione delle applicazioni (API).

All'interno di questo sistema diverse fonti di dati alimentano continuamente il DT Buffer, un componente centrale che si pone come intermediario gestendo i flussi di dati in entrata prima di altre elaborazioni. Questi dati possono variare da specifici set geografici a una vasta gamma di altri dati rilevanti, tutti organizzati tramite il Data Catalog. Questo catalogo funge da biblioteca di tutti i dati disponibili, facilitandone l'accesso e l'utilizzo.

Parallelamente, il Knowledge Graph all'interno del sistema struttura e connette i dati in modo semantico, permettendo così interazioni complesse e una più profonda comprensione delle informazioni. Questo grafo di conoscenza è fondamentale per integrare e interpretare le relazioni tra i diversi elementi dei dati.

Infine, le API del sistema collegano questi dati ai vari modelli di simulazione. Essi sono accessibili e gestibili attraverso un'architettura distribuita che include i Docker container, facilitando così la scalabilità e la gestione efficiente delle risorse computazionali [57] [58] [59].

3.4.2.1 Flusso dei dati

La comunicazione nel Digital Twin è ben strutturata e coordinata tramite il meccanismo presente in figura 3.7, il quale mostra il flusso di dati ad alto livello. Ogni modifica indotta da un utente (o da un modello) viene riflessa nel "context database" da parte di un sistema chiamato "Interaction Service". Questo servizio mette a disposizione un'API con la quale il client interagisce attivamente tramite una richiesta HTTP e permette di comunicare agli altri componenti del Digital Twin qualsiasi cambiamento apportato. In questo modo, dopo una modifica degli attributi stradali, può essere avviata l'esecuzione di un modello, sia manualmente che automaticamente, che prende in

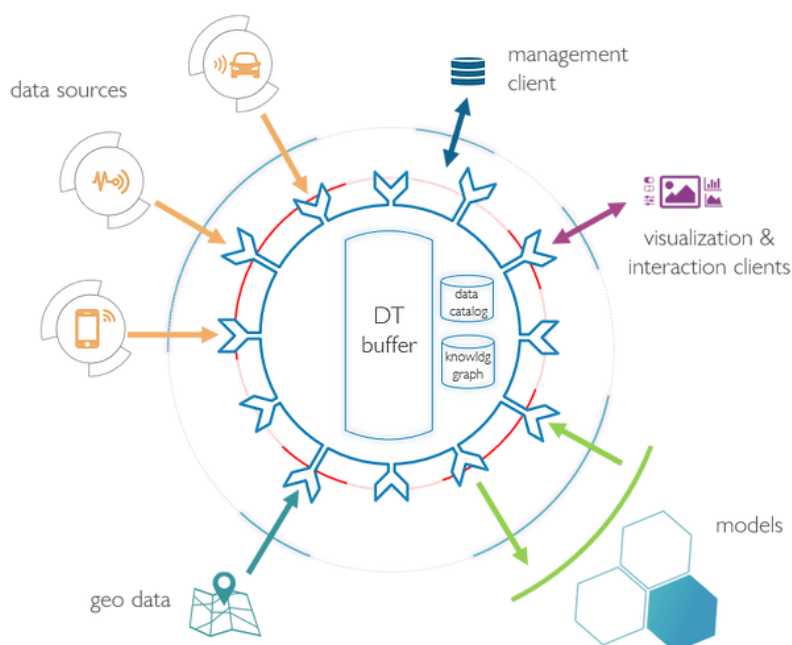


Figura 3.6: Architettura T-Cell [57]

considerazione il nuovo stato e può evidenziare l'impatto del cambiamento. Nel caso di una strada chiusa, per esempio, potrebbe deviare il traffico e causare congestione altrove.

3.4.3 Modelli usati

In risposta alle necessità delle città e delle regioni coinvolte, i casi d'uso dei Digital Twin del progetto DUET si focalizzano su aspetti quali traffico, ambiente e benessere, quest'ultimo valutato tramite l'impatto dell'inquinamento acustico.

Atene è un'area metropolitana che soffre di congestione e grandi ondate di afflussi turistici. L'attuale sfida per Atene è quella di creare un pool interattivo di dati sulla città che sarà aggiornato dinamicamente, aperto, robusto e utilizzabile per migliorare l'attrattiva della capitale per i locali e i visitatori. Atene ha quindi bisogno di un Digital Twin integrato con la

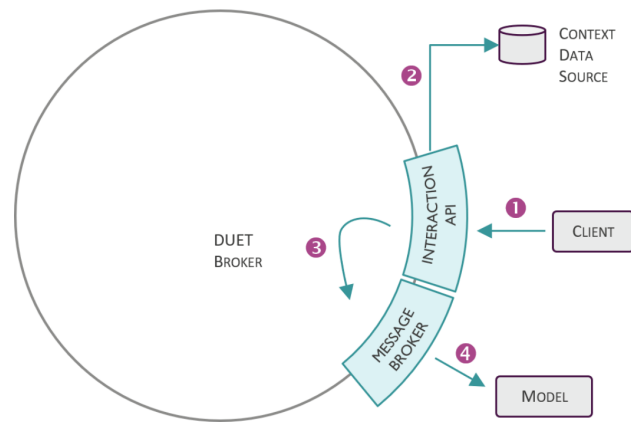


Figura 3.7: Flusso dei dati nel sistema DUET [60]

capacità di unire tutti i dati della città e renderli facilmente accessibili e utili per gestire il traffico e l'inquinamento atmosferico.

Pilsen è una città di medie dimensioni nella parte occidentale della Repubblica Ceca. Un hub per pendolari, vendita al dettaglio, intrattenimento e turismo, Pilsen sta affrontando molte sfide in termini di pianificazione dei trasporti e sviluppo urbano. La città usa sia fonti di dati tradizionali che nuove (ad esempio, dati di crowdsourcing da telefoni cellulari) per alimentare il suo gemello digitale.

Le Fiandre, infine, sono una regione urbanizzata e densamente popolata con una rete stradale molto trafficata. Il minimo problema o il più piccolo incidente durante l'ora di punta possono innescare lunghe code. Infatti per questo motivo la regione è particolarmente vittima dell'inquinamento atmosferico.

L'obiettivo finale del progetto DUET è apportare un cambiamento che protegga l'ambiente e riduca gli impatti negativi sulla salute umana. Grazie ai modelli di traffico, qualità dell'aria e inquinamento acustico, i trial DUET possono esplorare, tramite l'interfaccia 3D, una gamma di scenari ipotetici. Ad esempio, abbassare o aumentare il limite di velocità su una determinata strada oppure rendere una strada completamente priva di macchine potrebbe

migliorare i livelli di rumore e la qualità dell'aria. In ogni caso, è fondamentale considerare anche come queste modifiche potrebbero influenzare le aree adiacenti.

In questa sottosezione, quindi, si parlerà dei tre modelli usati nel progetto delineandone le loro caratteristiche [57].

3.4.3.1 Modello del traffico

DUET sperimenta con tre modelli di traffico: statico, dinamico e di mobilità locale. Con i primi due è possibile simulare reti stradali alternative grazie alla panoramica che ci forniscono sui flussi di traffico [57].

Il modello statico assume condizioni di flusso costante e uniforme dove ogni conducente conosce il sistema e le sue alternative, e sceglie il percorso che minimizza il proprio tempo di viaggio. Proprio per questo motivo rappresenta una situazione ideale, e non riesce a gestire bene le fluttuazioni di traffico a breve termine o le risposte dinamiche a eventi specifici, ma è utile per gli scenari a lungo termine come la pianificazione delle politiche di trasporto.

Il modello dinamico, come mostrato in figura 3.8, è più flessibile e realistico perché considera le variazioni di flusso e densità del traffico nel tempo. Infatti è in grado di modellare la formazione e la risoluzione delle code, l'impatto degli incidenti stradali e altre perturbazioni temporanee.

Il modello di mobilità locale, d'altra parte, utilizza diverse fonti di dati in tempo reale per catturare meglio la multimodalità del traffico cittadino. Esso aggrega i dati di segnalazione, i dati di scansione wifi, quelli derivanti dal riconoscimento automatico delle targhe, i "floating car data" (collezione di dati geolocalizzati, velocità, direzione di viaggio e informazioni temporali provenienti da telefoni cellulari all'interno dei veicoli guidati) e i dati di citizen science. Inoltre, il modello è in grado di stimare la densità del traffico per tipologia di traffico (ad esempio, motorizzato, pedonale). Tale output può essere utile per molte parti interessate; i servizi di emergenza necessitano di visualizzazioni in tempo reale sui flussi multimodali; le campagne di vendita al dettaglio e i prezzi degli affitti dipendono dai flussi pedonali; i professionisti

Figura 3.8: Modello del traffico ¹

della sanità pubblica, infine, utilizzano spesso questi dati per l'inquinamento dell'aria e quello acustico [57].

3.4.3.2 Modello della qualità dell'aria

La qualità dell'aria nelle città è determinata principalmente da dalle emissioni di inquinanti atmosferici da parte dei veicoli del traffico stradale. Tre componenti che vengono solitamente quantificate per indicare la qualità dell'aria locale sono il particolato (PM10), il particolato ultrafine (PM2.5) e il biossido di azoto (NO2). Nell'Unione Europea i valori limite sono fissati per le concentrazioni medie annuali così come quelle mensili e giornaliere.

Il modello della qualità dell'aria di DUET usa sia dati di emissione statici sia dati di traffico dinamici per calcolare le concentrazioni di inquinanti. Questi dati derivano dal modello di traffico, che riflette la quantità e il tipo di veicoli presenti su una determinata rete stradale.

L'API del modello della qualità dell'aria riceve in input i dati calcolati dal modello del traffico tramite un'interfaccia strutturata, generando una previsione. Il payload in formato JSON, mostrato in figura 3.9, rappresenta l'output del modello. Esso è definito da alcuni campi di cui se ne delineano

¹<https://platform.citytwin.eu/app/map?caseId=373>

```

{
  "topic": "air-calculation-result-1-pilsen",
  "clientId": "air-tno",
  "payload": {
    "url": "http://vps17642.public.cloudvps.com:8081/data/air-calculation-result-1-pilsen"
  },
  "data": {
    "type": "FeatureCollection",
    "features": [
      {
        "type": "Feature",
        "geometry": {
          "type": "Point",
          "coordinates": [13.41168405784886, 49.7721183108128]
        },
        "properties": {
          "C_NO2": 20.3794327
        }
      },
      {
        "type": "Feature",
        "geometry": {
          "type": "Point",
          "coordinates": [13.390445548912535, 49.729302642721855]
        },
        "properties": {
          "C_NO2": 26.225502
        }
      }
    ]
  }
}

```

Figura 3.9: Payload del modello della qualità dell'aria [60]

i più importanti. Il campo "topic" rappresenta il contenuto del messaggio, che in questo caso è il risultato del calcolo della qualità dell'aria di Pilsen. Il campo "data" contiene i dati effettivi inviati nel payload, strutturati secondo lo standard GeoJSON. Al suo interno è presente un array di "features", ognuna di esse rappresenta le coordinate del punto di rilevamento, il tipo e la quantità di inquinante espresse in microgrammi per metro cubo [60].

3.4.3.3 Modello dell'inquinamento acustico

Il rumore ambientale è causato dall'attività industriale e dal traffico. Per modellizzarlo sono state usate le librerie open source NoiseModelling e Urban Strategy Noise Module. Quest'ultima prende in input tre sorgenti di dati differenti: il traffico stradale, il traffico ferroviario e le industrie, in modo da poter generare una mappa del rumore (3.10). Questi dati sono facilmente accessibili nel gemello digitale in modo che le autorità locali possano utilizzarli per valutare l'esposizione della popolazione alle attività che generano

rumore [61].

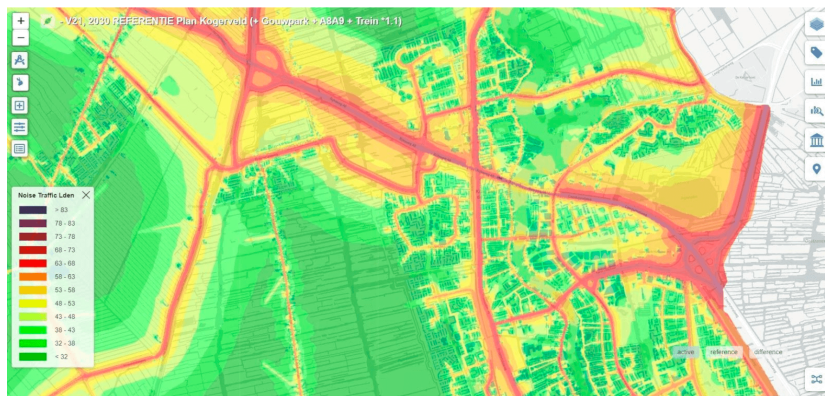


Figura 3.10: Mappa dell'inquinamento acustico stradale [61]

Conclusioni

Questa tesi ha esplorato il ruolo di Digital Twin e Citizen Engagement nella sostenibilità ambientale, evidenziando come queste tecnologie rappresentino un'opportunità unica per affrontare le sfide legate all'ambiente. I risultati ottenuti dimostrano che l'uso combinato di queste strategie può migliorare significativamente la qualità delle decisioni, favorendo un'integrazione tra innovazione tecnologica e coinvolgimento sociale.

Il gemello digitale, come ogni tecnologia promettente, deve affrontare numerosi ostacoli nella sua transizione dalla teoria alla pratica. Questi ostacoli, come menzionato nella sottosezione 2.4, includono la necessità di maggiore implementazione pratica, protocolli standardizzati, maggiore trasparenza nelle decisioni e infine indistinguibilità con la parte fisica. Per questo motivo, le applicazioni del DT in ambito ambientale sono ancora agli albori.

Il Citizen Engagement invece, rappresenta un mezzo fondamentale per l'adattabilità e la resilienza. La partecipazione attiva dei cittadini nel processo di sviluppo dei Digital Twin garantisce che le tecnologie rispondano realmente ai bisogni e alle aspettative della comunità. Questo rapporto sinergico fra tecnologia e partecipazione dei cittadini è di vitale importanza per assicurare che le innovazioni non solo avanzino in termini tecnici ma siano anche accettate e valorizzate dalla popolazione. D'altra parte, l'integrazione delle dinamiche della comunità sociale nel DT è un ambito ancora emergente che necessita di ulteriori sviluppi.

In particolare, nell'ambito delle Smart City, la sfida più importante è sempre stata quella di trovare un framework condiviso per facilitare l'integrazione.

razione fra gli stakeholder. Per questo motivo, sarà sempre più importante un rapporto collaborativo fra persone con background lavorativo differente, in modo da creare un ambiente interdisciplinare volto al superamento delle barriere terminologiche, metodologiche e di tradizione di ricerca.

Grazie a una cooperazione così intensa, sarà possibile non solo rispondere in modo valido alle esigenze attuali delle città, ma anche prevedere e gestire le sfide future, orientando lo sviluppo urbano verso una sostenibilità a lungo termine che tenga conto tanto delle esigenze tecnologiche quanto di quelle sociali.

Bibliografia

- [1] IdeaScale. What is citizen engagement?, May 2020. URL <https://ideascale.com/blog/what-is-citizen-engagement/>.
- [2] World Bank Group. Citizen engagement: History and definitions, 2017. URL https://courses.edx.org/asset-v1:WBGx+CE01x+1T2017+type@asset+block@Week_1_Video_1.pdf.
- [3] Delib. Citizen engagement vs participation: What's the difference?, 2023. URL <https://newsroom.delib.net/citizen-engagement-vs-participation-difference/>.
- [4] Mark S. Reed. Stakeholder participation for environmental management: A literature review. *Biological Conservation*, 141(10):2417–2431, 2008. ISSN 0006-3207. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.07.014>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006320708002693>.
- [5] Paulo Savaget, Martin Geissdoerfer, Ali Kharrazi, and Steve Evans. The theoretical foundations of sociotechnical systems change for sustainability: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 206:878–892, 2019. ISSN 0959-6526. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.208>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261832941X>.
- [6] Bianca Bănică, Lia Patrício, and Vera Miguéis. Citizen engagement with sustainable energy solutions - understanding the influence of per-

- ceived value on engagement behaviors. *Energy Policy*, 184:113895, 2024. ISSN 0301-4215. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113895>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421523004809>.
- [7] Oxford English Dictionary. Definition of citizen science, 2024. URL https://www.oed.com/dictionary/citizen-science_n?tl=true. Accessed October 14, 2024.
- [8] Rick Bonney, Tina B. Phillips, Heidi L. Ballard, and Jody W. Enck. Can citizen science enhance public understanding of science? *Public Understanding of Science*, 25(1):2–16, 2016.
- [9] EcoChallenge. Ecochallenge platform, 2023. URL <https://ecochallenge.org>.
- [10] Emily G. Snyder, Timothy H. Watkins, Paul A. Solomon, Eben D. Thoma, Ronald W. Williams, Gayle S. W. Hagler, David Shelow, David A. Hindin, Vasu J. Kilaru, and Peter W. Preuss. The changing paradigm of air pollution monitoring. *Environmental Science & Technology*, 47(20):11369–11377, 2013. doi: 10.1021/es4022602. URL <https://doi.org/10.1021/es4022602>. PMID: 23980922.
- [11] MAtchUP Project. Citizens engagement, 2023. URL <https://www.matchup-project.eu/solutions/citizens-engagement/>.
- [12] Wietse van Ransbeeck. 4 emerging tech trends in citizen engagement, 2023. URL <https://www.linkedin.com/pulse/4-emerging-tech-trends-citizen-engagement-wietse-van-ransbeeck>. Accessed on October 14, 2024.
- [13] Wikipedia contributors. Gamification, 2023. URL <https://it.wikipedia.org/wiki/Gamification>. Wikipedia, l’enciclopedia libera.
- [14] Smartico. Ethical considerations in gamification, 2023. URL <https://smartico.ai/ethical-considerations-in-gamification/>.

- [15] Juho Hamari, Jonna Koivisto, and Harri Sarsa. Does gamification work? — a literature review of empirical studies on gamification. 01 2014. doi: 10.1109/HICSS.2014.377.
- [16] Carolina Novo, Chiara Zanchetta, Elisa Goldmann, and Carlos Vaz de Carvalho. The use of gamification and web-based apps for sustainability education. *Sustainability*, 16(8), 2024. ISSN 2071-1050. doi: 10.3390/su16083197. URL <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/8/3197>.
- [17] Tania Ouariachi, Chih-Yen Li, and Wim J. L. Elving. Gamification approaches for education and engagement on pro-environmental behaviors: Searching for best practices. *Sustainability*, 12(11), 2020. ISSN 2071-1050. doi: 10.3390/su12114565. URL <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/11/4565>.
- [18] Hunt Allcott. Social norms and energy conservation. *Journal of Public Economics*, 95(9):1082–1095, 2011. ISSN 0047-2727. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2011.03.003>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0047272711000478>.
Special Issue: The Role of Firms in Tax Systems.
- [19] Jon Froehlich, Tawanna Dillahunt, Predrag Klasnja, Jennifer Mankoff, Sunny Consolvo, Beverly Harrison, and James Landay. Ubigreen: Investigating a mobile tool for tracking and supporting green transportation habits. pages 1043–1052, 10 2009. doi: 10.1145/1518701.1518861.
- [20] M.V. Eitzel, Jessica Oliver, Chris Santos-Lang, Ruth Duerr, Arika Virapongse, Sarah West, Christopher Kyba, Anne Bowser, Beth Cooper, Andrea Sforzi, Anya Metcalfe, Edward Harris, Martin Thiel, Muki Haklay, Lesandro Ponciano, Joseph Roche, Luigi Ceccaroni, Fraser Shilling, Daniel Dörler, and Qijun Jiang. Correction: Citizen science terminology matters: Exploring key terms. *Citizen Science: Theory and Practice*, 2, 06 2017. doi: 10.5334/cstp.113.

-
- [21] Muki Haklay. *Citizen Science and Volunteered Geographic Information: Overview and Typology of Participation*, pages 105–122. 01 2013. ISBN 978-94-007-4586-5. doi: 10.1007/978-94-007-4587-2_7.
- [22] European Citizen Science Association (ECSA). 10 principles of citizen science, 2023. URL <https://ecsa.ngo/documents/>.
- [23] Hauke Riesch and Clive Potter. Citizen science as seen by scientists: Methodological, epistemological and ethical dimensions. *Public Understanding of Science*, 23, 08 2013. doi: 10.1177/0963662513497324.
- [24] Rick Bonney, Jennifer Shirk, Tina Phillips, Andrea Wiggins, Heidi Ballard, Abraham Miller-Rushing, and Julia Parrish. Next steps for citizen science. *Science*, 343:1436–7, 03 2014. doi: 10.1126/science.1251554.
- [25] Janis L Dickinson, Jennifer Shirk, David Bonter, Rick Bonney, Rhianon L Crain, Jason Martin, Tina Phillips, and Karen Purcell. The current state of citizen science as a tool for ecological research and public engagement. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10(6): 291–297, 2012. doi: <https://doi.org/10.1890/110236>. URL <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/110236>.
- [26] John Krumm, editor. *Ubiquitous Computing Fundamentals*. Chapman and Hall/CRC, 1 edition, 2009. ISBN 978-1420093605.
- [27] Silvia Liberata Ullo and G. R. Sinha. Advances in smart environment monitoring systems using iot and sensors. *Sensors*, 20(11), 2020. ISSN 1424-8220. doi: 10.3390/s20113113. URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/11/3113>.
- [28] Steffen Schaal and Armin Lude. Using mobile devices in environmental education and education for sustainable development—comparing theory and practice in a nation wide survey. *Sustainability*, 7:10153–10170, 07 2015. doi: 10.3390/su70810153.

- [29] Markus Ruchter, Bernhard Klar, and Werner Geiger. Comparing the effects of mobile computers and traditional approaches in environmental education. *Computers Education*, 54(4):1054–1067, 2010. ISSN 0360-1315. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2009.10.010>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360131509002954>.
- [30] Carrie Seltzer. Making biodiversity data social, shareable, and scalable: Reflections on inaturalist citizen science. *Biodiversity Information Science and Standards*, 3, 09 2019. doi: 10.3897/biss.3.46670.
- [31] Brian L. Sullivan, Jocelyn L. Aycrigg, Jessie H. Barry, Rick E. Bonney, Nicholas Bruns, Caren B. Cooper, Theo Damoulas, André A. Dhondt, Tom Dietterich, Andrew Farnsworth, Daniel Fink, John W. Fitzpatrick, Thomas Fredericks, Jeff Gerbracht, Carla Gomes, Wesley M. Hochachka, Marshall J. Iliff, Carl Lagoze, Frank A. La Sorte, Matthew Merrifield, Will Morris, Tina B. Phillips, Mark Reynolds, Amanda D. Rodewald, Kenneth V. Rosenberg, Nancy M. Trautmann, Andrea Wiggins, David W. Winkler, Weng-Keen Wong, Christopher L. Wood, Jun Yu, and Steve Kelling. The ebird enterprise: An integrated approach to development and application of citizen science. *Biological Conservation*, 169:31–40, 2014. ISSN 0006-3207. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.11.003>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006320713003820>.
- [32] Mohsen Attaran and Bilge Gokhan Celik. Digital twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal*, 6:100165, 2023. ISSN 2772-6622. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277266222300005X>.
- [33] David Jones, Chris Snider, Aydin Nassehi, Jason Yon, and Ben Hicks. Characterising the digital twin: A systematic literature re-

- view. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29:36–52, 2020. ISSN 1755-5817. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581720300110>.
- [34] Edward Glaessgen and David Stargel. *The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles*. doi: 10.2514/6.2012-1818. URL <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2012-1818>.
- [35] Calin Boje, Annie Guerriero, Sylvain Kubicki, and Yacine Rezgui. Towards a semantic construction digital twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, 114:103179, 06 2020. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103179.
- [36] Yuqian Lu, Chao Liu, Kevin Wang, Huiyue Huang, and Xun Xu. Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 08 2019. doi: 10.1016/j.rcim.2019.101837.
- [37] Slim Zekri, Nafaâ Jabeur, and Hana Gharrad. Smart water management using intelligent digital twins. *Computing and Informatics*, 41:135–153, 04 2022. doi: 10.31577/cai_2022_1_135.
- [38] Jörn Hoffmann, Peter Bauer, Irina Sandu, Nils Wedi, Thomas Geenen, and Daniel Thiemert. Destination earth – a digital twin in support of climate services. *Climate Services*, 30:100394, 2023. ISSN 2405-8807. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100394>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405880723000559>.
- [39] Digital twins: First strides into the industrial metaverse, 2023. URL <https://www.siemens.com/global/en/company/digital-transformation/industrial-metaverse/digital-twins-first-strides-into-the-industrial-metaverse.html>.

- [40] Qinglin Qi and Fei Tao. Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. *IEEE Access*, 6: 3585–3593, 01 2018. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2793265.
- [41] Michael Batty. Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45(5):817–820, 2018. doi: 10.1177/2399808318796416. URL <https://doi.org/10.1177/2399808318796416>.
- [42] Dechen Peldon, Saeed Banihashemi, Khuong LeNguyen, and Sybil Derrible. Navigating urban complexity: The transformative role of digital twins in smart city development. *Sustainable Cities and Society*, 111: 105583, 2024. ISSN 2210-6707. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105583>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670724004086>.
- [43] Li Chen, Xiaofang Li, and Jiulong Zhu. Carbon peak control for achieving net-zero renewable-based smart cities: Digital twin modeling and simulation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 65:103792, 2024. ISSN 2213-1388. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103792>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138824001887>.
- [44] Bin He and Kai-Jian Bai. Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review. *Advanced Manufacturing*, 9(1):1–21, 2020. doi: 10.1007/s40436-020-00302-5. URL <https://link.springer.com/article/10.1007/s40436-020-00302-5>.
- [45] Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE. Manufacturing guidelines, 2023. URL <https://www.dke.de/resource/blob/929020/7080b1667308545c088901b39a111756/manufacturing-guidelines-data.pdf>. Accessed: 2023-10-28.

- [46] Chiara Franciosi, Salvatore Miranda, Ciele Resende Veneroso, and Stefano Riemma. Improving industrial sustainability by the use of digital twin models in maintenance and production activities. *IFAC-PapersOnLine*, 55(19):37–42, 2022. ISSN 2405-8963. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.215>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896322014343>. 5th IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Services and Technologies AMEST 2022.
- [47] Miguel Angel Bermeo-Ayerbe, Carlos Ocampo-Martinez, and Javier Diaz-Rozo. Data-driven energy prediction modeling for both energy efficiency and maintenance in smart manufacturing systems. *Energy*, 238:121691, 2022. ISSN 0360-5442. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121691>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544221019393>.
- [48] Y.C. Liang, X. Lu, W.D. Li, and S. Wang. Cyber physical system and big data enabled energy efficient machining optimisation. *Journal of Cleaner Production*, 187:46–62, 2018. ISSN 0959-6526. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.149>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618308163>.
- [49] Jing Zou, Qing Chang, Jorge Arinez, and Guoxian Xiao. Data-driven modeling and real-time distributed control for energy efficient manufacturing systems. *Energy*, 127:247–257, 2017. ISSN 0360-5442. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.123>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217305157>.
- [50] T R Sreedevi and M.B Santosh Kumar. Digital twin in smart farming: A categorical literature review and exploring possibilities in hydroponics. In *2020 Advanced Computing and Communication Technologies for High Performance Applications (ACCTHPA)*, pages 120–124, 2020. doi: 10.1109/ACCTHPA49271.2020.9213235.

- [51] Adil Rasheed, Omer San, and Trond Kvamsdal. Digital twin: Values, challenges and enablers. 10 2019. doi: 10.48550/arXiv.1910.01719.
- [52] Fabian Dembski, Uwe Wössner, Mike Letzgus, Michael Ruddat, and Claudia Yamu. Urban digital twins for smart cities and citizens: The case study of herrenberg, germany. *Sustainability*, 12(6), 2020. ISSN 2071-1050. doi: 10.3390/su12062307. URL <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/6/2307>.
- [53] Timo Ruohomäki, Outi Kesäniemi, Enni Airaksinen, Mikko Martikka, Petteri Huuska, and Jarmo Suomisto. Smart city platform enabling digital twin. 09 2018. doi: 10.1109/IS.2018.8710517.
- [54] City of Helsinki. Helsinki 3d, 2024. URL <https://www.hel.fi/en/decision-making/information-on-helsinki/maps-and-geospatial-data/helsinki-3d>. Accessed: 2024-11-14.
- [55] Regione Veneto. Modello 5 stars, 2024. URL <https://dati.veneto.it/content/modello-5-stars>. Accessed: 2024-11-15.
- [56] Ministry of Transport and Communications. Mydata - a nordic model for human-centered personal data management and processing, 2024. URL <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/78439/MyData-nordic-model.pdf>. Accessed: 2024-11-25.
- [57] Lieven Raes, Philippe Michiels, Thomas Adolphi, Chris Tampère, Athanasios Dalianis, Susie Mcaleer, and Pavel Kogut. Duet: A framework for building secure and trusted digital twins of smart cities. *IEEE Internet Computing*, PP:1–1, 02 2021. doi: 10.1109/MIC.2021.3060962.
- [58] About digital urban twins, 2024. URL <https://www.digitalurbantwins.com/about-1>. Accessed: 2024-11-17.

- [59] Athanasios Dalianis, Marina Klitsi, et al. D5.1 system architecture & implementation plan. <http://www.digitalurbantwins.eu>, 11 2020. Accessed: 2024-11-18.
- [60] Simulation models, 2024. URL https://www.digitalurbantwins.com/_files/ugd/725ca8_d8fa98dfefa646d7969ef6fc6460ed43.pdf. Accessed: 2024-11-17.
- [61] D3.3 smart city domains, models and interaction frameworks v1, 2024. URL https://drive.google.com/file/d/10_PPd68s8f6gMW0Qx0b6wopQ2-0mSjgs/view?usp=sharing. Accessed: 2024-11-17.
- [62] Latex.

Ringraziamenti

Desidero esprimere la mia più sincera gratitudine alla Prof.ssa Catia Prandi, la mia relatrice, per la sua guida preziosa, la disponibilità costante e l'incoraggiamento durante tutto il percorso di questa tesi. La sua professionalità e il suo entusiasmo per la ricerca sono stati per me fonte di grande ispirazione.

Un ringraziamento speciale va anche ai correlatori Gianni Tumedei e Giacomo Mantani, per il loro prezioso supporto. Il loro contributo è stato fondamentale per la realizzazione di questo lavoro. Grazie a tutti voi per aver reso questa esperienza unica e arricchente.

