

**ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA,
AMBIENTALE E DEI MATERIALI**

LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

in

LABORATORIO DI INFRASTRUTTURE VIARIE E TRASPORTI

**APPLICAZIONE DEL CONCETTO DI SUPERBLOCK ALLA
CITTÀ DI BOLOGNA: ANALISI DELL'IMPATTO SUL
TRASPORTO PUBBLICO LOCALE**

CANDIDATO:

Sofia Palese

RELATORE:

Chiar.mo Prof. Joerg Schweizer

CORRELATORE:

Chiar.mo Prof. Federico Rupi

Dott. Ing. Ngoc An Nguyen

Anno Accademico 2022/2023

Sessione II

Indice

1. INTRODUZIONE.....	7
1.1. Introduzione al problema	7
1.2. Obiettivi dello studio	8
2. STATO DELL'ARTE.....	10
2.1. Micro-simulazione e Activity-Based Model	10
2.2. Modello di Superblock	12
2.2.1. Obiettivi e contesto.....	12
2.2.2. Sviluppo storico, applicazioni reali ed effetti positivi	14
2.2.3. Concetto teorico di Superblock	15
2.3. Introduzione al PRT	17
2.3.1. Definizione di PRT	17
2.3.2. Analisi della letteratura.....	19
3. METODOLOGIA.....	21
3.1. Software utilizzato: SUMOPy	21
3.2. Tipologie di dati utilizzate.....	23
3.2.1. Introduzione e definizione di big data	23
3.2.2. Matrice Origine-Destinazione.....	24
3.2.3. Tracce GPS	25
3.2.4. Dati GTFS.....	26
3.3. Criteri di identificazione dei superblocks	26
3.3.1. Aspetti introduttivi e valutazioni generali	26
3.3.2. Criteri considerati.....	27
3.4. Definizione degli scenari	29

4. CASO STUDIO	33
4.1. Definizione dell'area di studio	33
4.1.1. <i>Città di Bologna: descrizione e stato attuale</i>	<i>33</i>
4.1.2. <i>Dati impiegati.....</i>	<i>37</i>
4.1.3. <i>Trasporto Pubblico Locale.....</i>	<i>39</i>
4.1.4. <i>Quadro normativo attuale e obiettivi futuri</i>	<i>43</i>
4.2. Scenario Base	46
4.2.1. <i>Introduzione.....</i>	<i>46</i>
4.2.2. <i>Operazioni preliminari: editing della rete e conteggio parcheggi disponibili.....</i>	<i>48</i>
4.2.3. <i>Trasporto pubblico</i>	<i>50</i>
4.3. Scenario Superblock.....	52
4.3.1. <i>Introduzione.....</i>	<i>52</i>
4.3.2. <i>Individuazione dei superblocks e dei parcheggi centralizzati e creazione del servizio taxi</i>	<i>52</i>
4.3.3. <i>Individuazione delle nuove linee di trasporto pubblico</i>	<i>58</i>
4.3.4. <i>Creazione di una linea di trasporto pubblico su SUMOPy ...</i>	<i>60</i>
4.4. Scenario PRT	62
4.4.1. <i>Introduzione.....</i>	<i>62</i>
4.4.2. <i>Identificazione della rete PRT</i>	<i>63</i>
5. RISULTATI.....	66
5.1. Parametri analizzati	66
5.1.1. <i>Esportazione ed elaborazione</i>	<i>66</i>
5.1.2. <i>Parametri cinematici e trasportistici.....</i>	<i>67</i>
5.1.3. <i>Parametri ambientali.....</i>	<i>68</i>
5.2. Risultati Scenario Base.....	70
5.3. Risultati Scenario Superblock.....	77
5.4. Confronto: Scenario Base – Scenario Superblock	83

6. CONCLUSIONE.....91

7. FONTI: BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....94

1. INTRODUZIONE

1.1. Introduzione al problema

La domanda di trasporto di persone e merci nel mondo è in continua crescita ed evoluzione e conseguentemente le reti di trasporto nelle grandi città e metropoli risultano sempre più congestionate. Infatti, anche se la progressiva digitalizzazione coinvolge molteplici settori della vita umana, come lo sviluppo delle infrastrutture e delle città [1], l'aumento della popolazione mondiale evidenzia la necessità crescente di collegare una pianificazione intelligente e sostenibile ai settori logistici che gestiscono i trasporti [2]. Inoltre, la pianificazione urbana attuale, fortemente dipendente dall'automobile, ha comportato elevati livelli di inquinamento ambientale, stili di vita sedentari che incidono negativamente sulla salute psicofisica dei cittadini e maggiore vulnerabilità agli effetti del cambiamento climatico [3].

L'esigenza di una pianificazione urbana intelligente e sostenibile è ulteriormente sottolineata da due aspetti cruciali della mobilità, fonti di impatti gravi e irreversibili sul genere umano: emissioni inquinanti e incidentalità. In particolare, il settore trasportistico è uno dei più impattanti dal punto di vista ambientale in termini di utilizzo del suolo, emissioni di gas serra, inquinamento ed effetti tossici sull'ecosistema [4]. Specialmente in ambito urbano, nei punti critici della rete, avvengono numerosi fenomeni di stop-and-go che determinano un moto caratterizzato da continue accelerazioni e decelerazioni, causando un significativo aumento delle emissioni di monossido di carbonio [5]. Inoltre, l'attenzione conferita in molteplici ambiti al tema dell'incidentalità e la rilevanza dell'argomento sono dovute alla ingente quantità di persone coinvolte negli incidenti stradali. Infatti, tale tematica include direttamente tutte le categorie di utenti che si spostano sulle infrastrutture stradali, sia attraverso mezzi motorizzati come auto private, motocicli e autobus, sia attraverso forme di mobilità dolce come pedoni e ciclisti, causando impatti irreversibili sulla collettività.

L'esigenza di una pianificazione urbana intelligente e sostenibile ha come diretta conseguenza l'analisi della domanda e dell'offerta di trasporto, con particolare attenzione alle reti. Lo studio dei suddetti elementi consente di determinare gli effetti prodotti dalla domanda di trasporto, valutando nello specifico i tempi di percorrenza, le emissioni

inquinanti e l'incidentalità, ed eventualmente di proporre soluzioni alternative con la finalità di migliorare i servizi offerti alla popolazione e la qualità della vita sotto numerosi aspetti.

A tal proposito, è sempre più diffusa l'adozione di modelli basati sulla creazione di una popolazione virtuale e una rete che rispecchia quella reale, detti digital twin, che costituiscono la rappresentazione virtuale di risorse fisiche, potenziali ed effettive, aggiornate attraverso lo scambio di informazioni tra i sistemi fisici e virtuali [6]. Grazie a tali modelli è possibile svolgere simulazioni in grado di analizzare dati per calibrare i servizi offerti, di prevedere le conseguenze causate da possibili scenari di traffico futuri e di valutare l'efficienza di interventi alternativi sulla rete stradale reale.

1.2. Obiettivi dello studio

Lo studio in oggetto si pone l'obiettivo di valutare gli effetti causati dall'applicazione del modello di Superblock, ovvero una nuova tecnica di pianificazione urbana intelligente e sostenibile che si sta diffondendo in molteplici contesti. Il concetto di Superblock, già adottato in diverse città europee ed extraeuropee, rappresenta una strategia di pianificazione della mobilità innovativa le cui finalità principali consistono nel rivendicare lo spazio pubblico dei cittadini, ridurre i modi di trasporto motorizzati, promuovere una mobilità sostenibile e uno stile di vita sano e attivo, garantire il verde urbano e mitigare gli effetti del cambiamento climatico [3]. In particolare, la trattazione analizza l'impatto prodotto dell'adozione dei superblocks nell'ambito della città di Bologna e la valutazione di tali impatti si svolge elaborando i dati ottenuti dalla micro-simulazione, realizzata nello studio in oggetto tramite il software SUMOPy.

Nel dettaglio, il presente elaborato costituisce uno studio volto all'analisi degli impatti sulla qualità della vita dei cittadini e sulla circolazione in ambito urbano, con particolare riferimento ai dati relativi al Trasporto Pubblico Locale. Proprio il trasporto pubblico incarna un aspetto fondamentale nella determinazione della qualità della vita della popolazione, in quanto non solo soddisfa l'esigenza di mobilità dei cittadini ma inoltre garantisce attrattività e competitività del territorio in cui opera. Pertanto, la pianificazione di tale servizio e la sua gestione quotidiana si pongono l'obiettivo di soddisfare al meglio

le aspettative dei cittadini, ampliare il più possibile il bacino di utenza, migliorare la qualità dell'ambiente ed assicurare alla collettività uno sviluppo socialmente responsabile e sostenibile, senza compromettere lo sviluppo delle generazioni future. Un esempio di sistema di trasporto pubblico innovativo è rappresentato dal Personal Rapid Transit (PRT). Esso costituisce un mezzo di trasporto a guida autonoma composto da piccoli veicoli, la cui capienza varia fino a sei passeggeri, che si spostano senza interruzioni da un'origine a una destinazione [7].

L'elaborato, dopo un'analisi della letteratura incentrata sullo studio dei concetti di superblock, PRT e micro-simulazione, si focalizza sull'illustrazione del software adoperato, ovvero SUMOPy, e dei dati impiegati durante lo svolgimento dello studio. La trattazione prosegue presentando l'approccio adottato per la valutazione degli effetti provocati dall'inserimento dei superblocks e i criteri di individuazione di questi ultimi. Successivamente, si applicano tali strategie per implementare i superblocks nell'area di studio oggetto di interesse, ovvero la città di Bologna, precedentemente descritta e studiata nel dettaglio. Inoltre, si presenta qualitativamente la descrizione di una possibile continuazione dello studio in oggetto, volto all'analisi dell'applicazione del modello di Superblock e della contemporanea realizzazione del PRT, in collaborazione con il servizio di trasporto pubblico standard su gomma. Infine, si propone un'analisi dettagliata dei risultati ottenuti conseguentemente all'applicazione del concetto di Superblock alla città di Bologna, confrontandoli con i dati relativi alla situazione attuale e ai valori target a cui si ambisce per il futuro.

2. STATO DELL'ARTE

2.1. Micro-simulazione e Activity-Based Model

L'analisi di un sistema di trasporto tramite simulazione può avvenire seguendo diverse tipologie di approccio: macroscopico, mesoscopico e microscopico [8]. L'approccio macroscopico è quello più tradizionale, storicamente utilizzato, che consente di simulare un sistema di trasporto e di ottenere in uscita i valori medi dei parametri di interesse, senza necessitare di ingenti quantità di dati in ingresso. Tale approccio necessita di forti semplificazioni sia nella definizione della domanda, basata su modelli aggregati e algoritmi di assegnazione limitati da forti ipotesi semplificative, sia nella definizione dell'offerta, costituita solo dalle arterie principali della rete reale. Pertanto, l'approccio macroscopico presenta importanti limiti dati principalmente dalla varietà e dall'accuratezza dei risultati ottenuti. Proprio per colmare tali limiti, negli ultimi anni si sta diffondendo sempre di più nella ricerca l'adozione dell'approccio microscopico, che consente lo svolgimento di analisi più precise e dettagliate, a discapito di una maggior complessità computazionale e difficoltà nel reperire i dati necessari allo studio. Tale approccio permette dunque di modellizzare in maniera più accurata i processi trasportistici, di poter valutare più precisamente i flussi di traffico che interessano le infrastrutture e le relative emissioni e concentrazioni di inquinante nell'atmosfera. Infatti, i modelli microscopici consentono di valutare il comportamento dei singoli veicoli e dei conducenti, comprendendo le interazioni tra automobili, i cambi di corsia, le reazioni agli incidenti e le varie manovre. Infine, l'approccio mesoscopico si presenta come intermedio tra quello macroscopico e quello microscopico [8] [9].

L'utilizzo della micro-simulazione è diffuso sia per l'analisi di porzioni di rete di limitata estensione, sia per analisi su larga scala [10]. La micro-simulazione per analisi di piccole porzioni di rete presenta molteplici finalità, come la valutazione degli impatti prodotti da un intervento urbanistico in un quartiere di dimensioni ridotte [11], la stima dei flussi su una piccola area determinati dall'aggiunta di una nuova arteria nella rete e la redazione di piani di esodo di aree urbane nel caso di calamità naturali [12]. D'altra parte, in letteratura sono presenti anche numerosi studi che adottano la micro-simulazione per analisi su larga scala, condotte attraverso l'utilizzo di molteplici software, differenti da quello adottato nel presente elaborato e illustrato nel dettaglio nel capitolo 3.1, come ad esempio MATSim

[13], TRANSIMS [14] e VISSIM [15]. In particolare, sono oggetto di analisi nella presente trattazione le micro-simulazioni su larga scala, di cui sono presenti numerosi esempi in letteratura. La micro-simulazione su larga scala consente di valutare gli effetti, a livello di intere città, provocati da nuove tecnologie e servizi di trasporto, come ad esempio i semafori intelligenti e i veicoli autonomi condivisi; essa rappresenta un progetto interdisciplinare, nato dalla collaborazione allo stesso scenario tra i pianificatori dei trasporti e gli sviluppatori informatici [16].

In diversi settori, compreso quello trasportistico, modelli molto diffusi nella micro-simulazione sono gli Agent-Based Model (ABM), secondo cui ogni elemento della popolazione, detto agente, simboleggia un vero guidatore che utilizza la rete stradale [17]. Nelle micro-simulazioni gli agenti interagiscono tra loro e con l'infrastruttura stradale seguendo modelli di tipo car-following, che nel caso di micro-simulazioni su larga scala considerano solamente l'accodamento e il cambio di corsia, senza considerare il comportamento dei singoli conducenti e le rispettive interazioni. In base alla metodologia di generazione della domanda, i modelli Agent-Based si suddividono in due categorie: Trip-Based e Activity-Based. In particolare, i modelli Activity-Based risultano essere più realistici e adatti all'ambito trasportistico in quanto focalizzati sulle attività svolte dagli utenti durante la giornata e impongono maggiori vincoli sugli spostamenti di questi ultimi (ad esempio impongono che, in una giornata, gli spostamenti iniziali e gli spostamenti finali rispettivamente partano e terminino in corrispondenza delle medesime abitazioni) [17].

Dunque, i modelli Activity-Based rappresentano meglio il comportamento e il processo decisionale di ogni individuo e, conseguentemente, la popolazione nel suo insieme [18]. Secondo tali modelli, la generazione della domanda avviene attraverso l'analisi del diario di ogni individuo, contenente tutte le attività giornaliere, gli orari, i luoghi, i modi e i percorsi degli spostamenti che collegano le varie attività. Tale strategia, pur essendo decisamente performante, risulta essere altrettanto onerosa in termini computazionali perché richiede un'ingente quantità di dati per la creazione di una popolazione reale; è infatti irrealistico pensare di poter conoscere il diario di ogni utente e di inserirlo puntualmente in un modello. Pertanto, si sono diffuse delle strategie che consentono di stimare, quanto più dettagliatamente possibile, il diario degli individui, creando così una popolazione virtuale [8]. Tale approccio si basa su un procedimento iterativo composto da quattro fasi: 1) generazione di una popolazione con caratteristiche che corrispondono alle

statistiche dell'area di studio e definizione dei relativi attributi, 2) determinazione delle attività giornaliere di ogni persona specificando luoghi e orari, 3) creazione dei piani di trasporto utilizzati dagli utenti per spostarsi tra due attività successive comprendenti modo e percorso scelto e 4) svolgimento della micro-simulazione, ovvero dell'esecuzione dei piani di tutti gli utenti della popolazione virtuale, con la relativa analisi dei risultati [18]. Il processo iterativo di generazione della domanda secondo il modello Activity-Based è rappresentato schematicamente nella figura 2.a. [18].

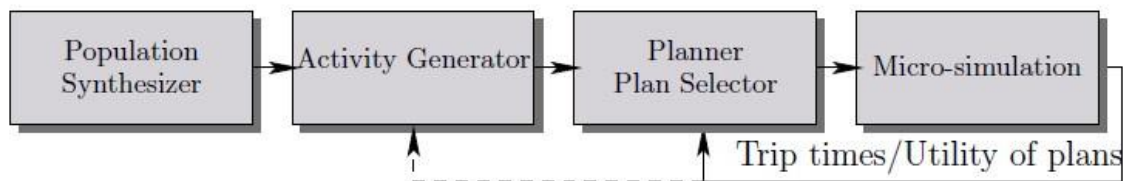


Fig. 2.a: struttura della generazione della domanda secondo il modello Activity-Based

Tra tutti i contributi presenti in letteratura relativi ai modelli Activity-Based, la fonte [16] risulta essere di particolare interesse per la trattazione in oggetto. Nel dettaglio, tale studio illustra la realizzazione di uno scenario di micro-simulazione su larga scala secondo un modello Activity-Based, considerando diversi modi di trasporto quali auto, autobus, bicicletta, moto e pedoni, relativo alla città di Bologna, nel periodo di punta mattutino. La rilevanza di tale fonte in relazione alla presente trattazione è ulteriormente supportata dal fatto di considerare la stessa area di studio, ovvero la città di Bologna, descritta dettagliatamente nel paragrafo 4.1 del presente elaborato

2.2. Modello di Superblock

2.2.1. Obiettivi e contesto

La pianificazione urbanistica delle città costituisce un elemento fondamentale per fronteggiare il cambiamento climatico; infatti, proprio le città sono le principali fonti di emissioni di gas serra e, al contempo, i cittadini subiscono l'impatto negativo di questo fenomeno. La mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici richiedono trasformazioni fondamentali nell'urbanistica, nella pianificazione e nella gestione del traffico urbano [19].

Inoltre, in tutto il mondo, la pianificazione urbana attuale, fortemente dipendente dalle automobili, ha comportato bassi livelli di attività fisica ed elevati livelli di inquinamento ambientale. Attualmente, fino al 70% dello spazio pubblico cittadino è occupato da veicoli a motore, quando in realtà, nell'ottica di una pianificazione sostenibile, si ritiene che non debba essere occupato più del 25% di tale spazio; pertanto, si evidenzia come lo spazio pubblico, aperto e verde, nelle configurazioni cittadine attuali, sia insufficiente. Inoltre, recuperando una quota parte di questi spazi e destinandola ad attività ricreative e comunitarie, si incrementerebbe l'attrattività del territorio, migliorandone la vivibilità e l'estetica, e si otterrebbe una maggior resilienza urbana e adattamento ai cambiamenti climatici attraverso la realizzazione di servizi di ecosistema (come, per esempio, il controllo passivo dell'inquinamento atmosferico e acustico, il raffreddamento tramite ombreggiatura ed evapo-traspirazione dell'acqua) [3].

Si evidenzia come il settore dei trasporti assuma un ruolo chiave per conseguire gli obiettivi di neutralità climatica e decarbonizzazione entro il 2050, delineati nell'Accordo di Parigi (2015) dalle Nazioni Unite, e contribuire a uno sviluppo sostenibile. L'Accordo di Parigi ha l'obiettivo di stabilizzare "l'aumento della temperatura media globale ben al di sotto di 2 °C rispetto ai livelli preindustriali e proseguire gli sforzi per limitare l'aumento della temperatura a 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali"; dalla ricerca emerge che tale scenario richiederebbe una decarbonizzazione quasi completa a livello economico entro il 2060 o prima [20]. Un approccio ampiamente studiato e diffuso per raggiungere la decarbonizzazione è quello denominato "Avoid-Shift-Improve" (ASI), letteralmente "Evitare-Spostare-Migliorare". Tale strategia mira ad "Evitare", ovvero a ridurre la necessità di spostamento ridisegnando gli spazi urbani, "Spostare", ovvero a incentivare un trasferimento modale da veicoli privati a modi di trasporto sostenibili e "Migliorare", ovvero potenziare le caratteristiche dei veicoli e dei carburanti e perfezionare l'esperienza di viaggio introducendo nuove tecnologie [20] [21].

Proprio per rispondere alle suddette esigenze e raggiungere gli obiettivi sopracitati, nasce il modello di Superblock. Come illustrato sinteticamente nel Capitolo 1, tale tecnica rappresenta una strategia di pianificazione dei trasporti innovativa i cui obiettivi principali sono quelli di rivendicare lo spazio pubblico dei cittadini, ridurre i modi di trasporto motorizzati, promuovere una mobilità sostenibile e uno stile di vita sano e attivo, garantire il verde urbano e mitigare gli effetti del cambiamento climatico [3].

2.2.2. Sviluppo storico, applicazioni reali ed effetti positivi

Il concetto di Superblock non è totalmente nuovo, ma si sviluppa a partire da diverse strategie che si sono susseguite nel corso degli anni, contraddistinte da obiettivi differenti ma con la caratteristica comune di essere orientate verso la ricerca dell'urbanistica "umana". Infatti, negli anni numerose città in tutto il mondo hanno implementato aree con elementi basati su strade vive e spazi verdi e condivisi, o vietato la circolazione delle auto nei centri storici [19].

Alcune delle esperienze precedenti includono il “woonerf” nei Paesi Bassi [22], le “home-zone” e gli “shared-space” nel Regno Unito [23] i “microdistretti” in Russia [24], il “car free city and car free neighbourhood” a Friburgo, in Germania [25] ed infine la “15-min city” a Parigi, in Francia [26]. Molte di queste strategie di pianificazione sono iniziate prima della pandemia COVID19, ma si sottolinea come esse siano state accelerate e incrementate durante la pandemia, quando durante i lockdown l'inquinamento atmosferico e i livelli di rumore sono diminuiti notevolmente, e post pandemia [27].

In particolare, il concetto di Superblock si sta diffondendo sempre di più, sia a livello europeo, sia a livello extraeuropeo. Alcuni esempi di applicazioni in città extraeuropee, in contesti anche molto differenti tra loro, si possono ammirare in Cina [28], ad Abu Dhabi [29], Seoul [30] e Panama [31]. D'altra parte, gli esempi più noti a livello europeo si trovano in Spagna, a Barcellona [3] [19] [32] e a Valencia [33]. Proprio l'esempio di Barcellona risulta essere di particolare rilevanza e viene illustrato più nel dettaglio nel proseguimento della trattazione.

Numerose analisi si sono concertate sul caso studio di Barcellona [3] [19] [32], valutando in particolare l'impatto prodotto sulla salute dei cittadini dall'implementazione di questo modello urbano. Il concetto di Superblock è stato adottato come misura principale del piano di mobilità della città nel 2015, promosso da Salvador Rueda, direttore dell'Agenzia di Ecologia Urbana di Barcellona; tale manovra fu definita dallo stesso come un nuovo modello di mobilità che ristrutturava la tipica rete stradale urbana [3].

Dalla ricerca è emerso come l'applicazione dei superblocks nella città Barcellona abbia determinato numerosi benefici per la salute psicofisica dei cittadini come il calo dei

decessi precoci, l'incremento dell'attività fisica, l'aumento dell'aspettativa di vita e la riduzione alle esposizioni ambientali dannose (inquinamento atmosferico, acustico e surriscaldamento globale), provocando al contempo un impatto economico positivo [3].

La Fig. 2.b [19] rappresenta alcuni grafici relativi allo spazio per i pedoni, accessibilità, qualità dell'aria, comfort acustico e indice di vivibilità nello spazio pubblico in relazione alla situazione precedente e successiva all'applicazione del modello di Superblock nella città di Barcellona.

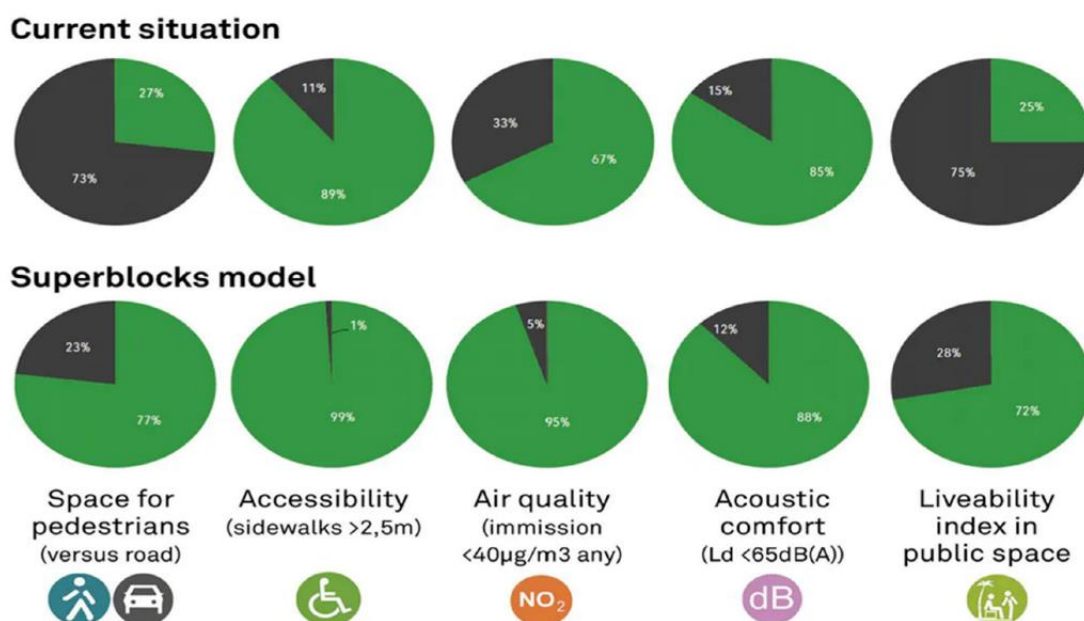


Fig. 2.b: confronto tra la situazione attuale e il modello di Superblock nella città di Barcellona

2.2.3. Concetto teorico di Superblock

Concretamente, i superblocks sono costituiti da una rete stradale principale, caratterizzata da una forma che ricorda quella di una griglia poligonale, che copre un'area di circa 400x400m² [19]. Il perimetro dei superblocks costituisce la rete di base e consente la circolazione dei veicoli motorizzati, garantendo che la città sia connessa internamente e accogliendo il traffico che lo percorre con una velocità massima di 50 km/h. Oltre ad accogliere la mobilità privata come auto e moto, la rete stradale di base contiene le infrastrutture dedicate esclusivamente alla mobilità dolce, come marciapiedi e piste ciclabili, e le corsie separate per il trasporto rapido, garantendo la separazione dei moti.

Inoltre, relativamente al trasporto pubblico, una progettazione ottimale prevede che le fermate degli autobus siano posizionate in prossimità delle principali intersezioni dei superblocs e che gli autobus siano programmati ad alta frequenza, rendendo il trasporto pubblico un'alternativa attraente e realmente competitiva. Relativamente alle infrastrutture stradali interne alla rete di base, lì non sono consentiti il transito, la circolazione e la sosta di veicoli privati motorizzati, a favore di una maggior disponibilità di spazio pedonale e di verde pubblico [3]. Secondo tale descrizione, il divieto di transitare all'interno dei superblocs, rende le strade molto più accessibili e vivibili ai pedoni, garantendo al contempo efficienti soluzioni ai principali problemi di mobilità urbana e migliorando sia la quantità sia la qualità dello spazio pubblico disponibile per la mobilità dolce. Risulta importante sottolineare che tali infrastrutture restano comunque a servizio della collettività, garantendo la circolazione dei veicoli di emergenza e la sosta di veicoli di carico/scarico in speciali circostanze di emergenza [3] [19].

La Fig. 2.c [19] illustra le differenze di utilizzo e di accessibilità nella rete stradale tra il modello più classico e diffuso di mobilità urbana rispetto al modello di Superblock.

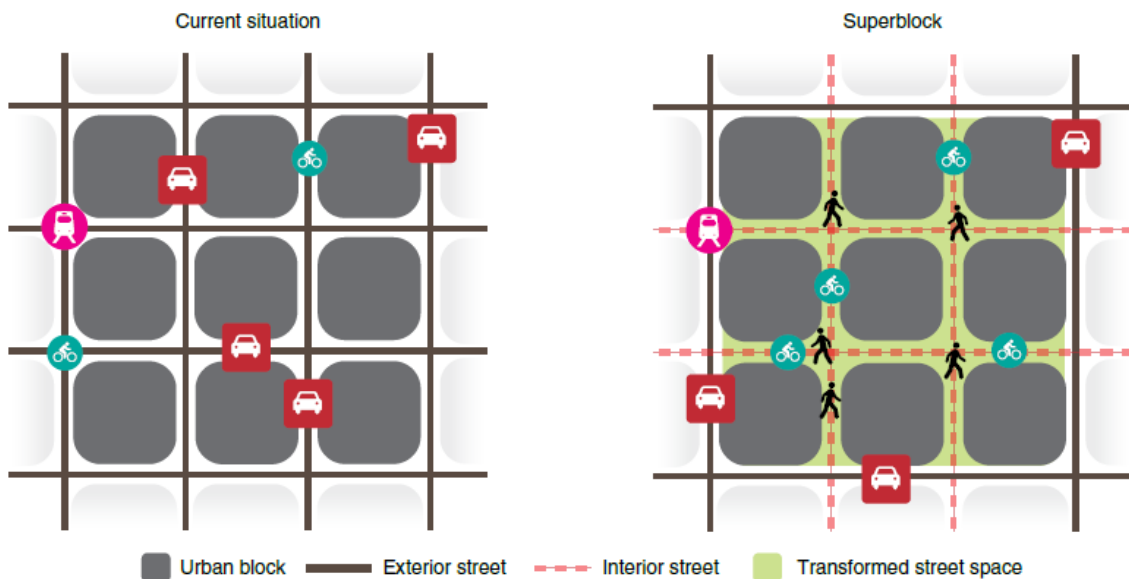


Fig. 2.c: differenze di utilizzo e accessibilità tra il modello di mobilità classico e il modello di Superblock

Come illustrato anche nella Fig. 2.b relativa al caso studio di Barcellona, l'attuazione del modello di Superblock precedentemente illustrato, riducendo il traffico dei veicoli privati, comporta svariate conseguenze positive, come l'incremento dello spazio a disposizione

per i pedoni e l'accessibilità, il miglioramento della qualità dell'aria e la riduzione dell'inquinamento acustico e ambientale. Altri impatti positivi sulla collettività sono l'aumento dello spazio pubblico, la presenza di zone più sicure per bambini e anziani, l'incremento delle aree verdi, l'espansione dell'attività economica delle piccole imprese e valide alternative alla mobilità motorizzata [19].

Infine, si sottolinea che l'applicazione dei superblocks, basandosi sulla modifica della rete esistente, non necessita di particolari investimenti infrastrutturali e non comporta la demolizione o la costruzione di specifici edifici, rappresentando una strategia di urbanizzazione a basso impatto in termini di tecnologie e risorse economiche utilizzate [19].

2.3.Introduzione al PRT

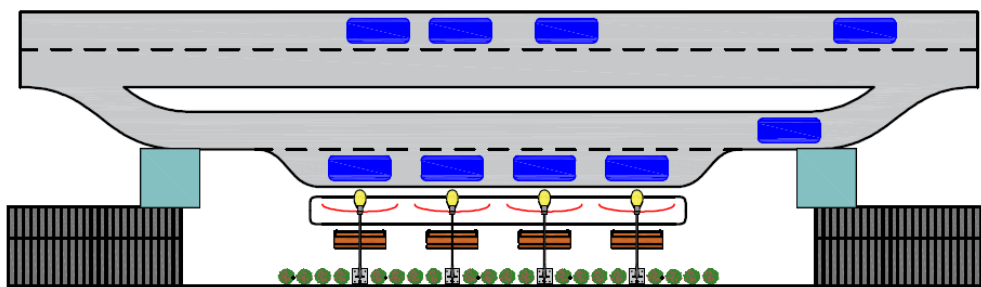
2.3.1. Definizione di PRT

Come accennato nel Capitolo 1, il Personal Rapid Transit (PRT) rappresenta un mezzo di trasporto pubblico, innovativo, a guida autonoma, costituito da piccoli veicoli elettrici, con una capienza di circa 4-6 passeggeri, che circolano su guide esclusive e leggere, come rotaie o altre strutture di guida, che possono essere sopraelevate, sotterranee o a livello dell'infrastruttura stradale [34]. A prescindere dalla tipologia, l'infrastruttura si compone di stazioni collegate da una rete connessa. Si evince come tale sistema sia caratterizzato da complesse interazioni, globali e locali, tra i veicoli e l'infrastruttura e tra i veicoli stessi. Esempi di interazioni globali sono il routing del veicolo e la gestione del veicolo vuoto, eseguite da un controller centralizzato; esempi di interazione locale sono l'interazione tra la stazione e il veicolo durante le manovre e i processi di imbarco e sbarco [35].

La Fig. 2.d (1) [36] rappresenta un'illustrazione grafica del sistema PRT, comprendente una parte di un'ipotetica rete e i relativi veicoli sovrastanti; solo a scopo illustrativo, nell'immagine è rappresentata un'infrastruttura di tipo sopraelevato. La Fig. 2.d (2) rappresenta un'illustrazione grafica in 2D di una possibile configurazione delle stazioni del sistema PRT, che consente che la sosta necessaria per il trasbordo dei passeggeri avvenga senza interferire con la circolazione degli altri veicoli del sistema



(1)



(2)

Fig. 2.d: (1) illustrazione grafica di un'infrastruttura sopraelevata e un veicolo caratterizzanti il sistema di trasporto PRT; (2) rappresentazione 2D di una possibile configurazione delle stazioni di un sistema PRT

Come avviene con il trasporto pubblico più classico, i passeggeri salgono sui veicoli, che nel sistema oggetto di studio viaggiano con una velocità massima di circa 60 km/h, per spostarsi da una stazione all'altra. La principale differenza con il trasporto pubblico diffuso attualmente è che il PRT non include fermate intermedie in uno spostamento, ma esso consente un servizio diretto dalla stazione di origine alla stazione di destinazione; infatti, i veicoli risultano essere occupati o da un singolo individuo o da un piccolo gruppo di persone che viaggiano verso la stessa destinazione [37]; l'assenza delle fermate intermedie garantisce che la velocità media sia maggiore e che i tempi necessari per un dato spostamento siano più brevi.

Un altro vantaggio rispetto al trasporto pubblico è che nel PRT non si trovano stazioni sulla rete principale, ma sono off-line. Questo aspetto progettuale è molto interessante in quanto comporta che il flusso di traffico sull'infrastruttura principale non risulti disturbato dai veicoli che si fermano nelle stazioni, consentendo un viaggio ininterrotto dall'origine alla destinazione e un'elevata velocità operativa dei mezzi [37].

Infine, si sottolinea che le prestazioni e il funzionamento di reti e sistemi PRT possono essere analizzate attraverso la micro-simulazione che consente di riprodurre i movimenti di ogni singolo veicolo e il viaggio dei singoli passeggeri. In particolare, attraverso la micro-simulazione è possibile individuare la capacità del sistema ed eventuali punti critici, come i colli di bottiglia, fissate la rete e la domanda di viaggio [35].

2.3.2. Analisi della letteratura

Il concetto di PRT ha origine nella seconda metà del ventesimo secolo, quando più autori lavoravano, indipendentemente l'uno dall'altro, sullo sviluppo di sistemi di trasporto pubblico automatizzati composti da piccoli veicoli che trasportano le persone, senza fermate intermedie, tra stazioni offline facenti parte di una stessa rete [38]; tali applicazioni trovano un perfetto riscontro con la definizione di PRT riportata del paragrafo 2.2.1.

Nonostante gli studi, la realizzazione di un sistema PRT ha dovuto attendere il nuovo millennio per essere compiuta. Tale sistema, infatti, in relazione agli anni in cui è stato introdotto nella ricerca, costituisce una tecnologia complessa e con un ampio margine di errore che non facilita l'attuazione dell'ingente investimento economico necessario per la realizzazione. Inoltre, ulteriori ragioni della tardiva diffusione PRT riguardano i costi, le dimensioni, l'uso del suolo, il servizio, e la protezione ambientale [38].

Negli ultimi decenni, l'applicazione dei sistemi PRT si è concretizzata in diversi contesti di dimensioni anche molto differenti tra loro. In particolare, tale tecnologia è stata studiata in relazione ad aree di estensioni limitate, come campus universitari [39] e aeroporti [40]; nel dettaglio, nel contesto aeroportuale sono spesso utilizzati come sistemi di piccole dimensioni che operano da spola, detti People Mover, di cui si possono osservare alcuni

esempi nella città di Bologna [41] e di Pisa [42]. L'esempio applicativo più rilevante in ambito aeroportuale, in quanto costituisce un vero e proprio sistema PRT ed è in funzione ormai da diversi anni, è rappresentato dal caso dell'aeroporto di Heathrow a Londra [40] [43]. Relativamente ad analisi su larga scala, in letteratura esistono numerosi esempi che valutano gli effetti della realizzazione ipotetica e reale del sistema PRT anche su aree di studio di maggior estensione, come quartieri o città. Tali studi sono applicati sia a livello europeo, come nel caso dell'Olanda [44] e della Germania [45], sia a livello extraeuropeo [46].

3. METODOLOGIA

3.1. Software utilizzato: SUMOPy

SUMO (Simulation Of Urban Mobility) è un simulatore del traffico open source che consente di realizzare simulazioni, con approccio microscopico e continuo, di reti di traffico urbane, sviluppato dal centro aerospaziale della Germania [47]. Python è un linguaggio di programmazione molto diffuso che consente di lavorare rapidamente e integrare i sistemi in modo efficace [48]. SUMOPy è un'estensione di SUMO, scritta in linguaggio Python, sviluppata dal Prof. Joerg Schweizer del dipartimento di trasporti dell'Università di Bologna [49]. SUMOPy in realtà è molto più di una semplice interfaccia grafica di SUMO: è un pacchetto completo che consente l'utilizzo degli strumenti di SUMO in maniera semplice e intuitiva, rappresentando al contempo un'interfaccia grafica GUI e un editor di rete e si basa su un semplice linguaggio di scripting che facilita l'utilizzo di SUMO. La pubblicazione originale relativa a SUMOPy è reperibile presso l'Università di Bologna e negli atti di SUMO2013 [50].

Scaricando SUMOPy, si ottiene un pacchetto completo contenente diverse applicazioni che permettono di espletare tutte le fasi della simulazione. In particolare, nel corso della trattazione, si utilizza NETEDIT, un'applicazione che consente di realizzare e modificare le reti urbane [10]. Terminata la fase di simulazione, i risultati ottenuti sono esportati ed elaborati ed analizzati su Excel.

La prima finalità di SUMOPy consiste nell'espandere la base di utenti del micro-simulatore di traffico SUMO fornendo un simulatore user-friendly e flessibile allo stesso tempo. Altra finalità di SUMOPy consiste nella gestione dell'ingente quantità di dati necessari per eseguire complesse simulazioni multimodali. Esso comprende diversi modi di generazione della domanda, nonché una vasta gamma di modalità di trasporto ed estensioni aggiuntive come il trasporto pubblico, bicicletta, il PRT e i taxi a guida autonoma. Infatti, si può valutare l'effetto dei nuovi modi e tecnologie simulando una popolazione sintetica in un ambiente flessibile e in continuo aggiornamento [49] [50].

Il modello di domanda su cui si basa SUMOPY è un Activity-Based Model, le cui caratteristiche sono state precedentemente illustrate nel paragrafo 2.1. Esso consente di

generare piani e percorsi per il micro-simulatore SUMO e di utilizzare i risultati, ottenuti a partire dal simulatore, per modificare nuovamente i piani e i percorsi, in un ciclo iterativo. Tale struttura garantisce la possibilità di generare la domanda basata sulle attività con la simulazione dinamica dettagliata e l'interazione di persone e veicoli fornita da SUMO [18].

La generazione della domanda all'interno del software SUMOPy, essendo di tipo Activity-Based, avviene attraverso il processo iterativo, illustrato schematicamente nella Fig. 2.a. [18]. Come descritto precedentemente, tale procedimento è composto da quattro fasi: generazione di una popolazione con caratteristiche che corrispondono alle statistiche dell'area di studio e definizione degli attributi, determinazione delle attività giornaliere con luoghi e orari, creazione dei piani di trasporto utilizzati dagli utenti per spostarsi tra due attività successive comprendenti modo e percorso scelto e infine lo svolgimento della micro-simulazione [10] [18].

Rispetto agli altri software open source che adottano modelli di generazione della domanda di tipo Activity-Based, la caratteristica distintiva di SUMOPy è che utilizza le "Mobility Strategies" al posto dei modi. Una strategia è più di un singolo modo o di un viaggio multimodale; essa costituisce infatti un metodo generico per muoversi, utilizzando differenti tipologie di mezzi, veicoli, servizi o comportamenti. Le strategie possibili per un individuo sono prevalentemente determinate dalle sue caratteristiche socioeconomiche, dalla proprietà del veicolo e dalla posizione delle attività. Lo schema di funzionamento di SUMOPy è inoltre espandibile in quanto le nuove strategie di mobilità, come taxi condivisi o il PRT, possono essere implementate e integrate nel programma [18].

La generazione della popolazione virtuale avviene a seguito della creazione della popolazione, attraverso lo strumento "Population Synthesizer", e della realizzazione delle attività, attraverso lo strumento "Activity Generator", in combinazione con i dati ottenuti dall' algoritmo "Vehicle Provider". La sintesi della popolazione e la generazione delle attività costituiscono un processo di disaggregazione in cui gli attributi dei singoli individui si determinano a partire dalle informazioni statistiche di base. La banca dati virtuale della popolazione contiene dati socioeconomici, modelli di attività e la disponibilità di veicoli. Le statistiche sulla proprietà dei veicoli sono una fonte di affidabile, specialmente per i veicoli a motore; si evidenzia come la proprietà dei veicoli

limiti fortemente la fattibilità di strategie che possono essere utilizzate per produrre piani di mobilità. Relativamente al “Vehicle Provider”, esso costituisce uno strumento in grado di svolgere l’assegnazione dei veicoli sulla base dei dati relativi alle percentuali di possesso dei vari mezzi. Successivamente, si procede prima con la generazione dei piani adottabili da ciascun utente, per ogni “Mobility Strategies”, per spostarsi tra due attività assegnate e poi si seleziona il piano ritenuto migliore; in particolare, la generazione dei piani avviene attraverso lo strumento “Plans Generator” e la selezione avviene attraverso il “Plan Selector”. Infine, si svolge la simulazione tramite SUMO, i cui risultati sono utilizzati per aggiornare i piani con gli effettivi tempi di viaggio, comportando l’eventuale modifica delle scelte degli utenti nelle iterazioni successive [18]. Il procedimento appena descritto è rappresentato schematicamente nella Fig. 3.a [18] sottostante.

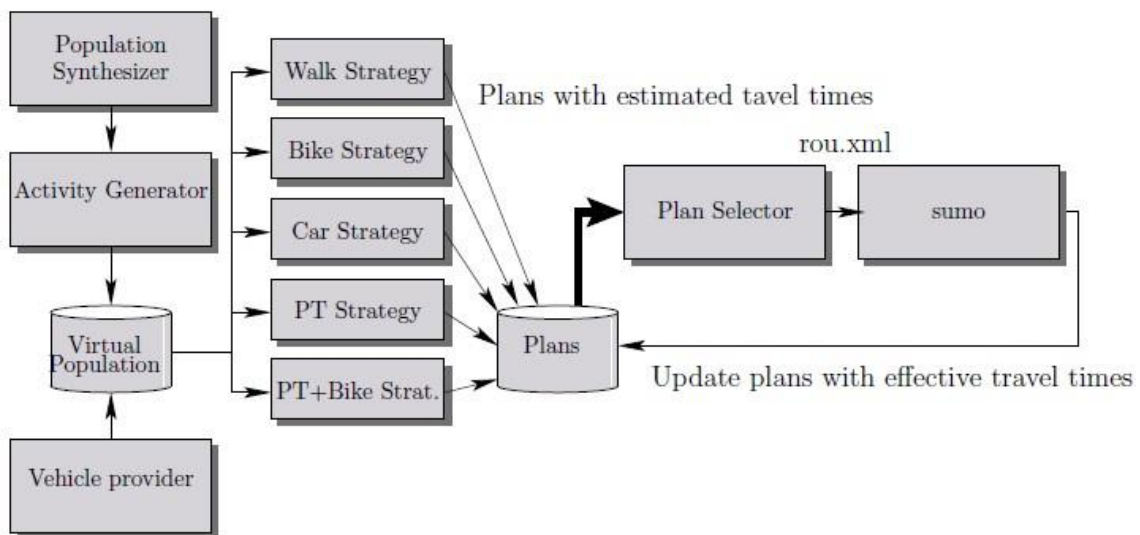


Fig. 3.a: Struttura del metodo di generazione della domanda, secondo il modello Activity-Based, adottato da SUMOPy.

3.2. Tipologie di dati utilizzate

3.2.1. Introduzione e definizione di big data

La diffusione della micro-simulazione negli ultimi anni è stata facilitata e accelerata dalla crescente disponibilità di “Big Data”, definiti come dati disaggregati, relativi a vaste aree territoriali e disponibili in grandi quantità, spesso anche pubblicamente. Esempi rilevanti di tale tipologia di dati sono il database di OpenStreetMap (OSM) [51], le tracce GPS dei

cittadini, i dati dei telefoni cellulari georeferenziati, le attività dei social network e i dati provenienti dalle misurazioni dei rilevatori stradali. L'utilizzo combinato dei big data e di dati aggregati, come le matrici origine-destinazione, risulta molto utile nella fase di realizzazione dello scenario, sia nella definizione dell'offerta, in particolare con i dati ottenuti da OSM, sia nella definizione della domanda. D'altra parte, si evidenzia che la definizione della domanda risulta più complessa per questioni di privacy degli utenti e poiché le tracce GPS e i social network non sono sempre collegati a profili utenti affidabili. Dunque, la determinazione comportamento dell'utente basata esclusivamente sull'utilizzo dei big data non è praticabile; risulta invece di uso comune l'utilizzo dei big data per arricchire le informazioni disponibili in fase di calibrazione dei modelli [16].

3.2.2. Matrice Origine-Destinazione

La disaggregazione delle matrici origine-destinazione rappresenta un metodo significativo per generare viaggi e percorsi per le diverse modalità di trasporto. La zonizzazione rappresenta una discretizzazione dello spazio e consente di discretizzare l'offerta di trasporto; in particolare, consiste nella suddivisione del territorio fisico in un numero finito di unità, dette zone di traffico, a cui si riferiscono tutte le grandezze relative a una data porzione di territorio. Si definisce zona di traffico una porzione di territorio con caratteristiche omogenee rispetto alle attività, all'accessibilità, alle infrastrutture e ai servizi di trasporto. La zonizzazione può essere svolta seguendo diversi criteri: in base alle sezioni censuarie, alla presenza di separatori fisici del territorio, a criteri di omogeneità dell'ambiente e al livello di dettaglio desiderato nello studio; si sottolinea che il livello di dettaglio della zonizzazione influenza fortemente la precisione dello studio condotto. Inoltre, è necessario considerare che la determinazione di ogni zona di traffico comporta l'individuazione di un "centroide"; si definisce centroide un nodo fittizio in corrispondenza di cui si ipotizza che si concentrino tutte le origini e tutte le destinazioni degli spostamenti relativi a una zona di traffico e che pertanto assume una posizione baricentrica rispetto alle reali origini e destinazioni degli spostamenti della zona.

All'interno di SUMOPy è possibile creare zone sia manualmente, realizzando singolarmente ogni zona, sia automaticamente, importando degli shape-file contenenti la zonizzazione completa dell'area di studio e le relative proprietà. Nel software è possibile

visualizzare le seguenti caratteristiche per ogni zona individuata [52]:

- “Name”: nome identificativo;
- “Type”: tipologia socioeconomica;
- “Coords [m]”: coordinate del centroide;
- “IDs orig edges”: elenco degli archi origine appartenenti alla zona;
- “IDs dest edges”: elenco degli archi destinazione appartenenti alla zona;
- “Extended name”: nome esteso della zona;
- “Area [km²]”: estensione spaziale della zona

3.2.3. Tracce GPS

È possibile utilizzare le tracce GPS registrate dai cittadini tramite smartphone, su base volontaria, per svolgere la ricostruzione della domanda ciclabile. Infatti, ogni traccia GPS descrive i movimenti di ciascun utente che utilizza la bicicletta attraverso una sequenza di posizioni, espressa tramite la latitudine e la longitudine, con data e ora. Per utilizzare le tracce GPS correttamente è necessario svolgere un processo di filtraggio in cui si eliminano le tracce incoerenti (caratterizzate ad esempio da velocità eccessive o tempi di attesa troppo lunghi) ed eliminare le nuvole di punti presenti all’inizio e alla fine delle tracce. Di fondamentale importanza è il successivo processo di “Map Matching”, ovvero un processo di mappatura, svolto per ogni traccia GPS, che consente di identificare la sequenza esatta degli archi della rete stradale risultanti dagli spostamenti dei vari utenti [16], applicato anche nell’individuazione degli archi percorsi dalle linee di trasporto pubblico. SUMOPy include strumenti per leggere le tracce GPS e per identificare il loro percorso utilizzando le procedure di map matching [18].

Il limite di tale procedura è che, stimando la domanda a partire dalle tracce GPS registrate su base volontaria, la percentuale di popolazione registrata non è nota. Dunque, risulta necessario scalare il numero delle tracce GPS rispetto al numero di viaggi effettivi [16]. La fonte [53] rappresenta una possibile procedura di ridimensionamento degli spostamenti basata sui conteggi dei flussi ciclabili su collegamenti dedicati alla rete stradale, applicato alla stessa area di studio della trattazione in oggetto, ovvero alla città di Bologna, illustrata nel dettaglio nel capitolo 4.1.

3.2.4. Dati GTFS

L'ultima tipologia di dati considerata è detta General Transit Feed Specification (GTFS), e consente di definire un formato comune per gli orari dei trasporti pubblici e le relative informazioni geografiche, con la finalità riprodurre fedelmente, all'interno del digital twin, l'intero servizio di trasporto pubblico svolto dall'azienda locale. Questi file si compongono di una serie di database, tra cui "Shapes", "Stops" e "Services", contenenti rispettivamente informazioni dettagliate riguardanti il percorso seguito da ciascuna linea, le coordinate georeferenziate di tutte le fermate sulla rete e le tabelle orarie dell'intero servizio, giorno per giorno [10].

In particolare, le fermate del servizio di trasporto pubblico, caratterizzate da un proprio ID e da uno specifico nome, sono posizionate sugli archi rete. Le linee di autobus si identificano come sequenze di archi, attraverso le procedure di map matching presenti su SUMOPy. Le fermate degli autobus svolgono assumono un ruolo rilevante nella micro-simulazione in quanto rappresentano il punto in cui le persone della popolazione accedono ai servizi di trasporto pubblico [16].

3.3. Criteri di identificazione dei superblocs

3.3.1. Aspetti introduttivi e valutazioni generali

L'applicazione di ogni intervento di pianificazione del traffico e della circolazione deve sottostare, oltre che all'approvazione politica e dei pianificatori, all'opinione pubblica. A tale scopo, anche l'implementazione del modello di Superblock deve assicurare la vivibilità della città, garantendo il soddisfacimento di una serie di bisogni e necessità dei cittadini [54]:

- Necessità biologiche e fisiologiche: presenza di servizi pubblici, accessibilità e spazi verdi;
- Esigenze di sicurezza: presenza di sistemi di illuminazione e sorveglianza e barriere protettive;
- Bisogni di appartenenza: attività pubbliche e luoghi di ritrovo;
- Condizioni estetiche: numero di bidoni sufficiente, manutenzione degli spazi.

Coerentemente con tali obiettivi, il modello di Superblock rappresenta proprio uno strumento per riorganizzare la città considerando i pedoni come priorità, seguiti dalle biciclette, e dai trasporti pubblici e le cui finalità principali consistono nel migliorare le condizioni ambientali della città e ottenere spazi pubblici di qualità per le persone [19].

Altro aspetto fondamentale, evidenziato in letteratura e applicato come valutazione preliminare nel caso studio di Barcellona, è lo svolgimento di un'analisi dettagliata della città con particolare riferimento ai flussi e alla mobilità, alle strutture e agli spazi verdi esistenti, all'edilizia e al tessuto sociale. In particolare, tale approccio risulta utile per la determinazione di una gerarchia stradale [27], adottata come criterio di identificazione dei superblocks e illustrata con maggiore dettaglio nel paragrafo seguente (3.3.2).

Infine, si sottolinea che la strategia di pianificazione costituita dai superblocks mira a una trasformazione integrata per migliorare la sostenibilità urbana a livello di città; pertanto, l'identificazione dei superblocks non deve avvenire in modo isolato, ma considerando un contesto d'insieme composto dalla totalità dei blocchi. Infatti, i superblocks individuati devono essere ulteriormente esaminati e valutati in relazione alle opportunità di migliorare la connettività globale delle infrastrutture, ridurre l'inquinamento, integrare con i trasporti pubblici, favorire la pedonalità e ottenere una mitigazione del calore urbano [55].

3.3.2. Criteri considerati

Nella presente trattazione, come primo tra tutti i criteri, si considera l'estensione dei superblocks. Come evidenziato nella definizione di Superblock, fornita in relazione al caso studio di Barcellona, la superficie complessiva di ogni blocco è di circa 400 m² [19]. In relazione a documenti presenti in letteratura, si ritiene che tale estensione possa essere caratterizzata da un'incertezza del 20%, assumendo dunque dimensioni spaziali leggermente diverse. Infatti, configurazioni urbane entro questo range risultano paragonabili al valore fornito precedentemente in termini di caratteristiche urbane come la pedonalità, la viabilità urbana o l'accessibilità al trasporto pubblico [55].

Le dimensioni e l'estensione dei singoli elementi risultano aspetti critici dell'applicazione del modello urbanistico studiato; considerando le modalità non motorizzate (pedoni e biciclette) come prevalenti all'interno dei superblocks, risulta necessario garantire comunque che tutti gli spostamenti delle suddette categorie di utenti avvengano in intervalli di tempo ragionevoli, anche per spostarsi da un estremo all'altro dei blocchi. Infatti, gli spostamenti da punti diametralmente opposti dei blocchi risultano frequenti e necessari per raggiungere alcuni punti di interesse, i parcheggi centralizzati, la rete principale e le fermate dell'autobus (elementi illustrati del dettaglio nel proseguimento della trattazione).

Come accennato nel paragrafo 3.3.1., anche la diversità strutturale e la densità costituiscono due aspetti rilevanti dell'individuazione dei superblocks. Tipicamente il modello di Superblock si applica a quartieri e zone ad alta densità; infatti, le aree ad alta densità sono più esposte agli effetti negativi dovuti a un'elevata concentrazione urbana e inoltre in tali aree le alternative legate alla mobilità sostenibile sono potenzialmente più applicabili [55].

Attraverso l'approccio globale precedentemente descritto si realizza una gerarchizzazione della rete stradale che consente di individuare una rete di hub e piazze verdi in cui i pedoni hanno la priorità e di determinare quali strade chiudere al traffico e quali considerare nella definizione della rete di base [27] [55]. Affinché la rete di base risulti connessa è necessario che le strade appartenenti ad essa siano strade principali, larghe, spaziose e soprattutto che siano in grado di garantire la circolazione in entrambi i sensi di marcia del traffico stradale e del trasporto pubblico locale. In particolare, la rete esistente del trasporto pubblico locale rappresenta un elemento su cui basarsi per l'individuazione del perimetro dei superblocks in quanto le strade in cui circolano più di tre linee di autobus, sono utili per la definizione dei contorni dei blocchi e, di conseguenza, per la determinazione della rete di base. Infine, affinché siano garantiti i servizi necessari ai cittadini, un ulteriore aspetto da considerare nell'identificazione dei superblocks è la presenza di un numero sufficientemente elevato e vario di "Points Of Interest" (POIs).

Nella fase di identificazione dei superblocks si valuta anche la presenza aree disponibili e spazi inutilizzati, la possibilità di ricavare tali spazi liberi a seguito di un'eventuale

futura riorganizzazione spaziale interna al blocco, la presenza di ampi parcheggi pubblici o privati esistenti ed eventuali piani comunali per la realizzazione di questi ultimi. Infatti, rendendo le strade interne ai superblocks inaccessibili ai mezzi motorizzati e pedonalizzando tali aree, nella rete interna non risulta possibile parcheggiare le auto private. Per garantire ugualmente un certo numero di parcheggi agli utenti, un'alternativa è rappresentata proprio dall'utilizzo dei suddetti spazi inutilizzati per la creazione di ampi parcheggi centralizzati, anche multipiano. Tali aree non sono sempre disponibili all'interno dei superblocks e si ricercano in corrispondenza del perimetro di questi ultimi; si valuta anche la possibilità di realizzare parcheggi centralizzati interrati, senza determinare l'occupazione della superficie spaziale dei blocchi.

Infine, si evidenzia che le osservazioni e i criteri illustrati nel paragrafo 3.3. non costituiscono dei requisiti stringenti per l'individuazione di tutti i superblocks; piuttosto, essi rappresentano degli elementi di valutazione, da prendere in considerazione e da rispettare il più possibile, utili nell'identificazione di uno schema primario di superblock, che si trasforma nello schema definitivo solo in seguito a valutazioni dettagliate riferite alla specifica area di studio e al singolo caso studio esaminato.

3.4. Definizione degli scenari

All'interno di SUMOPy è possibile realizzare diversi scenari, il termine scenario indica la micro-simulazione del traffico in un particolare contesto ambientale; nella trattazione in oggetto tale contesto coincide con la città di Bologna, descritta successivamente nel paragrafo 4.1. Nel presente studio, l'approccio adottato per la valutazione degli effetti causati dall'applicazione del modello di Superblock e dalla successiva implementazione del PRT, illustrati in maniera teorica rispettivamente nei paragrafi 2.2. e 2.3, si basa sulla realizzazione di tre scenari su SUMOPy. Tali scenari prendono il nome di Scenario Base, Scenario Superblock e Scenario PRT.

Lo Scenario Base costituisce il modello microscopico del traffico del caso studio, senza i superblocks; esso si realizza applicando le strategie di generazione dell'ambiente di simulazione, della domanda e dei piani precedentemente illustrate e disponibili all'interno del software SUMOPy. Pertanto, lo Scenario Base rappresenta appunto la situazione base

e la relativa simulazione riflette, per quanto più possibile, la realtà, basandosi sulla rete stradale esistente, sul sistema di trasporto pubblico esistente e sulla disponibilità e sulla configurazione attuali dei parcheggi nell'area di studio considerata.

La simulazione dello Scenario Base avviene applicando un metodo di assegnazione chiamato "Anti-jam Routing" che ipotizza che gli utenti abbiano a disposizione informazioni dettagliate sul traffico attuale per la determinazione degli itinerari della popolazione. Pertanto, in presenza di un certo livello di congestione, una quota parte dei veicoli, proporzionale alla densità veicolare ovvero al livello di congestione, risulta deviata rispetto al percorso stabilito inizialmente. Il modo di trasporto utilizzato da ogni utente della simulazione coincide con il modo preferito a disposizione, noto dai dati socioeconomici.

Implementando il modello di Superblock nello Scenario Base, si ottiene lo Scenario Superblock. L'individuazione dei superblocks nell'area di studio in analisi comporta in primo luogo la modifica della rete stradale esistente e delle regole di circolazione su di essa. In particolare, si individuano delle zone "car-free", in cui l'accesso è consentito solo agli utenti che si spostano utilizzando modalità sostenibili (pedoni e ciclisti), caratterizzate pertanto da un basso livello di emissioni.

In seguito delle modifiche alla rete stradale esistente, anche il servizio pubblico necessita di essere modificato. Infatti, le linee di autobus componenti il servizio di trasporto pubblico non possono attraversare le aree interne ai bocchi, ma la loro circolazione è consentita solamente lungo il perimetro di questi ultimi. Di conseguenza, il percorso di tali linee potrebbe dover essere ridisegnato e le fermate potrebbero dover essere ricollocate. Inoltre, la limitazione del traffico e della circolazione dei mezzi motorizzati nei superblocks, può indurre uno shift modale, facendo emergere la necessità di potenziare il trasporto pubblico, incrementando la frequenza degli autobus ed eventualmente aggiungendo nuove linee.

La realizzazione dei superblocks comporta anche la perdita di tutti i parcheggi nelle aree interne ad essi, a favore della pedonalizzazione. La nuova configurazione dell'area di studio deve garantire spazio sufficiente per la realizzazione di nuovi parcheggi, in modo da consentire ai cittadini lasciare il proprio mezzo vicino alle abitazioni. A seguito di tale

considerazione, il numero di parcheggi in ogni superblock viene stimato nel modello, successivamente si valuta la collocazione dei parcheggi centralizzati, che eventualmente possono essere realizzati anche lungo il perimetro dei superblocks o sottoterra, ed infine si creano su SUMOPy. Infine, nel presente scenario si implementa anche l'inserimento di un nuovo sistema di trasporto: i taxi condivisi, anch'essi a servizio della popolazione virtuale della simulazione e assimilabili a un ulteriore sistema di trasporto pubblico. Risulta opportuno svolgere un attento dimensionamento del suddetto servizio e valutare se estendere o meno anche a questo modo di trasporto il divieto di ingresso nelle aree interne ai superblocks.

Anche la simulazione dello Scenario Superblock avviene adottando il metodo di assegnazione Anti-jam Routing ma, a differenza dello Scenario Base, in questo caso il modo di trasporto utilizzato si determina applicando il metodo "Relaxation", ovvero realizzando delle iterazioni che consentono agli utenti di scegliere il modo di trasporto dato dalla maggior utilità, in base alla situazione attuale. A ogni iterazione gli utenti adoperano un certo modo di trasporto, sulla base delle loro preferenze, e all'iterazione successiva, che coincide con una nuova giornata di simulazione, essi possono valutare se ripetere o meno la propria scelta sulla base dell'esperienza pregressa.

Lo Scenario PRT si realizza a partire dallo Scenario Superblock, inserendo un ulteriore mezzo di trasporto pubblico, il PRT. Nel dettaglio, si mantengono valide tutte le modifiche svolte nel precedente scenario, a cui si aggiunge la realizzazione di una nuova rete di trasporto pubblico e di nuove fermate. Particolare attenzione è rivolta alla coordinazione e cooperazione dei due servizi di trasporto pubblico; infatti, sempre in relazione alle necessità dei casi studio specifici, è necessario garantire contemporaneamente la collaborazione, la sovrapposizione e il funzionamento indipendente e autonomo dei due sistemi, coprendo l'intera area di studio analizzata e incentivando i trasporti intermodali.

La Fig. 3.b contiene in una rappresentazione schematica della metodologia adottata per la valutazione degli impatti prodotti sul trasporto pubblico locale derivanti dall'applicazione del concetto di Superblock e in una descrizione sintetica dei punti fondamentali dei tre scenari illustrati nel presente paragrafo.

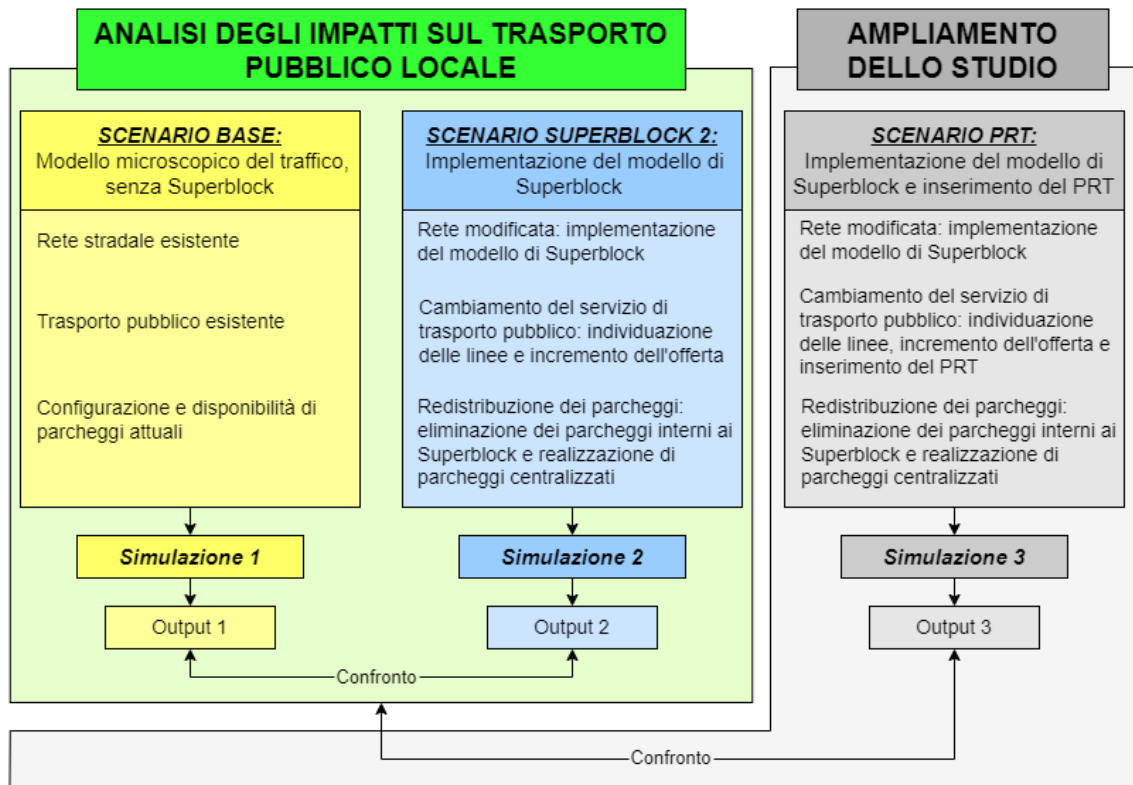


Fig. 3.b: Schema dell'approccio utilizzato per la valutazione degli impatti sul trasporto pubblico causati dalla realizzazione dei superblocks, individuazione e descrizione sintetica dei tre scenari considerati.

4. CASO STUDIO

4.1. Definizione dell'area di studio

4.1.1. Città di Bologna: descrizione e stato attuale

Bologna è una città italiana, situata a nord-est della penisola, e rappresenta il capoluogo della regione Emilia-Romagna. Grazie alla sua centralità, sia geografica sia economica, e grazie allo sviluppo avanzato delle infrastrutture stradali, autostradali, ferroviarie e aeroportuali essa costituisce un punto strategico per la mobilità nazionale. Infatti, la città comprende un bacino di utenza molto ampio in termini sia di abitanti, sia di aziende con una forte propensione all'export e all'internazionalizzazione e con politiche di espansione commerciale. La Fig. 4.a. [56] rappresenta una vista dall'alto del territorio della città di Bologna.



Fig. 4.a: vista dall'alto della città di Bologna

Bologna è una città di medie dimensioni che conta poco meno di 400 000 abitanti nella città stessa, Fig. 4.b [57], raggiungendo 1,02 milioni di abitanti [58] inserendo nel conteggio anche la popolazione che abita nell'area della Città Metropolitana di Bologna, caratterizzata da un'estensione complessiva di 3 702 km² [58].

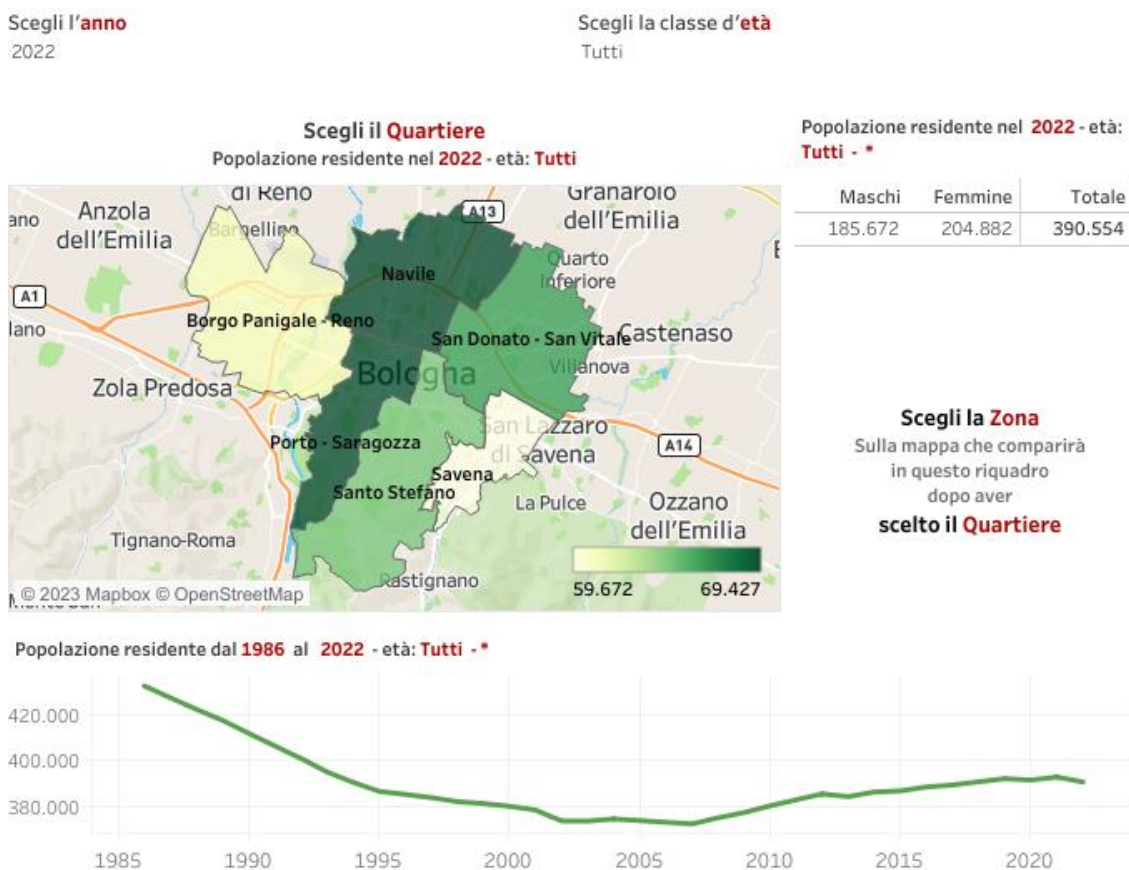


Fig. 4.b: dati relativi alla popolazione della città di Bologna

Proprio in relazione alla diversa estensione e caratteristiche geografiche della Città Metropolitana rispetto all'area comunale, i due territori sono caratterizzati da valori di ripartizione modale differenti. In particolare, nel territorio comunale, essendo contraddistinto da distanze più brevi e facilmente percorribili ed essendo maggiormente coperto dal servizio di trasporto pubblico, l'utilizzo dell'automobile è minore favorendo percentuali più elevate per le altre modalità come autobus, bicicletta, moto e gli spostamenti pedonali [59]. Infatti, dall'osservazione dei dati a disposizione [60] emerge l'eccessivo utilizzo dell'auto privata anche per spostamenti relativamente brevi, come gli spostamenti interni allo stesso comune e gli spostamenti tra la provincia di Bologna e Bologna, a discapito di forme di mobilità dolce quali la bicicletta e a piedi o più sostenibili come il trasporto pubblico locale.

Il comune di Bologna si estende su una superficie complessiva di quasi 141 km². La densità della popolazione a fine 2021 ammonta a 2 788 abitanti/km². Il centro storico, che si estende per 4,5 km², ha una densità abitativa maggiore, pari a 11 914 abitanti/km². Le zone periferiche, che comprendono anche una vasta area collinare, sono caratterizzate da densità comprese tra 10 272 abitanti/km², della popolosa zona Murri, ai 365 abitanti/km² della zona Colli [61]. Si specifica inoltre che ai residenti della città di Bologna si aggiungono circa 100 000 studenti universitari che contribuiscono al caricamento della rete cittadina e all'utilizzo delle strutture e infrastrutture; pertanto, la città risulta sottoposta a una grande pressione sulla rete stradale e l'inquinamento ambientale, l'incidentalità e il traffico costituiscono problematiche sempre più serie e rilevanti nel territorio.

La rete viaria della città di Bologna si estende per circa 50 km² [16]; la città è dotata di una rete stradale dettagliata, costituita da grandi infrastrutture come autostrade e strade principali, ma anche strade locali e di quartiere e infrastrutture che garantiscono gli spostamenti attraverso modalità di trasporto sostenibili, come piste ciclabili e sentieri pedonali. Una rappresentazione del modello di rete di Bologna, realizzato su QGIS, è riportata in Fig. 4.c.

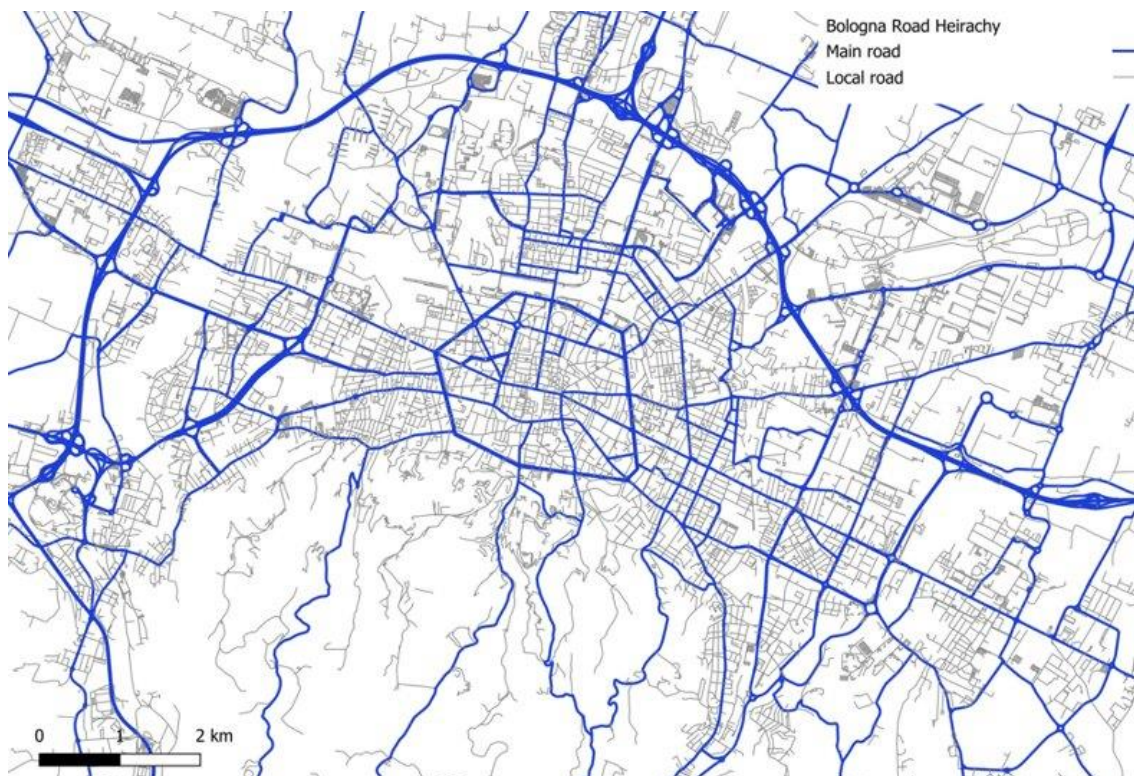


Fig. 4.c: rappresentazione grafica della rete della città di Bologna modellizzata su QGIS

Inoltre, l'insieme dei portici presenti nel territorio comunale rappresenta un'importante infrastruttura a servizio della mobilità cittadina, oltre che patrimonio culturale della città. Essi incarano un ruolo fondamentale relativamente alla circolazione pedonale di Bologna, e al contempo di uno dei punti di forza della mobilità in città. Con 62 km di lunghezza complessiva, di cui ben 42 km in centro e i restanti 20 km nelle aree periferiche, i portici di Bologna costituiscono un patrimonio di notevole valore per la città, una vera e propria infrastruttura a favore della mobilità pedonale, garantendo protezione da agenti atmosferici come pioggia e sole e una maggiore sicurezza per i pedoni, separandoli fisicamente dall'infrastruttura stradale e di conseguenza dagli altri utenti della strada [62].

Relativamente agli spostamenti pedonali e ciclabili, essi sono sicuramente favoriti e incentivati dalle caratteristiche climatiche locali; infatti, la temperatura media annua della città è leggermente inferiore ai 15°C e caratterizzata da scarse precipitazioni (circa pari a 700 mm di pioggia/anno e 74 giorni di pioggia all'anno) [53]. In particolare, negli ultimi anni la città è stata protagonista di numerosi interventi volti all'incremento dei percorsi ciclabili e delle aree destinate all'uso esclusivo dei pedoni. I grafici in Fig. 4.d (1) e (2) [63] rappresentano sinteticamente la crescita della diffusione di tali aree dall'inizio degli anni duemila ad oggi.

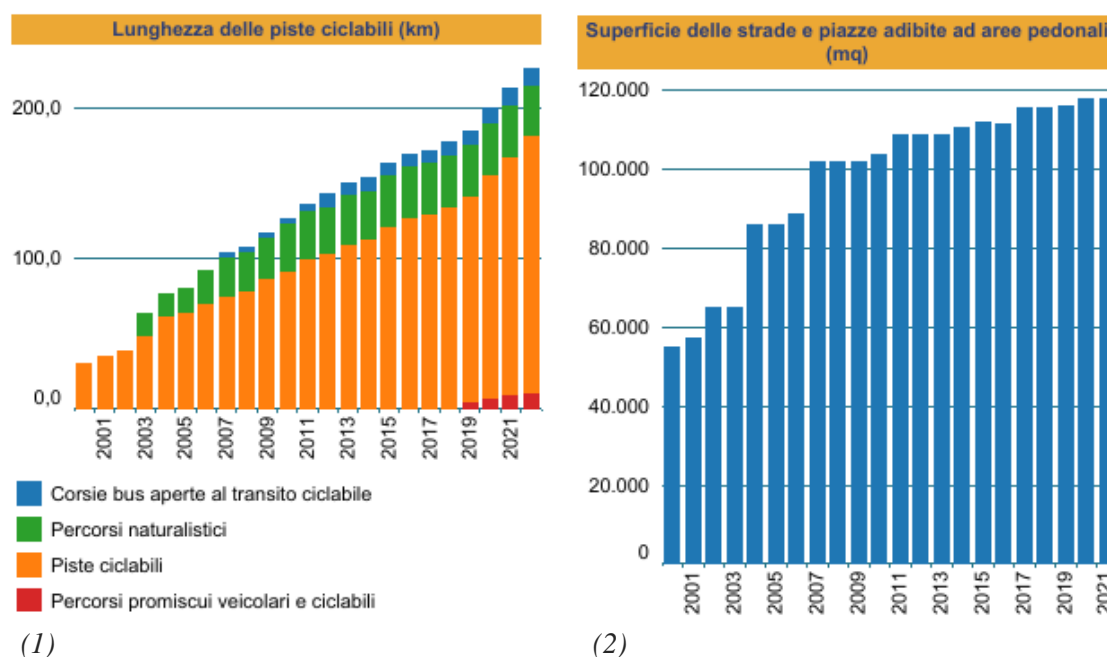


Fig. 4.d: grafici che mostrano l'incremento dei percorsi ciclabili (1) e delle aree pedonali (2) dal 2000 al 2022 nel comune di Bologna

4.1.2. Dati impiegati

Relativamente ai dati necessari per la ricostruzione delle matrici origine-destinazione (Paragrafo 3.2.2.), riferite alle ore di punta mattutina 6:00-8:00, per i principali modi di trasporto (auto, moto, bici, piedi e bus), essi stati ottenuti dal XIV Censimento della Popolazione e delle Abitazioni, condotto dall'Istituto Italiano di Statistica (ISTAT) nel 2001 [64]. Le matrici origine-destinazione sono state aggiornate all'anno 2018 considerando l'aumento della popolazione nelle varie zone della città di Bologna [16]. Si sottolinea che, considerando solamente l'ora di punta del mattino, la maggioranza degli spostamenti risulta essere di tipo sistematico, ovvero abituale, come ad esempio Casa-Lavoro o Casa-Scuola.

Nel territorio considerato, sono disponibili dati più dettagliati relativi all'area centrale della città di Bologna e si individuano ben 116 zone di traffico appartenenti al territorio comunale; riguardo l'area extraurbana della città di Bologna, si individuano 61 zone di traffico nel restante territorio della provincia [16], rappresentate nelle Fig. 4.e. (1) [52], (2) e (3). Applicando le procedure illustrate nei paragrafi 3.1 e 3.2.2, si realizzano le matrici per lo scenario oggetto di studio e successivamente vengono disaggregate per generare la popolazione sintetica [16].

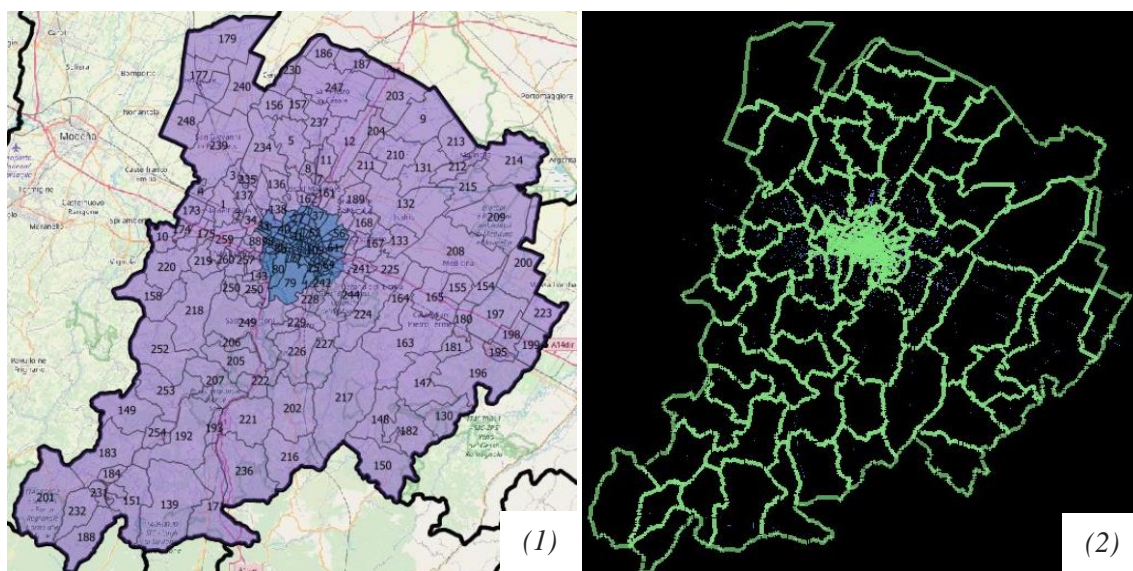


Fig. 4.e: rappresentazione delle zone di traffico nella città metropolitana di Bologna su QGIS (1) e su SUMOPy (2)



Fig. 4.e: rappresentazione delle zone di traffico nella città metropolitana di Bologna, zoom sulle zone nel centro di Bologna su SUMOPy (3)

In relazione alle tracce GPS (Paragrafo 3.2.3.), nella presente trattazione si utilizzano dati ottenuti nel mese di maggio 2016, nell'ambito di progetti promossi dal comune di Bologna per la sensibilizzazione della popolazione nei confronti del tema della mobilità sostenibile, si fa riferimento in particolare al progetto European Cycling Challenge 2016 (ECC). Si specifica che lo studio in oggetto si basa solamente sulle tracce relative alle ore di punta del mattino tra le 8:30 e le 10:30. [10] [16].

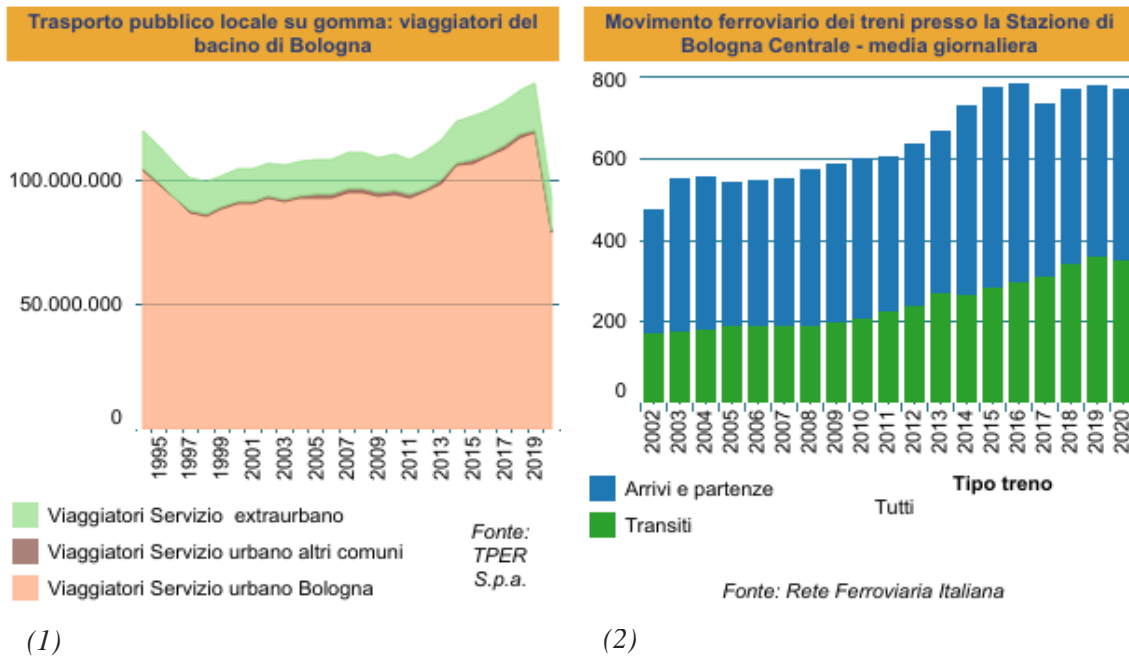
Tali dati GPS sono stati raccolti attraverso l'utilizzo di applicazioni per smartphone che raccolgono i dati caratteristici degli spostamenti ciclabili (ma anche a bordo di autobus, treni, auto in car-sharing o carpooling) dagli utenti partecipanti. Nello studio in oggetto si utilizzano i dati relativi all' ECC 2016 per la generazione della domanda ciclabile, per la fase di editing della rete e per la creazione del primo scenario, illustrati nel proseguimento [10].

Infine, sulla base dei dati GTFS (paragrafo 3.2.4) è stato modellato l'intero trasporto pubblico fornito dall'operatore locale, ovvero TPER [65], all'interno dell'area di simulazione, generando linee di autobus. I dati GTFS adoperati rappresentano il funzionamento del sistema di trasporto pubblico relativo a una giornata lavorativa di maggio 2018, durante il periodo dalle 6:00 alle 9:00, allo scopo di raggiungere il funzionamento a regime del servizio durante il tempo di simulazione analizzato (dalle 7:00 alle 8:00 della mattina) e di garantire che tutti gli utenti abbiano completato il proprio spostamento, anche al di fuori della fascia oraria simulata. Inoltre, i dati GTFS contengono le informazioni geografiche riguardanti posizioni delle fermate, percorsi delle linee di autobus, e gli orari precisi delle corse, relativi alla città di Bologna [16].

4.1.3. Trasporto Pubblico Locale

Pur essendo una delle più grandi città italiane, più di un terzo degli spostamenti realizzati a Bologna avviene attraverso modalità di trasporto sostenibili. Esistono diversi mezzi di mobilità sostenibile come piedi, bici, tram, bus, treno, metropolitana e mezzi elettrici, sia privati sia condivisi. Escludendo i modi non presenti attualmente a Bologna, come la metropolitana e il tram, quelle elencate sono tutte modalità di trasporto utilizzate abitualmente in città. La gestione della mobilità cittadina risulta molto complessa, in quanto deve interfacciarsi con molteplici e differenti esigenze personali, servizi collettivi e luoghi. Per garantire l'efficienza della mobilità a Bologna è indispensabile partire dallo studio e dall'analisi di dati, che rappresentano le abitudini quotidiane, passate e presenti, dei cittadini [62].

Considerando l'importanza economica e la centralità geografica della città di Bologna, essa è interessata da grandi volumi di traffico, sia su gomma, sia su ferro, sia su aria, la cui gestione rappresenta un aspetto molto critico e delicato. A titolo informativo, la Fig. 4.f (1) e (2) [66] mostra dei grafici che esprimono le serie storiche rispettivamente del volume annuale di utenti che viaggiano con il trasporto pubblico locale su gomma nel bacino di Bologna e dei movimenti medi giornalieri dei treni presso la stazione ferroviaria di Bologna Centrale.



(1)

(2)

Fig. 4.f: serie storiche dei viaggiatori che utilizzano il trasporto pubblico locale su gomma nel bacino di Bologna (1) e dei movimenti ferroviari medi giornalieri che interessano la stazione di Bologna Centrale (2)

Nella Città Metropolitana di Bologna, la gestione del trasporto pubblico è affidata a TPER (Trasporto Passeggeri Emilia-Romagna) [65]; TPER è una società di trasporti pubblici, nata in data 01/02/2012 a seguito della fusione di ATC e FER, rispettivamente la precedente azienda di trasporti pubblici su gomma di Bologna e Ferrara e la società regionale ferroviaria. La società realizzata rappresenta uno dei principali operatori di trasporto passeggeri in Italia ed è la più grande azienda dell'Emilia-Romagna per numeri e volumi di servizio nel settore di trasporto pubblico di persone [67].

Le attività di TPER riguardano diverse aree del settore trasportistico, tra cui quello automobilistico, filoviario e ferroviario di passeggeri. Infatti, la società gestisce il trasporto pubblico locale su gomma nei bacini provinciali di Bologna e Ferrara, il trasporto passeggeri in ambito ferroviario regionale, in collaborazione con Trenitalia (fondando la nuova società di Trenitalia-Tper [68]), e la sosta e i servizi complementari allo sviluppo della mobilità nel Comune di Bologna.

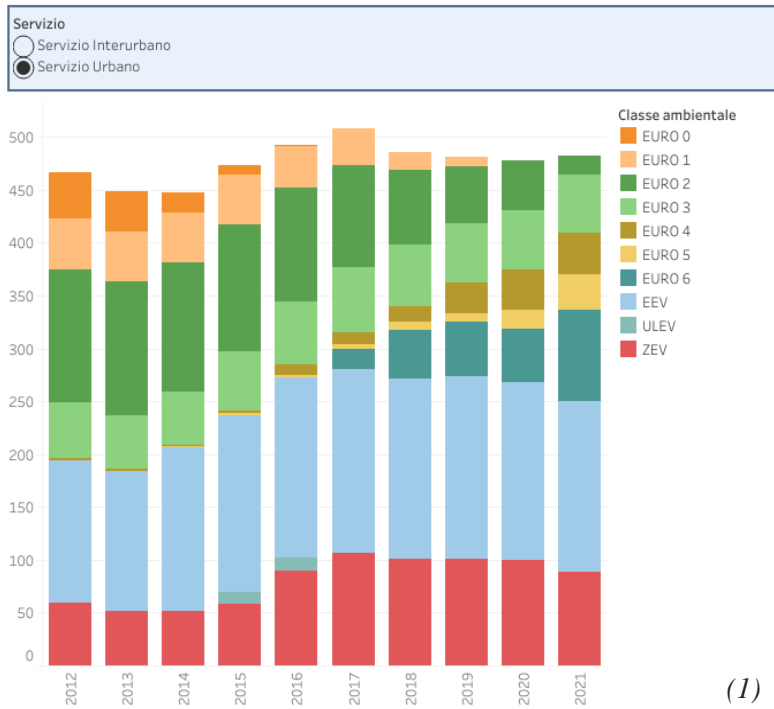
Inoltre, TPER ricopre anche il ruolo di soggetto attuatore di alcuni importanti interventi di sviluppo della mobilità nel territorio metropolitano bolognese, quali il completamento della filoviarizzazione delle linee portanti di bus ed il completamento del Servizio Ferroviario Metropolitano, oltre al sistema di trasporto pubblico su gomma a guida assistita, che prevede l'impiego dei veicoli filoviari Crealis. Infine, dal 2018, per soddisfare nuove e più flessibili esigenze di mobilità, in collaborazione con altri enti, TPER gestisce Corrente, un servizio car sharing a flusso libero 100% elettrico da fonti rinnovabili che opera a Bologna e Ferrara [67].

Pertanto, relativamente a Bologna, TPER gestisce il trasporto pubblico su gomma sia in ambito urbano sia in ambito extraurbano; questi due ambienti, contraddistinti da caratteristiche molto diverse, necessitano di servizi estremamente differenti tra di loro non soltanto da punto di vista della pianificazione ma anche relativamente all'erogazione del servizio stesso e la tipologia di veicoli adoperati. Nella presente trattazione si analizza in particolare l'ambito urbano della città di Bologna, sottolineando comunque l'importanza di osservare la suddetta area di studio inserita nel proprio contesto geografico, soprattutto in riferimento alla Città Metropolitana di Bologna e alla regione Emilia-Romagna.

Dall'inizio della sua gestione ad oggi, TPER ha apportato diversi miglioramenti al servizio offerto, in linea con gli obiettivi e la normativa vigente in ambito regionale e nazionale, illustrati nel dettaglio nel paragrafo seguente 4.4.1. Tali miglioramenti sono avvenuti sia a favore dell'ambiente, modificando aspetti quali il numero dei veicoli componenti la flotta, la loro alimentazione e la loro classe ambientale, sia a favore degli utenti, incrementando il livello di servizio offerto ai viaggiatori, in termini di accessibilità e comfort, ad esempio aumentando negli anni il numero di mezzi dotati di pedana, pianale ribassato e con aria condizionata, e in termini di offerta, intensificando ed estendendo il servizio anche nelle ore notturne.

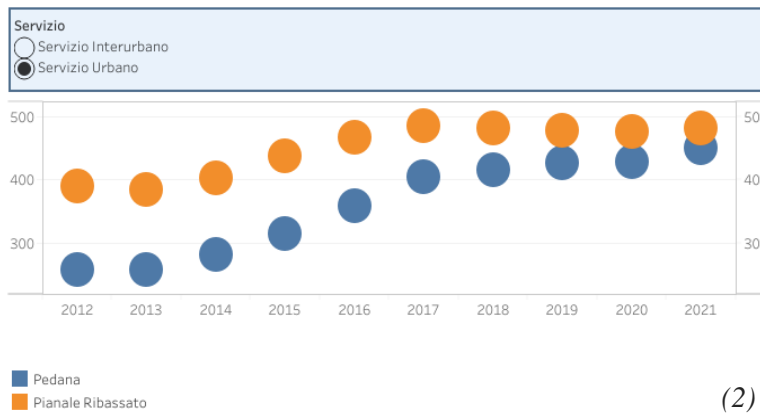
La Fig. 4.g (1) [69], (2) [70] e (3) [70] illustra graficamente l'andamento dei miglioramenti del servizio attuati dalla società TPER dal 2012 al 2021 in relazione ad aspetti quali la classe ambientale dei veicoli componenti la flotta (1), le caratteristiche di accessibilità e comfort (2) e la presenza del servizio di aria condizionata (3).

TPER Spa. Parco vetture - Numero mezzi per classe euro



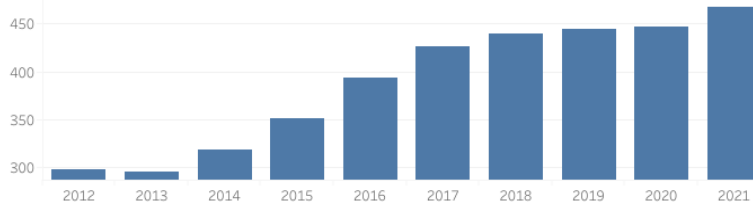
(1)

TPER Spa. Parco vetture - Numero mezzi urbani con diverse caratteristiche di accessibilità o di comfort



(2)

TPER Spa: parco vetture - numero mezzi urbani con aria condizionata



(3)

Fig. 4.g: serie storiche del miglioramento al servizio TPER in ambito urbano in termini di classe ambientale (1), accessibilità e comfort (2) e presenza di aria condizionata (3)

4.1.4. Quadro normativo attuale e obiettivi futuri

Come spiegato nel paragrafo precedente, la gestione della mobilità cittadina risulta molto complessa, in quanto deve considerare contemporaneamente diversi aspetti e interessi, interfacciarsi con molteplici e differenti esigenze personali, servizi collettivi e luoghi; pertanto, per gestire in maniera efficiente la mobilità della città di Bologna è indispensabile partire dalla raccolta e dalla successiva analisi di dati, che rappresentano le abitudini quotidiane, passate e presenti, dei cittadini. Il passaggio da un approccio più tradizionale a uno più innovativo comprende appunto la misurazione e il monitoraggio dei dati relativi agli spostamenti, anche quelli legati alla mobilità dolce, ovvero effettuati a piedi o in bicicletta. Infatti, uno degli obiettivi di pianificazione attuale, è proprio quello di togliere spazio pubblico alle automobili, per riconsegnarlo alla città e ai cittadini [62], obiettivo perfettamente coerente con i principi del modello di Superblock illustrati precedentemente. Per far fronte a una gestione così delicata e complessa, attualmente esistono diversi settori che si occupano di studiare e redigere strumenti in aiuto ai pianificatori.

Si specifica inoltre che la pianificazione dei trasporti rappresenta un tipo di pianificazione settoriale, caratterizzato da una pianificazione europea, una nazionale, una regionale e una locale. Infatti, il contesto programmatico delle infrastrutture di trasporto e logistica è caratterizzato da una notevole frammentazione dovuta all'esistenza di molteplici strumenti normativi. I suddetti strumenti di pianificazione dei trasporti, su cui le città e i comuni basano la programmazione e l'attuazione degli interventi, corrispondono a diverse esigenze e contesti. Strumenti di notevole importanza sono: il Piano Urbano del Traffico (PUT), il Piano Urbano della Mobilità (PUM) e il Piano Urbano della Mobilità Sostenibile (PUMS) [71].

Il Piano Urbano del Traffico (PUT) illustra un insieme di interventi coordinati per il miglioramento delle condizioni della circolazione stradale nell'area urbana, dei pedoni, dei mezzi pubblici e dei veicoli privati, realizzabili nel breve periodo e nell'ipotesi di dotazioni di infrastrutture e mezzi di trasporto sostanzialmente invariate nell'intervallo temporale di riferimento. In particolare, si riferisce a un arco temporale biennale e al perimetro del centro abitato e la sua attuazione risulta obbligatorio per i comuni maggiori di 30 000 abitanti o con un'affluenza turistica e/o pendolarismo che comporta il

raggiungimento del suddetto valore. I principali obiettivi del PUT sono il miglioramento delle condizioni di circolazione (movimento e sosta) e della sicurezza stradale, la riduzione dell'inquinamento atmosferico e acustico, il risparmio energetico e il rispetto dei valori ambientali [71].

Il Piano Urbano della Mobilità (PUM), più recente rispetto al PUT, è uno strumento di pianificazione sviluppato per un orizzonte temporale di medio/lungo periodo (10 anni) e su base volontaria da comuni con oltre 100 000 abitanti, riguardante sia il trasporto passeggeri, sia il trasporto merci. Esso comprende un insieme organico di interventi mirati al raggiungimento di molteplici finalità quali: il soddisfacimento del fabbisogno di mobilità, l'abbattimento dei livelli di inquinamento, la riduzione dei consumi energetici, dell'uso dell'automobile e dei fenomeni di congestione, l'incremento della capacità di trasporto e dei livelli di sicurezza, l'aumento della percentuale dei cittadini che utilizza il trasporto pubblico e la promozione dell'uso di mezzi alternativi. Tali obiettivi si raggiungono attraverso specifici interventi sulle infrastrutture di trasporto pubblico e privato, sulle tecnologie disponibili, sul parco veicolare, e attraverso interventi di governo sulla mobilità di carattere economico-gestionale [71].

Il Piano Urbano della Mobilità Sostenibile (PUMS) [72] rappresenta un'evoluzione del PUM, indotta a livello europeo. Esso si adotta su base volontaria, si riferisce a un bacino di utenza coincidente con l'agglomerazione urbana, è flessibile e ha come riferimento un orizzonte temporale di lungo periodo (20 anni), con verifiche e monitoraggio a intervalli di tempo predefiniti, che potrebbero comportare nel tempo integrazioni con nuove azioni e misure. L'innovazione del PUMS rispetto agli strumenti precedenti consiste nel mettere al centro le persone, con i loro diritti e le loro esigenze, attuando una pianificazione che coinvolge i diretti interessati attraverso un approccio trasparente e partecipativo per lo sviluppo di una mobilità sostenibile che ha come principi fondamentali la qualità delle infrastrutture e dei servizi e la vivibilità degli spazi e delle strutture della città. Esso è un piano strategico che si propone di soddisfare la domanda di mobilità di persone, merci e imprese in aree urbane e peri-urbane per migliorare la qualità della vita, l'accessibilità, la sostenibilità, l'equità sociale e la salute, seguendo i principi di integrazione, partecipazione, monitoraggio e valutazione [71].

Pertanto, il PUMS è uno dei principali strumenti di pianificazione nell'ambito della mobilità in quanto rappresenta contemporaneamente un elemento strategico e strumentale volto al raggiungimento degli obiettivi. Una delle finalità principali consiste nella riduzione del 40% delle emissioni derivanti dal traffico entro il 2030, in riferimento alle emissioni dell'anno 1990. Tale obiettivo risulta in linea con le indicazioni dell'Unione Europea per garantire il rispetto degli Accordi sul Clima di Parigi. Le componenti che contribuiscono a ottenere una riduzione delle emissioni da traffico pari al 40% sono date dal 28% dalla riduzione del traffico motorizzato privato e dal restante 12% dalla decarbonizzazione del parco veicolare attuale. Concretamente, questo comporterebbe che 440 000 degli attuali spostamenti svolti attraverso il traffico motorizzato, si avvalgano attraverso modalità di trasporto più sostenibili, come l'autobus o la bicicletta [73]. L'obiettivo individuato dall'Accordo di Parigi si declina nel PUMS attraverso l'individuazione di cinque obiettivi qualitativi, illustrati in Fig.4.h [73]: accessibilità, tutela del clima, salubrità dell'aria, sicurezza stradale e vivibilità e qualità.

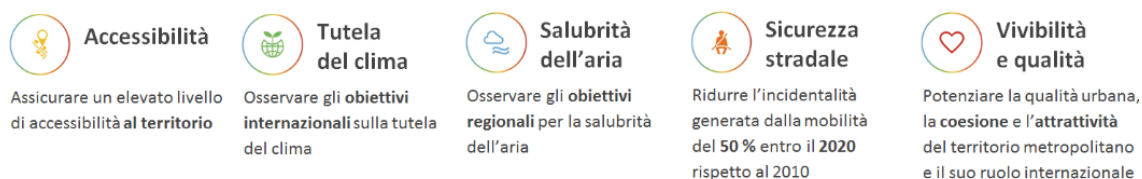


Fig. 4.h: obiettivi qualitativi principali del PUMS

Il compimento dei suddetti obiettivi è stato programmato e suddiviso in tre orizzonti temporali distinti: immediato (2020), intermedio (2025) e PUMS (2030), in modo da poter organizzare e distribuire il piano in azioni, fasi e strategie. Le principali aree di interesse sono la pianificazione territoriale, il trasporto pubblico metropolitano, la mobilità ciclistica, la pedonalità e lo spazio condiviso, la logistica, la mobilità innovativa e quella motorizzata, con particolare riferimento alla rete stradale [62].

Attuando osservazioni e monitoraggio e successivamente elaborando i dati ottenuti, una delle strategie individuate dal PUMS per ridurre l'impatto ambientale dovuto al traffico e migliorare la qualità della vita dei cittadini, è dato dalla determinazione di valori soglia per la ripartizione modale, definendo la quota percentuale di utilizzo dei vari mezzi. In particolare, i valori soglia sono differenti in relazione alla Città Metropolitana e a Bologna città e definiscono la quota percentuale obiettivo di utilizzo dei seguenti mezzi: automobile, mobilità pedonale, Trasporto Pubblico Metropolitano (TPM), bicicletta,

motociclo e altri tipi di mezzi. La Fig. 4.i [74] rappresenta un'illustrazione grafica del confronto tra la ripartizione modale attuale nell'area di Bologna città e la ripartizione modale che si vuole ottenere nella stessa area nel 2030.

Obiettivi Bologna Città

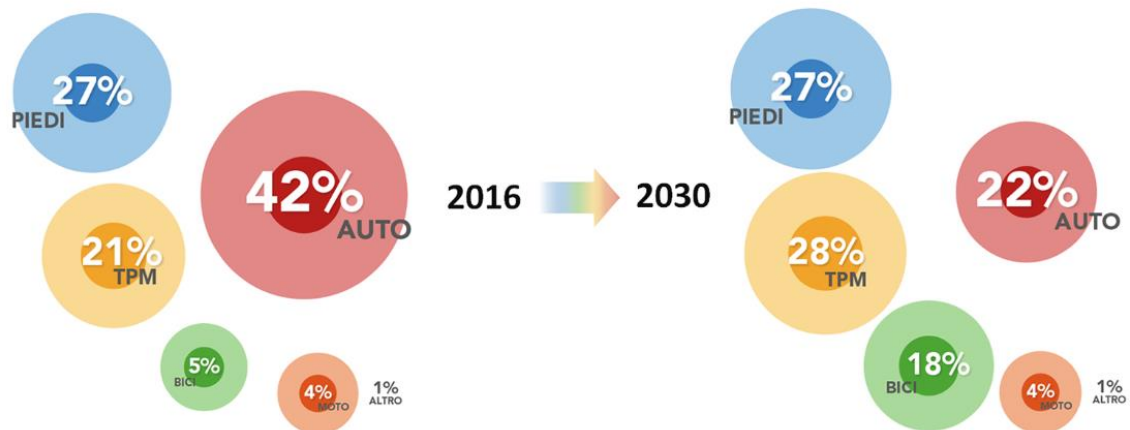


Fig. 4.i: confronto tra i valori di ripartizione modale all'anno 2016 e i valori obiettivo all'anno 2030 secondo il PUMS

4.2. Scenario Base

4.2.1. Introduzione

Come illustrato brevemente nel paragrafo 3.4. lo Scenario Base rappresenta il modello microscopico del traffico dell'area di studio, in questo caso Bologna città, e illustra la situazione attuale, fornendo la rappresentazione virtuale delle risorse fisiche, potenziali ed effettive del territorio analizzato. Infatti, lo Scenario Base riflette, per quanto più possibile, la realtà, basandosi sulla rete stradale esistente nella città di Bologna, sul sistema di trasporto pubblico esistente gestito da TPER, sugli edifici presenti nella realtà e sulla disponibilità e configurazione attuali dei parcheggi nell'area di studio. Le Fig. 4.j (1), (2), (3) e (4) illustrano alcuni estratti di tale scenario, raffigurati su SUMOPy, e caratterizzati da un diverso grado di dettaglio. In particolare (1) rappresenta il digital twin della rete di Bologna, (2) rappresenta il centro della città e le relative infrastrutture viarie, in blu; (3) rappresenta uno zoom su Porta Saragozza, i viali adiacenti e la sede della facoltà di ingegneria dell'Università di Bologna, comprendendo le infrastrutture viarie in blu e le strutture ed edifici rappresentati con colori differenti, come giallo, verde e viola a seconda della destinazione (residenziale, commerciale, industriale, ricreativa); (4)

rappresenta uno zoom su Porta Santo Stefano, i viali adiacenti, i giardini Margherita in basso a sinistra, e l’Ospedale Sant’Orsola in alto a destra.

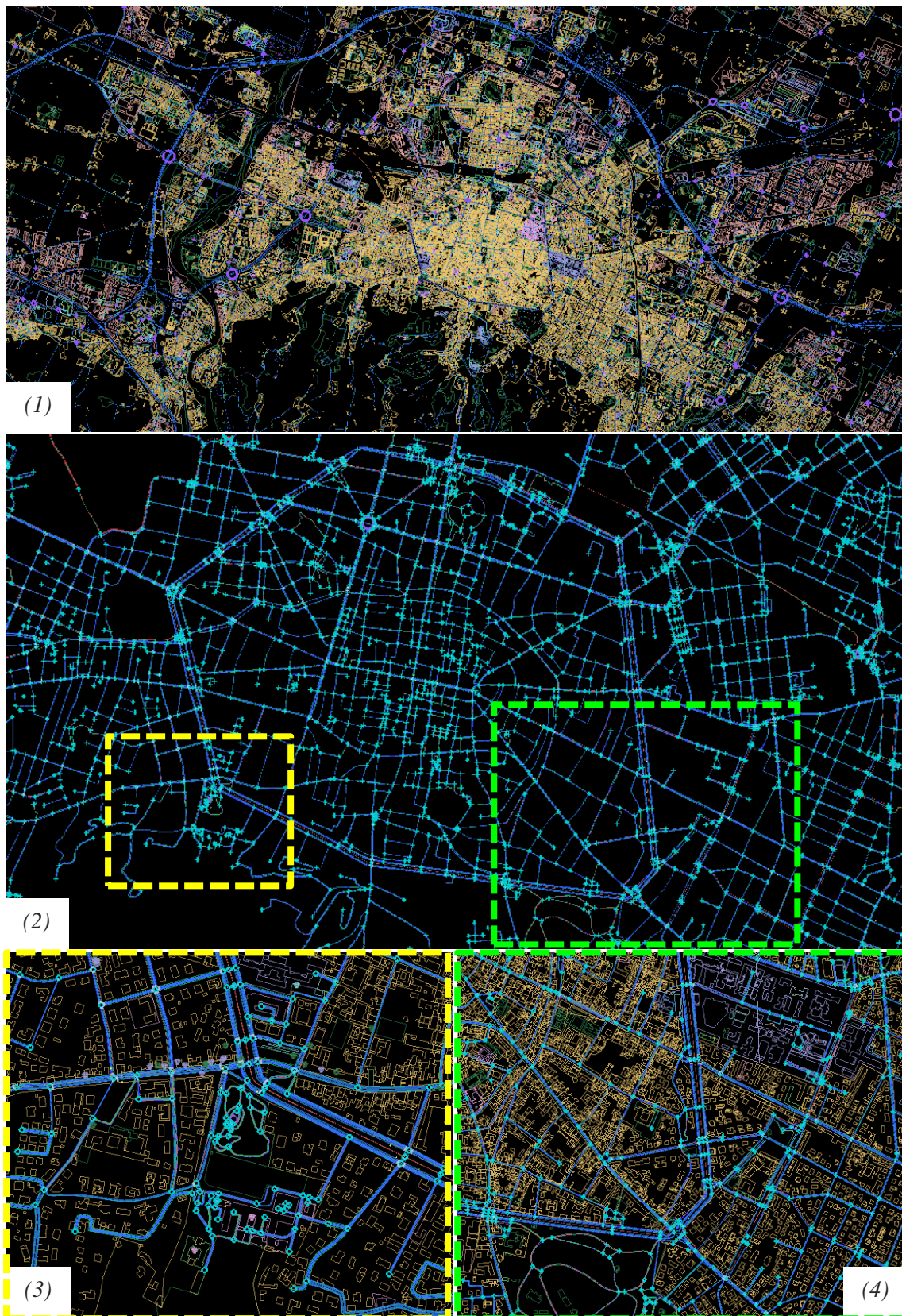


Fig. 4.j: estratti dello Scenario 1 da SUMOPy; (1) digital twin di Bologna, (2) centro della città, internamente alle mura, (3) zoom su Porta Saragozza, (4) zoom su Porta Santo Stefano

4.2.2. Operazioni preliminari: editing della rete e conteggio parcheggi disponibili

Utilizzando come base uno scenario della città di Bologna precedentemente realizzato nell'ambito di alcuni studi condotti dal DICAM dell'Università di Bologna [16], si sono apportate alcune modifiche. In particolare, lo scenario preesistente è costituito dalla rete della città di Bologna, inizialmente ricavata da "OpenStreetMap" [51] dal Prof. Ing. Joerg Schweizer durante la fase iniziale di creazione dello scenario e successivamente oggetto di ripetute modifiche e miglioramenti da parte di collaboratori, dottorandi, tirocinanti e tesisti, volte a renderla il più realistica possibile ed aggiornata [10].

Il modello di offerta risulta composto da un insieme elementi fisici e componenti organizzative e normative. Come elementi fisici si intendono le componenti che consentono una rappresentazione dettagliata della reale infrastruttura, ne sono esempi le corsie stradali, i marciapiedi, le piste ciclabili, gli attraversamenti pedonali e gli impianti semaforici, ma anche elementi come i parcheggi e il servizio di trasporto pubblico locale. Come componenti organizzative e normative si intendono i sistemi che disciplinano la circolazione, come ad esempio le regole di precedenza, la segnaletica stradale e la fasatura degli impianti semaforici [10].

Nell'ambito della presente trattazione si è provveduto a dettagliare ulteriormente su SUMOPy la rete di trasporto esistente, in particolare controllando la regolamentazione degli accessi dei vari archi; due esempi sono la regolamentazione degli accessi nelle Zone Traffico Limitato (ZTL) e nelle corsie preferenziali. Le ZTL rappresentano interi archi e aree della rete centrale di Bologna in cui circolazione risulta vietata alle automobili private e consentita solo ad autobus e specifici veicoli autorizzati come taxi, trasporto disabili, veicoli di soccorso e, in alcuni casi, mezzi a due ruote. Le corsie preferenziali rappresentano corsie facenti parti di archi in cui è consentita la circolazione di ogni mezzo, ma queste specifiche corsie risultano dedicate alla circolazione di date categorie di veicoli, quali autobus, taxi e veicoli emergenziali, in modo da favorirne e accelerarne gli spostamenti.

A seguito dello svolgimento di alcune simulazioni di prova, si è notato un livello eccessivo di congestione della rete in corrispondenza di aree inattese, probabilmente

dovuto a un'errata riproduzione dei movimenti del flusso pedonale. Pertanto, si è provveduto a dettagliare su SUMOPy ulteriormente la rete di trasporto esistente anche attraverso l'inserimento di attraversamenti pedonali, volti a garantire la connessione di tutti gli elementi della rete e rendere più realistica la circolazione dei pedoni nella simulazione.

Entrambe le operazioni di editing della rete svolte, si sono realizzate attraverso "Netedit", un'applicazione parte del pacchetto di SUMOPy, che consente di realizzare e modificare le reti di trasporto. Tramite Netedit è possibile sia modificare reti già esistenti, importate da altri programmi, sia disegnare nuove reti, senza riferimenti precedenti. L'applicazione consente di realizzare e modificare gli elementi base di una rete, come i nodi e gli archi, e di arricchirli modificando il numero delle corsie per senso di marcia e offrendo la possibilità di aggiungere corsie riservate al moto esclusivo di pedoni, biciclette o mezzi pubblici. Inoltre, nel programma è possibile modificare la geometria di ogni elemento in modo da ottenere le caratteristiche desiderate; per ogni elemento realizzato, è possibile consultare e modificare le proprietà tramite appositi comandi.

Infine, per dettagliare ulteriormente lo scenario esistente, si è provveduto a realizzare un database relativo ai parcheggi disponibili nella città di Bologna. Nel modello precedente SUMOPy ipotizzava la presenza di parcheggi orizzontali in tutte le strade con date caratteristiche (ad esempio per tutte le strade lunghe maggiore di una certa quota, in modo da lasciare la distanza di sicurezza necessaria dalle intersezioni adiacenti). Tali approssimazioni non possono essere adottate nel presente studio in quanto, applicando il modello di Superblock è necessario conoscere il numero esatto dei parcheggi rimossi per poter stabilire la quantità di parcheggi da provvedere esternamente ai superblocs, attraverso la realizzazione di parcheggi centralizzati. Pertanto, si è svolto un conteggio dei parcheggi della città di Bologna attraverso le immagini satellitari disponibili su Google Maps, considerando le seguenti caratteristiche: parcheggi presenti in un lato o in entrambi i lati della strada e inclinazione dei parcheggi (a spina, obliqui, orizzontali). Grazie alla collaborazione con il dipartimento, si è provveduto a implementare i dati, determinati in relazione a ogni arco della rete, su SUMOPy e a inserire nel programma una funzione che permettesse il conteggio dei parcheggi disponibili in un'area selezionata.

4.2.3. Trasporto pubblico

Il trasporto pubblico presente nello Scenario Base si basa sul servizio realmente offerto da TPER, rappresentato in Fig. 4.k (1) e (2) [75].



Fig. 4.k: rete del servizio di trasporto pubblico offerto da TPER, aggiornato in data 2019, nella città di Bologna (1) e zoom sull'area centrale della città (2)

Il servizio di trasporto pubblico dello Scenario Base si realizza su SUMOPy grazie ai dati GPS e GTFS (paragrafi 3.2.3, 3.4.2 e 4.1.2), di cui si fornisce una rappresentazione grafica in Fig. 4.k, realizzata attraverso QGIS.

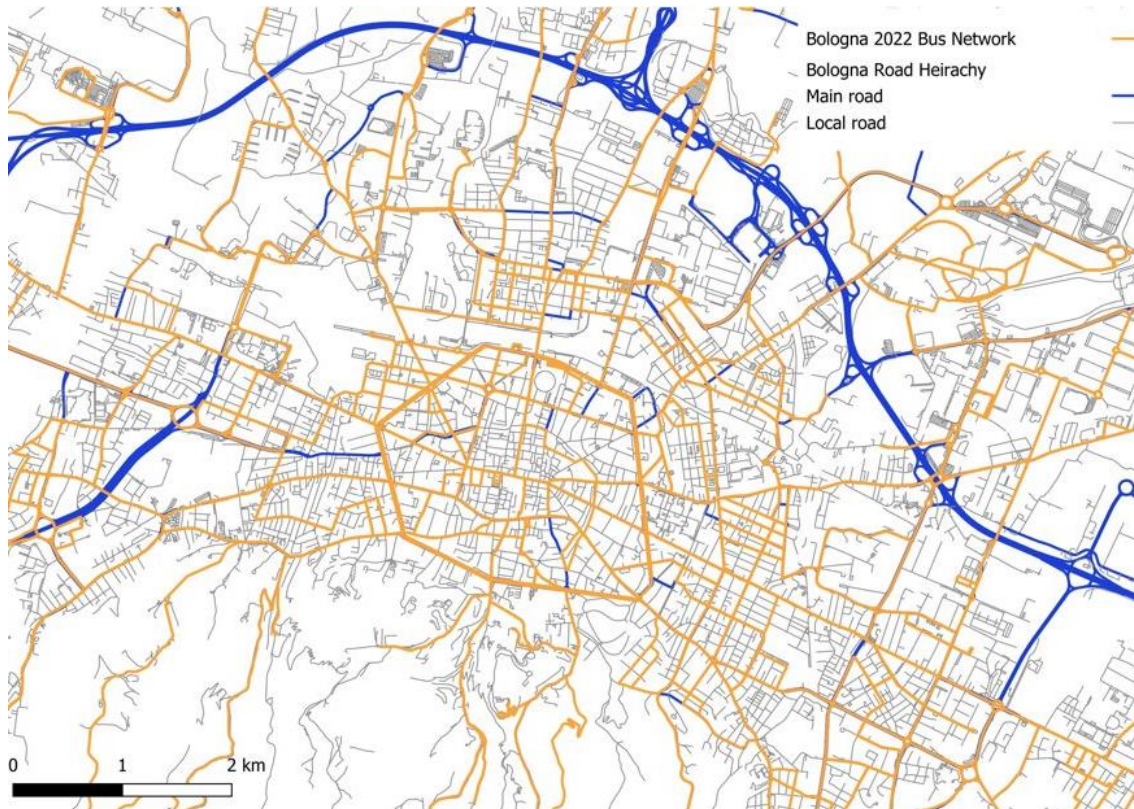


Fig. 4.l: rappresentazione delle tracce GPS del servizio di trasporto pubblico offerto da TPER sulla rete della città di Bologna

Rispecchiando il più possibile la realtà, il servizio si compone di 59 linee di autobus che riproducono i percorsi, le fermate e le frequenze delle linee reali corrispondenti. Su SUMOPy sono specificate per ogni linea alcune informazioni relative alle caratteristiche del servizio offerto, tra cui il nome della linea (“Line name”), l’orario di inizio e fine servizio (“Begin time [s]” e “End time [s]”), la sequenza degli IDs delle fermate che compongono la linea (“PT stops IDs”) e il tipo di veicolo che effettua il servizio (“Veh. type ID”).

4.3. Scenario Superblock

4.3.1. Introduzione

Come illustrato brevemente nel paragrafo 3.4., lo Scenario Superblock si ottiene implementando il modello di Superblock nello Scenario Base, in particolare individuando la configurazione dei superblocks nella città di Bologna secondo i criteri descritti nel paragrafo 3.3 e rappresentandola su SUMOPy.

L'identificazione dei superblocks comporta la modifica della rete stradale esistente e delle regole di circolazione su di essa. Nel dettaglio, si individuano delle zone "car-free", coincidenti con le aree interne ai blocchi definiti, in cui l'accesso è consentito solo agli utenti che si spostano utilizzando modalità sostenibili, ovvero solamente a pedoni e ciclisti. Le operazioni di editing della rete necessarie sono possibili attraverso Netedit, che consente nuovamente di regolamentare gli accessi degli utenti sugli archi della rete. In particolare, dopo aver individuato i superblocks nella città di Bologna, si procede vietando l'accesso, nelle aree interne ai superblocks e delimitate dalla rete principale, agli utenti che si spostano utilizzando mezzi motorizzati privati e con l'autobus.

Ulteriore conseguenza della realizzazione dei superblocks, è la rimozione di tutti i parcheggi nelle aree interne ad essi, a favore della pedonalizzazione. Dopo aver stimato il numero di parcheggi in ogni superblock, grazie ai dati presenti nel database descritto nel paragrafo 4.2.2., si valuta la collocazione dei parcheggi centralizzati, nel successivo paragrafo 4.3.2. Infine, a seguito delle modifiche nella rete stradale della città di Bologna, anche il servizio pubblico reale, gestito da TPER, necessita di essere modificato, sia in termini di percorso delle linee esistenti, sia in termini di frequenza, secondo le procedure illustrate nel paragrafo 4.3.3 nel proseguimento della trattazione.

4.3.2. Individuazione dei superblocks e dei parcheggi centralizzati e creazione del servizio taxi

Solitamente, il modello di Superblock si applica in corrispondenza dei quartieri e zone ad alta densità in quanto tali aree sono più esposte agli effetti negativi dovuti a un'elevata

concentrazione urbana e sono potenzialmente più adatte alla realizzazione di alternative legate alla mobilità sostenibile [55]. Coerentemente con tale considerazione, si è proceduto analizzando la densità abitativa della città di Bologna, per individuare le zone in cui il modello di Superblock potesse essere applicato con maggior successo. In particolare, tutta l'area del centro storico dentro le mura e la prima periferia, compresa in una corona circolare di raggio di circa 2 km a partire dai viali, risultano adatte per l'identificazione dei superblocks in termini di densità, ad esclusione di zona Lama (in alto a sinistra) e della zona colli (sottostante Viale Aldini e Viale Panzacchi, in basso).

Basandosi sull'infrastruttura reale della città di Bologna compresa nell'area così individuata, si è ipotizzato una prima configurazione di partenza per applicare il modello di Superblock. Tale configurazione iniziale si determina facendo coincidere le strade principali e più trafficate della città, definite sulla base della conoscenza dell'area di studio e sulla visualizzazione su Google Maps, con la rete di base nel modello urbanistico oggetto di studio, individuando così una gerarchizzazione. A partire dalla prima configurazione ipotizzata, si sono succedute numerose modifiche sulla base dei criteri definiti nel paragrafo 3.3., fino alla determinazione della configurazione definitiva.

Un primo aspetto fondamentale da analizzare riguarda l'estensione dei superblocks. Le dimensioni e l'estensione dei singoli elementi risultano aspetti critici dell'applicazione del modello urbanistico studiato in quanto, considerando le modalità non motorizzate come prevalenti all'interno dei superblocks, risulta necessario garantire che tutti gli spostamenti di pedoni e ciclisti avvengano in intervalli di tempo ragionevoli, anche per spostarsi da un estremo all'altro dei blocchi. D'altra parte, si sottolinea come, affinché siano garantiti i servizi essenziali ai cittadini, sia necessario considerare la presenza di un numero sufficientemente elevato e vario di "Points Of Interest" (POIs); tale numero risulta ovviamente maggiore in corrispondenza di aree più vaste, a parità di densità abitativa.

Pertanto, l'estensione dei blocchi è il risultato del compromesso tra blocchi di dimensioni ridotte, per garantire brevi spostamenti pedonali, e blocchi più ampi, per garantire la presenza dei servizi necessari. In particolare, considerando le caratteristiche della popolazione, la morfologia del territorio e la velocità media per gli spostamenti pedonali, si individuano blocchi con estensione pari circa a 0,30 km², salvo poche eccezioni date

da particolari conformazioni del territorio e delle infrastrutture. L'estensione individuata garantisce che gli spostamenti tra un qualsiasi punto interno al blocco e la rete principale più vicina non siano maggiori di cinque minuti a piedi. Infine, si evidenzia che il valore di superficie considerato risulta leggermente maggiore rispetto ai criteri presenti in letteratura; tale osservazione non costituisce un problema in quanto i criteri illustrati nel paragrafo 3.3. non rappresentano dei requisiti stringenti ma degli elementi di valutazione utili nell'identificazione di uno schema primario di superblock, che deve però adattarsi alla specifica area di studio considerata.

In secondo luogo, si analizzano le infrastrutture esistenti nell'area oggetto di studio. È necessario che tutte le strade che costituiscono il perimetro dei blocchi siano larghe, spaziose e soprattutto che siano in grado di garantire la circolazione, in entrambi i sensi di marcia, sia del traffico stradale sia del trasporto pubblico locale. In molti dei casi analizzati, tali strade coincidono con quelle realmente percorse dal servizio di trasporto pubblico esistente. Particolare attenzione si è dedicata alle infrastrutture viarie interessate dal passaggio più di una linea di trasporto pubblico, come avviene ad esempio in Via Saffi, Via Marconi, Via Indipendenza e Via Mazzini, rappresentate nelle rispettive Fig. 4.m (1), (2), (3) e (4) [75].



Fig. 4.m: esempi di strade in cui passano numerose linee del servizio di trasporto pubblico gestito da TPER; Via Indipendenza (1), Via Marconi (2), Via Saffi (3), Via Mazzini (4)

Nel dettaglio, si considerano strade di notevole importanza quelle in cui avviene il passaggio di tre o più linee di trasporto pubblico, proprio come quelle rappresentate nella Fig. 4.m. Infatti, nella presente trattazione si valuta che, se una o due linee attraversano il perimetro di un superblock, il percorso delle suddette linee può essere ridisegnato, passando esternamente ai blocchi individuati. D'altra parte, in presenza di tre o più linee che attraversano un superblock, si ritiene che l'eventuale sistema di trasporto pubblico modificato si discosti troppo da quello reale e non rifletta l'effettiva importanza delle strade della rete cittadina; pertanto, in questo secondo caso, si procede modificando la configurazione o il perimetro dei superblocks considerati.

Coerentemente con i criteri e le osservazioni precedenti, si è individuata la configurazione finale dei superblocks, utilizzata nella presente trattazione. La Fig. 4.n (1) e (2) rappresentano e la configurazione dei superblocks ottenuta alla fine dell'analisi vista dall'alto (1) e la configurazione dei superblocks sovrapposta alla rete modellizzata di Bologna e a una scala cromatica che mostra la densità abitativa nelle varie aree della città (2), entrambe realizzate su QGIS.

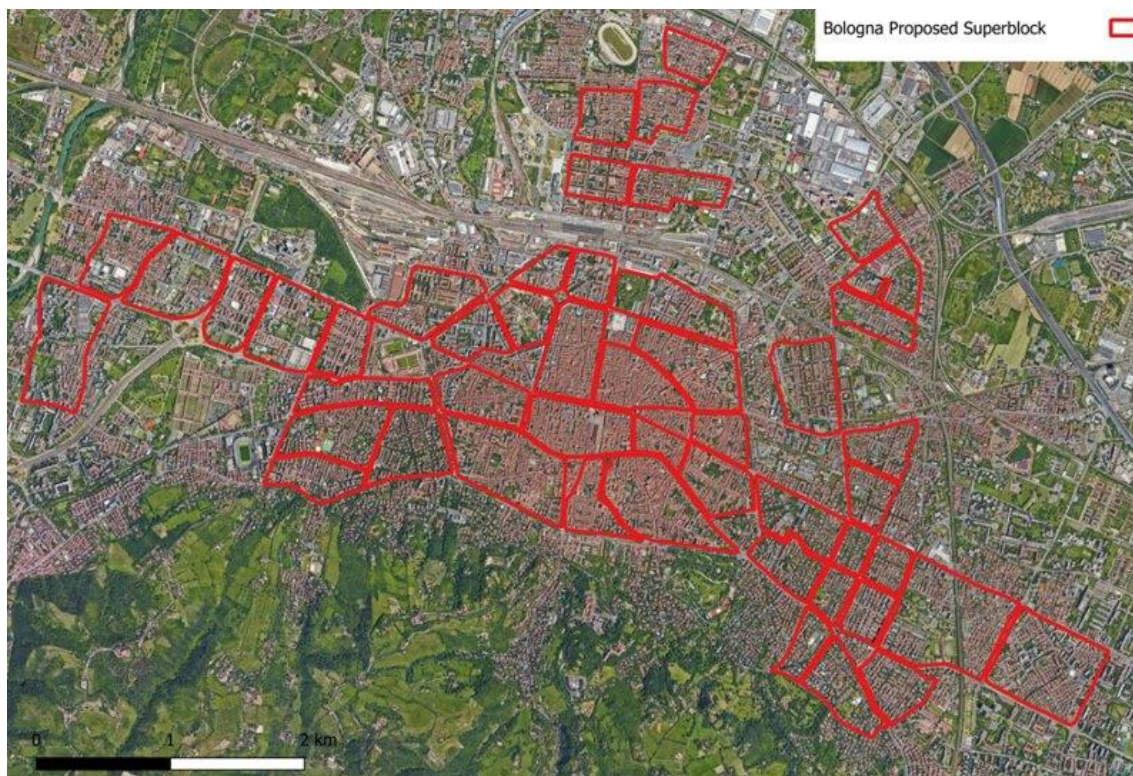


Fig. 4.n: (1) configurazione definitiva dei superblocks sovrapposta alla rete modellizzata di Bologna, realizzata attraverso QGIS

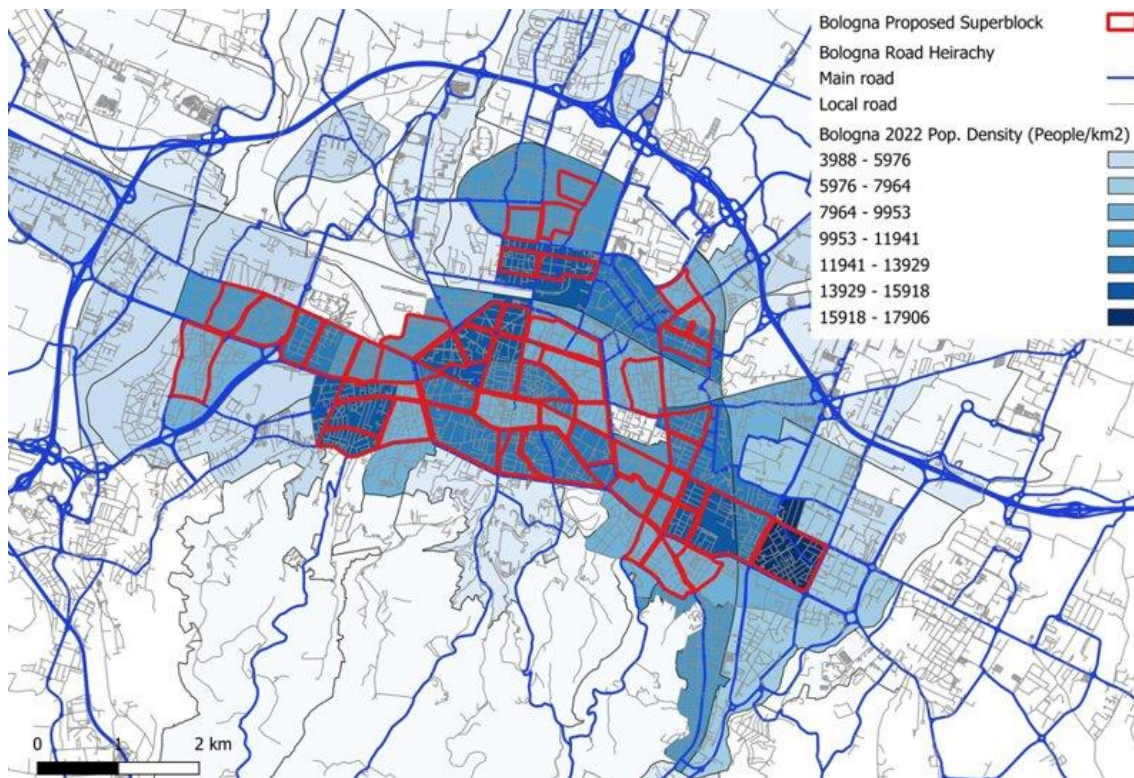


Fig. 4.n: (2) configurazione definitiva dei superblocks vista dall'alto e sovrapposta alla rete modellizzata della Bologna, in cui si riporta anche la densità abitativa delle varie aree della città attraverso una scala cromatica, realizzata attraverso QGIS

Altri aspetti da considerare sono la presenza di aree disponibili e spazi inutilizzati, la possibilità di ricavarli attraverso interventi futuri di riorganizzazione spaziale, la presenza di ampi parcheggi esistenti, pubblici o privati, ed eventuali piani comunali per la realizzazione di questi ultimi. Tali aspetti, più che criteri di identificazione, costituiscono parte dell'analisi da svolgere a valle della determinazione della configurazione dei superblocks. Infatti, una configurazione si considera definitiva se, oltre al rispetto dei criteri descritti, offre un certo numero di parcheggi disponibili. Rendendo le strade interne ai superblocks inaccessibili ai mezzi motorizzati, nella rete interna non è possibile parcheggiare le auto private; per garantire agli utenti la possibilità di parcheggiare, un'alternativa è rappresentata dall'utilizzo dei suddetti spazi per la creazione di ampi parcheggi centralizzati, anche multipiano. Alcuni esempi di parcheggi esistenti nella città di Bologna sono il parcheggio Staveco, su Viale Panzacchi, i parcheggi interrati di Via Riva Reno e Piazza VIII Agosto e altri, visualizzabili e prenotabili online [76] [7]. Tali aree si ricercano in prossimità del perimetro dei superblocks, in modo che i guidatori possano lasciare la loro macchina esternamente, per poi entrare nei blocchi, attraversarli a piedi o in bici e raggiungere la loro abitazione.

In assenza di tali spazi, si valuta la possibilità di realizzare parcheggi centralizzati multipiano e interrati, individuando aree potenziali per la concretizzazione di tali opere. La Fig. 4.o rappresenta alcune delle potenziali aree individuate e utilizzabili come parcheggi centralizzati (1) e le aree considerate e destinate come parcheggi nella configurazione dei superblocks definitiva (2).

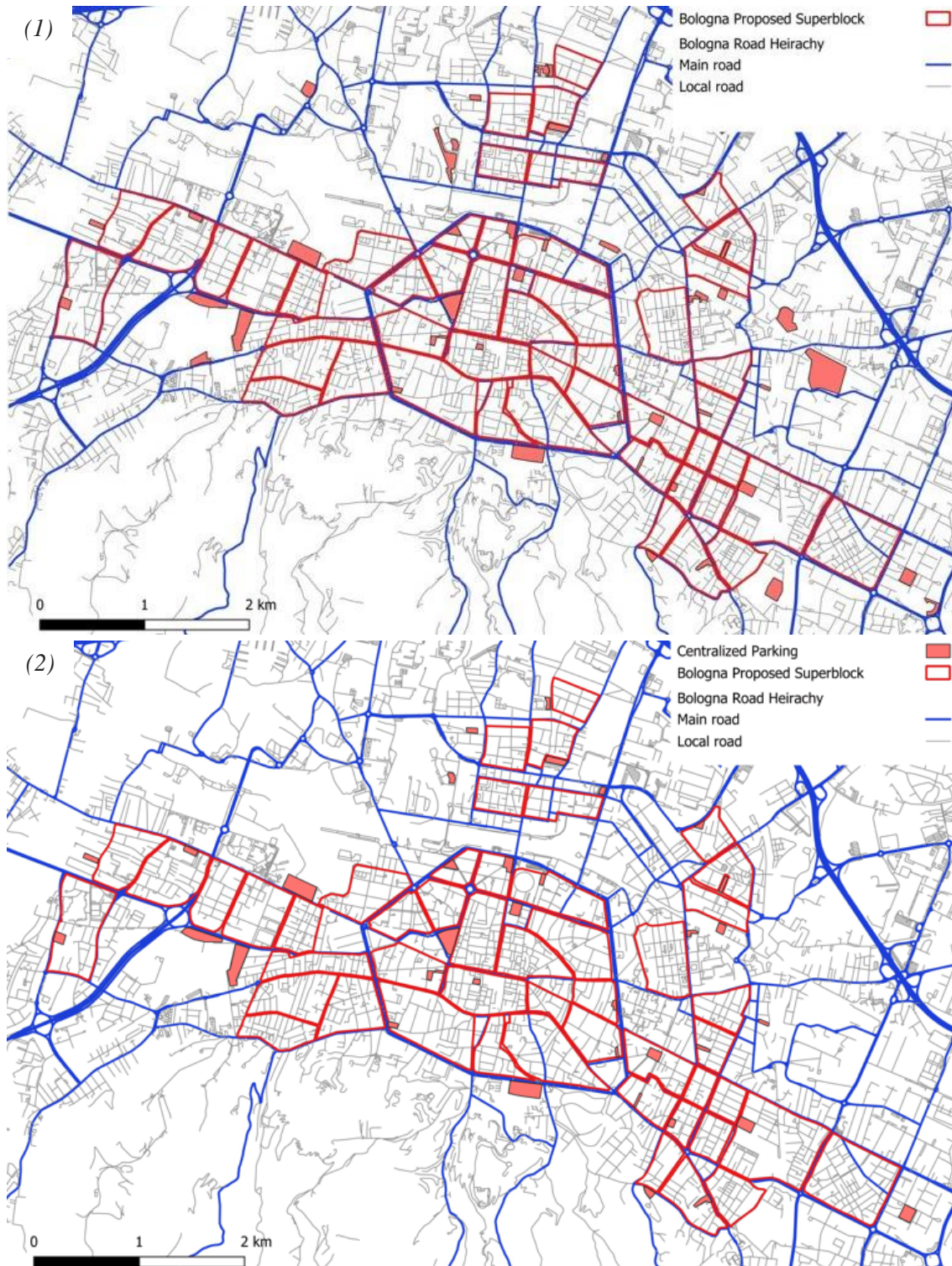


Fig. 4.o: rappresentazione delle aree potenziali utilizzabili come parcheggi (1) e delle aree effettivamente considerate come parcheggi centralizzati nella configurazione definitiva (2)

Infine, si implementa il servizio di trasporto costituito dai taxi condivisi. In particolare, si inseriscono 5 taxi per ognuno dei 49 superblocs, introdotti in due fasi, sia nella prima ora, sia nella seconda ora di simulazione, per un totale di 490 taxi disponibili. Per disincentivare ulteriormente gli spostamenti motorizzati con veicoli privati, si decide di consentire l'ingresso ai taxi condivisi all'interno dei superblocs, rendendoli un'alternativa molto attraente per la popolazione

4.3.3. Individuazione delle nuove linee di trasporto pubblico

Come mostra la Fig. 4.p, sovrapponendo le linee dello Scenario Base alla configurazione definitiva di superblock precedentemente individuata, risulta che 20 delle 59 linee esistenti attraversano i blocchi.

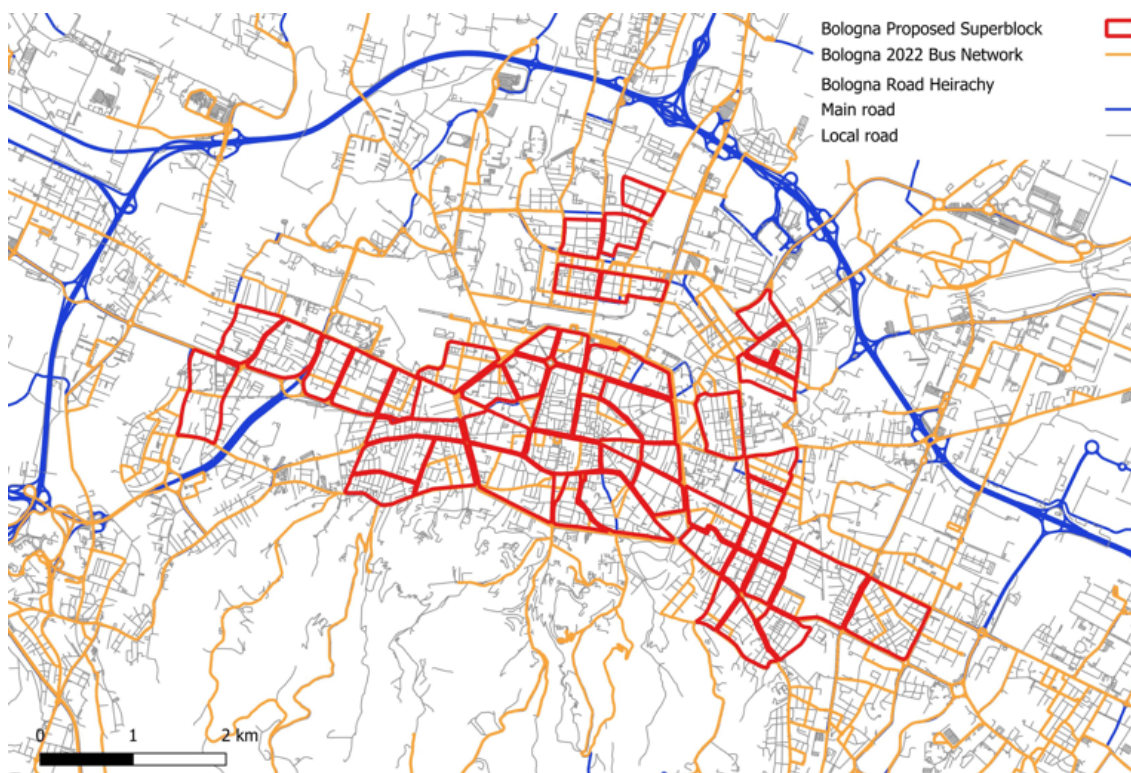


Fig. 4.p: rappresentazione dei percorsi delle linee di trasporto pubblico dello Scenario Base, sovrapposte alla configurazione di Superblock individuata

Le 20 linee dello Scenario Base che attraversano i blocchi non sono compatibili con l'applicazione del modello di Superblock, dunque vengono eliminate. In seguito, si procede realizzando delle nuove linee, in sostituzione di quelle rimosse, il cui percorso si sovrappone alle linee dello Scenario Base nei tratti esterni ai superblocs e si discosta dalle linee dello Scenario Base nei tratti che attraversano i superblocs.

La deviazione dei percorsi si realizza ridisegnando gli itinerari secondo i seguenti criteri: i nuovi itinerari passano esternamente ai superblocchi, non attraversandone nessuno, si discostano il meno possibile dagli itinerari delle linee eliminate e provano a sfruttare la presenza di fermate già esistenti in corrispondenza di cui far accedere gli utenti al servizio di trasporto pubblico. Si sottolinea che le linee dello Scenario Base che non attraversano i blocchi individuati mantengono il loro itinerario inalterato. Inoltre, il paragrafo seguente (4.3.4) è dedicato alla spiegazione di come creare un servizio di trasporto pubblico su SUMOPy, illustrando dunque il procedimento utilizzato per la realizzazione delle nuove linee.

Nello scenario attuale, in cui il trasporto privato appare disincentivato, risulta necessario potenziare il servizio di trasporto pubblico locale e le modalità dolci. Relativamente alle modalità dolci, il concetto di Superblock si basa intrinsecamente sul riconsegnare lo spazio della città occupato dalle automobili, ai pedoni, garantendo elevati standard di vivibilità e un'ampia disponibilità di spazi verdi e aree pedonali. Relativamente al servizio di trasporto pubblico esistente, esso necessita di essere potenziato per poter soddisfare la necessità di mobilità della popolazione e per renderlo un'alternativa ancor più attraente e competitiva con le altre esistenti.

Osservando che le linee definite nello Scenario 2 coprono ampiamente la rete considerata, si ritiene opportuno ottenere tale potenziamento incrementando la frequenza del servizio di trasporto pubblico nell'intervallo di simulazione considerato, ovvero aumentando il numero di veicoli che partono in una certa unità di tempo, per ogni linea realizzata. Si sottolinea che la "frequenza", espressa in veicoli per unità di tempo [veh/tempo] costituisce il concetto inverso di "cadenza", che rappresenta l'intervallo temporale tra il passaggio di due veicoli successivi, espressa in generalmente in minuti. Pertanto, se la frequenza aumenta, la cadenza diminuisce.

Nella presente trattazione, basandosi sull'osservazione reale della città di Bologna, si valuta di diminuire tutte le cadenze delle linee di trasporto pubblico dello Scenario Superblock del 33% rispetto al loro valore nello Scenario Base e successivamente di arrotondarle per eccesso all'intero, espresso in minuti, più vicino al dato ottenuto. Il valore di partenza considerato per applicare tale riduzione alle nuove linee coincide con la cadenza delle linee eliminate nello Scenario Base.

4.3.4. Creazione di una linea di trasporto pubblico su SUMOPy

L'idea su cui si basa la realizzazione di un servizio di trasporto pubblico su SUMOPy consiste nell'individuare e selezionare le fermate componenti una linea e nello specificare le caratteristiche del servizio che si sta creando. Pertanto, il primo aspetto da considerare è l'individuazione delle fermate da connettere, che costituiranno la linea desiderata. Se le fermate sono già presenti nel luogo desiderato, ad esempio perché utilizzate da altre linee che passano in quell'arco, è possibile utilizzarle; se non esistono fermate nella posizione desiderata, è necessario realizzarle precedentemente attraverso Netedit.

Individuate le fermate, è possibile aggiungere una rete di trasporto pubblico attraverso lo strumento "add public transport lines", presente tra gli strumenti di manipolazione della rete su SUMOPy, riquadrato in rosso in Fig. 4.q. Selezionato lo strumento apposito, è possibile inserire tutti i parametri rappresentativi della linea nel pannello delimitato in blu nella Fig. 4.p. In particolare, nel suddetto pannello si possono inserire i seguenti dati:

- "Line Name": nome ufficiale della linea;
- "Veh. Type Id": tipologia di veicolo utilizzata per servire la linea (nella presente trattazione, bus);
- "Offset Hours" [h]: ora del giorno in cui inizia il servizio;
- "Begin Time" [s]: istante in cui inizia il servizio nella micro-simulazione;
- "Duration" [s]: durata del servizio;
- "Interval" [s]: intervallo temporale trascorso tra il passaggio di due autobus successivi della stessa linea (cadenza);
- "Dwell Time": tempo trascorso in sosta alle fermate per consentire la salita e la discesa dei passeggeri dal mezzo;

Nel pannello delimitato in blu sono presenti altre due voci non compilabili inserendo i dati manualmente: "Pt Stop Ids", il cui riempimento risulta obbligatorio per la realizzazione di una nuova linea, ed "Edge Ids", la cui compilazione non è vincolante. Il riempimento del campo "Pt Stop Ids", che indica la sequenza degli identificativi delle fermate della linea, avviene in automatico selezionando, nell'ordine desiderato, le fermate del servizio.

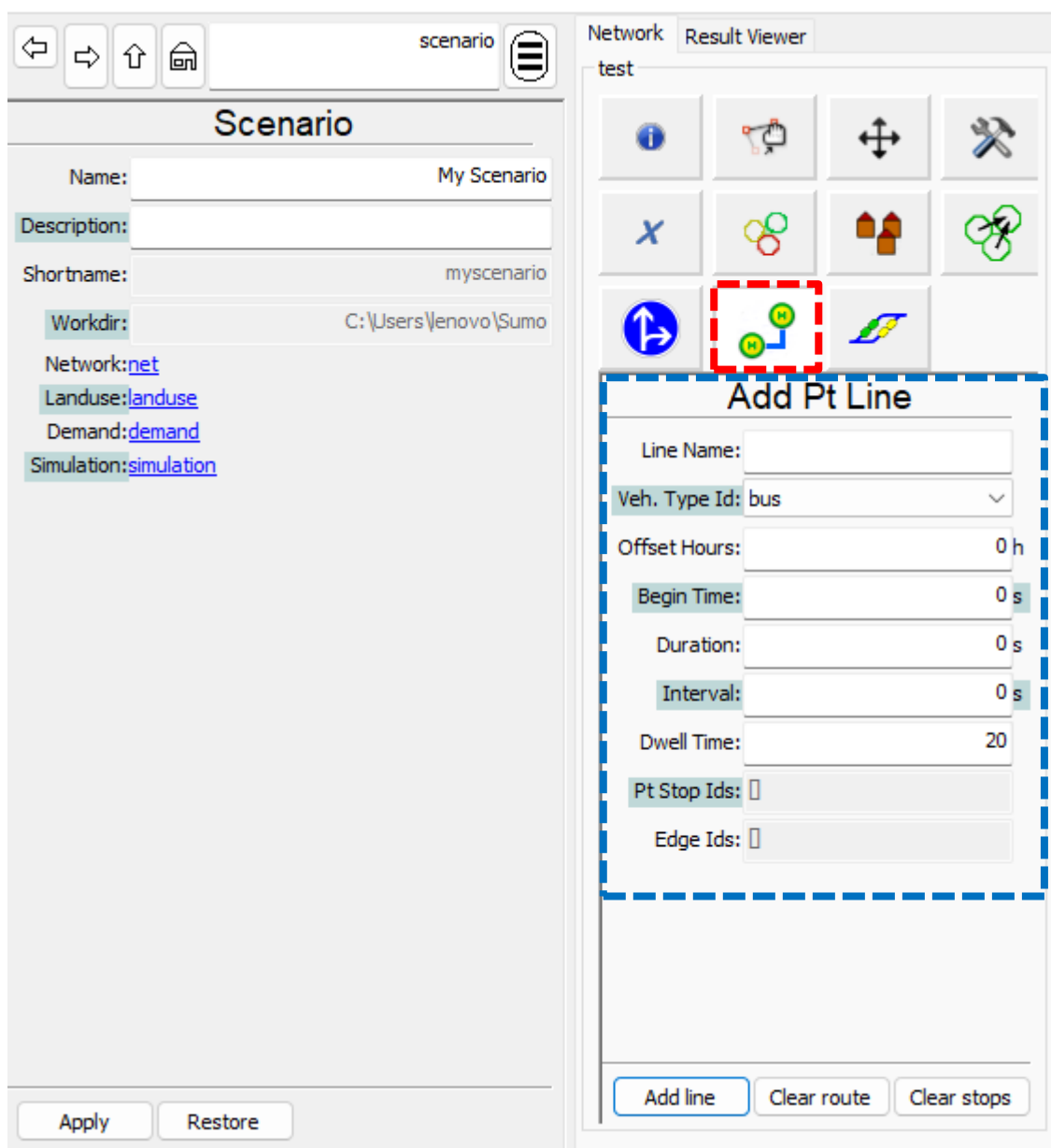


Fig. 4.q: schermata di SUMOPy per la realizzazione di un servizio di trasporto pubblico

Specificati i parametri caratteristici della linea e selezionate le fermate componenti quest'ultima, premendo il tasto "Add line" si realizza la linea di trasporto pubblico desiderata, le cui proprietà possono essere visualizzate e modificate seguendo il procedimento: "Scenario → demand → ptlines". Inoltre, è possibile visualizzare e modificare anche le proprietà delle fermate componenti la linea, seguendo il percorso: "Scenario → demand → ptstops". Infine, è necessario individuare l'itinerario tra le fermate selezionate, che percorreranno gli autobus che servono ogni linea. Tale operazione si svolge seguendo il procedimento: "Demand → Public transport → Guess routes".

4.4. Scenario PRT

4.4.1. Introduzione

Lo studio procede creando un terzo scenario, di cui si illustrano per completezza le caratteristiche qualitative e le modalità di realizzazione, senza però analizzare e confrontare in questa sede i risultati ottenuti con quelli dei due scenari precedenti. Infatti, tale scenario rappresenta un proseguimento dello studio in oggetto, ancora in fase di ricerca ed elaborazione, volto alla valutazione dei benefici prodotti dall'applicazione del modello di Superblock in un contesto nuovo e differente che prevede la contemporanea realizzazione di un mezzo di trasporto innovativo a servizio della città di Bologna.

In particolare, apportate tutte le modifiche necessarie per la realizzazione dello Scenario Superblock, è possibile definire lo Scenario PRT, contraddistinto dall'inserimento del PRT. L'inserimento del PRT comporta l'individuazione di una nuova rete di trasporto pubblico e di nuove fermate nel territorio bolognese; entrambi gli elementi necessitano di un corretto dimensionamento in base alla capacità stimata. L'inserimento del PRT può avvenire secondo due modalità molto diverse tra loro: in sostituzione del servizio di trasporto pubblico locale esistente offerto da TPER o in collaborazione con quest'ultimo. Nel primo caso, è necessario fornire un servizio ad elevata frequenza e ad elevata capacità, che percorre una rete molto ampia ed estesa su tutta l'area di studio considerata; tale situazione si discosta molto dalla situazione attuale della città di Bologna. Nel secondo caso, considerando la collaborazione tra i due servizi di trasporto, è necessario garantire ugualmente un servizio caratterizzato da prestazioni elevate e alta frequenza, rivolgendo particolare attenzione alla coordinazione e cooperazione dei due sistemi di trasporto presenti. Infatti, alcuni aspetti importanti consistono nel garantire contemporaneamente la collaborazione, la sovrapposizione e il funzionamento indipendente e autonomo dei due sistemi, coprendo l'intera area di studio analizzata e incentivando i trasporti intermodali.

Nella presente trattazione lo Scenario PRT è caratterizzato dalla collaborazione dei due servizi di trasporto pubblico, autobus e PRT, di cui si individua la rete nel paragrafo seguente 4.4.2. Si evidenzia come un ulteriore proseguimento del presente studio potrebbe sviluppare l'analisi e il confronto dei risultati prodotti dall'inserimento del PRT

sia in collaborazione sia in sostituzione del servizio di autobus, in un'area di studio in cui è stato precedentemente applicato il modello di Superblock. In entrambi i casi, dopo aver individuato la rete in relazione alle caratteristiche e peculiarità del territorio e alla specifica situazione, si realizza la rete su SUMOPy e si procede con la micro-simulazione.

4.4.2. Identificazione della rete PRT

Considerando le caratteristiche del territorio della città di Bologna e la configurazione di Superblock precedentemente illustrate, si realizza il sistema PRT, composto da una rete, dalle relative fermate e dai veicoli che si muovono sulla rete trasportando i passeggeri tra le varie fermate. Relativamente alle fermate, è necessario valutare attentamente la loro collocazione e posizione geografica: esse devono essere facilmente accessibili dagli utenti, comodamente raggiungibili a piedi da ogni Superblock e dai parcheggi centralizzati e integrate con le altre modalità di trasporto, in particolare con il trasporto pubblico locale su gomma, in modo da consentire lo svolgimento di spostamenti multimodali.

Relativamente alla rete, essa deve essere connessa, ovvero deve garantire che da ogni fermata sia possibile raggiungere qualsiasi altra fermata della rete individuata mediante almeno un itinerario. Un aspetto importante nell'adozione e nell'utilizzo di una rete PRT è dato dalla gestione della circolazione su di essa, che necessita di specifiche tecnologie e sistemi di coordinazione e comunicazione tra i veicoli in quanto solitamente è consentito il passaggio di un solo mezzo alla volta su ogni arco. Per semplificare la gestione della circolazione sulla rete studiata, si realizza una rete quasi totalmente monodirezionale; le eccezioni, ovvero gli archi bidirezionali, sono dovuti a particolari esigenze date dalla specifica conformazione del territorio su cui si progetta la rete.

Si individua una sistema PRT composto da quattro linee, rappresentate rispettivamente in blu, nero, verde e viola nella Fig. 4.r, contenenti rispettivamente 11, 11, 8 e 14 fermate, il cui raggio di copertura si mantiene in media minore ai 400m. In particolare, la linea blu consente gli spostamenti internamente al centro storico, la linea nera copre gli spostamenti nelle aree a est del centro storico come zona Mazzini e zona Murri, la linea verde è relativa alla parte nord ovvero zona San Donato e Bolognina e infine la linea viola

si estende su zona Saragozza, anche verso Casalecchio, zona Barca e Santa Viola, coprendo la parte ovest di Bologna. La Fig. 4.r rappresenta il sistema PRT per la città di Bologna, composto dalla rete e dalle fermate descritte, caratteristico dello Scenario PRT.

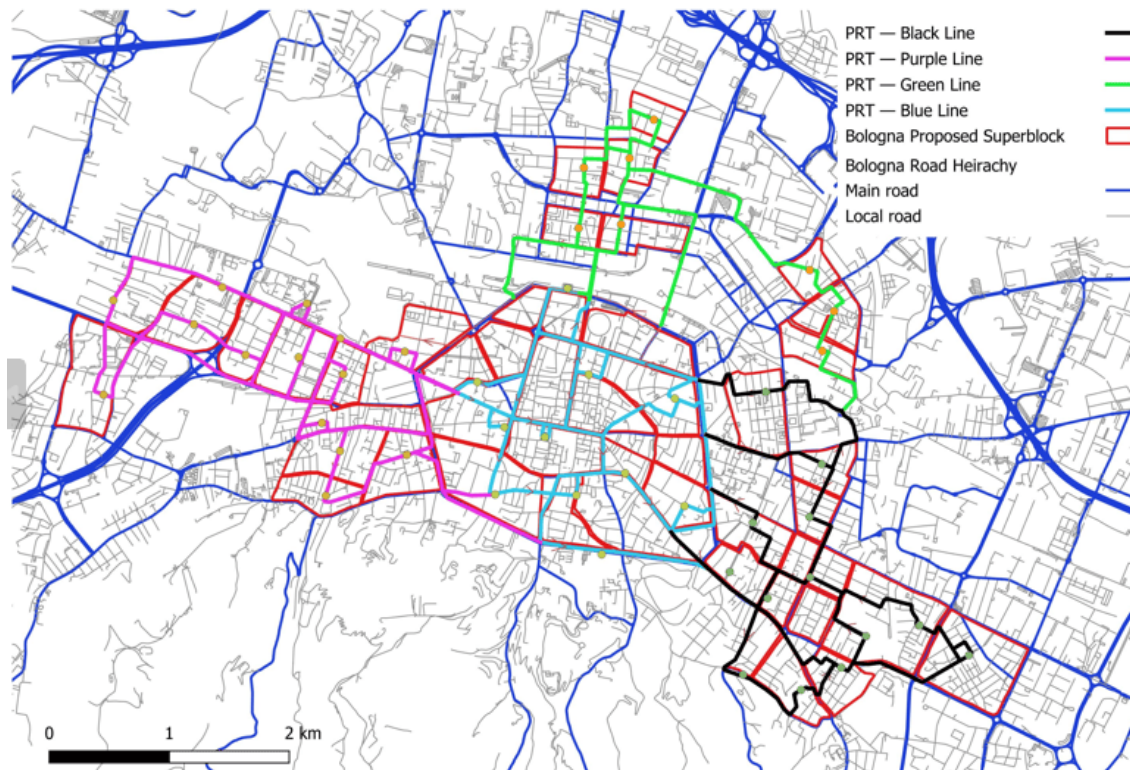


Fig. 4.r: rappresentazione del sistema PRT determinato per la città di Bologna

Sulla base del sistema complessivo, si è individuata una possibile fasizzazione per la realizzazione graduale dell'opera. Tale fasizzazione è volta a garantire un inserimento progressivo del sistema PRT nel contesto cittadino, sia per quanto riguarda la collaborazione con il sistema di trasporto pubblico attuale, sia per le abitudini e il processo di accettazione dei cittadini, sia per i tempi necessari per la realizzazione e il funzionamento delle infrastrutture. Pertanto, si individuano tre fasi di realizzazione dell'opera, che garantiscono il funzionamento del servizio anche nei momenti in cui il sistema non risulta ancora terminato.

La prima fase copre parte dell'area centrale di Bologna, sviluppandosi orizzontalmente anche nella prima periferia fuori dalle mura cittadine, e comprende parte delle linee blu, bianca e viola. A partire dall'infrastruttura realizzata nella prima fase, la seconda fase si estende verso il basso, colmando il territorio compreso tra la rete già realizzata e le mura che delimitano la zona sud del centro storico; comprende la restante parte della linea blu

e prevede la realizzazione di un'ulteriore parte della linea viola. La terza fase consiste nel completamento della rete, estendendosi ulteriormente verso la periferia a est e a ovest del centro e realizzando la parte nord della rete subito fuori le mura, ovvero la linea verde. Individuata e realizzata la rete, si inserisce il PRT nello scenario, tramite l'apposita funzione su SUMOPy; infine, si avvia la micro-simulazione.

5. RISULTATI

5.1. Parametri analizzati

5.1.1. Esportazione ed elaborazione

Al termine di ogni simulazione realizzata si ottengono in output molteplici valori numerici associati ad ogni arco, a ogni viaggio o a ogni linea di trasporto pubblico, visualizzabili sia in forma tabulare sia in forma grafica, sia direttamente su SUMOPy sia esportandoli sul proprio dispositivo per poi analizzarli. Esempi degli output forniti dal software relativamente agli archi sono i flussi, la velocità media, la densità, le emissioni specifiche e assolute in relazione a diverse tipologie di inquinanti ambientali, il consumo di carburante e il livello di inquinamento acustico; relativamente ai viaggi e alle linee di trasporto pubblico, è possibile conoscere elementi quali la durata, gli orari di partenza e di arrivo, la lunghezza percorsa, il tempo di percorrenza e il tempo perso.

Per avere un'idea chiara, immediata ed intuitiva degli output delle simulazioni effettuate, è particolarmente efficace la visualizzazione dei risultati tramite Matplotlib, funzione interna al software SUMOPy, che garantisce la possibilità di stampare i risultati ottenuti, fornendo una visualizzazione della rete in formato immagine. Nella rappresentazione grafica così realizzata, gli archi appartenenti alla rete sono caratterizzati da specifiche sfumature di colori e a ogni colore corrisponde un valore numerico esatto; per l'associazione di ogni colore a un determinato valore numerico, nell'immagine è presente un cartiglio contenente una scala cromatica graduata. Un'altra possibile caratteristica della stampa è la visualizzazione dei risultati anche tramite lo spessore, per cui ad archi di spessore diverso, corrispondono risultati differenti.

Relativamente alla visualizzazione dei risultati in forma matriciale, è possibile esportare le matrici, create da SUMOPy, in formato .CSV, rendendo i dati visualizzabili su Excel. Ogni colonna delle matrici disponibili corrisponde a un output differente e ogni riga corrisponde ad archi, viaggi o linee differenti. Si procede selezionando solamente alcune colonne delle matrici esportate, ovvero quelle relative agli output di interesse, e con la successiva elaborazione statistica di questi ultimi, svolgendo calcoli e realizzando grafici. Si sottolinea che la scelta degli output costituisce una fase fondamentale all'interno di

uno studio basato sulla micro-simulazione, perché a output differenti corrispondono risultati molto differenti ed è dunque necessario scegliere una composizione di parametri e indicatori che fornisca una caratterizzazione il più possibile ampia, completa e rappresentativa del problema oggetto di studio. Tra i parametri forniti in output da SUMOPy, si analizzano con maggiore attenzione alcune specifiche macrocategorie: i parametri cinematici e trasportistici e i parametri ambientali.

5.1.2. Parametri cinematici e trasportistici

La cinematica è la parte della meccanica dedicata all'analisi dei movimenti, indipendentemente dalle cause che li provocano e li mantengono. Le principali grandezze fisiche coinvolte nella cinematica sono la posizione, la velocità, l'accelerazione e il tempo. Relativamente ai parametri cinematici, nella presente trattazione sono disponibili, in riferimento a ogni arco della rete, la velocità media di percorrenza [m/s], il tempo medio di viaggio in moto [s] o [min], il tempo medio di attesa [s] o [min].

D'altra parte, in riferimento ai viaggi compiuti da ogni utente della popolazione virtuale realizzata su SUMOPy, è possibile considerare aspetti quali la lunghezza [m] o [km] e la durata [s] o [min] dello spostamento percorso dagli utenti. Note queste grandezze, è possibile realizzare dei grafici che rappresentano la distribuzione delle frequenze di classi delle lunghezze, di classi delle durate e di classi delle velocità degli spostamenti. Tali operazioni si possono svolgere in riferimento sia ai viaggi effettuati con tutti i modi di trasporto considerati, sia in riferimento ai singoli modi, come trasporto pubblico, auto privata, bicicletta e piedi.

Infine, per la valutazione degli impatti causati da un intervento di pianificazione urbana risulta di particolare interesse anche l'analisi dei valori della densità media sugli archi [veh/km] e dei flussi totali, relativi a ogni modo di trasporto, che attraversano ogni arco della rete nell'intervallo di simulazione considerato. Nel dettaglio, analizzando i dati dei flussi riferiti alle diverse modalità di trasporto su tutta la rete, è possibile determinare la ripartizione modale degli scenari realizzati e confrontare i dati ottenuti con i valori di target illustrati nel PUMS (descritti nel paragrafo 4.4.1).

5.1.3. Parametri ambientali

Il problema dell'inquinamento ambientale è un tema molto sentito sia in Italia, sia nel mondo. Infatti, l'Organizzazione Mondiale della Sanità stima che ogni anno, in paesi quali Stati Uniti, Australia ed Europa, 3,7 milioni di decessi siano attribuiti dall'inquinamento ambientale, nonostante i progressi ottenuti dai suddetti paesi relativamente alla riduzione delle emissioni di origine industriale e da traffico veicolare. Nel dettaglio, l'Agenzia Europea per l'Ambiente stima che in Italia, nel 2016, 58 600 morti premature possano essere riconducibili all'esposizione prolungata a diverse categorie di inquinanti, tra cui le polveri sottili, o particolato (PM), gli ossidi di azoto (NOx) e gli ossidi di carbonio (CO e CO₂) [78].

Si specifica inoltre che il contributo del settore trasportistico all'inquinamento risulta particolarmente rilevante nelle aree urbane, come quella analizzata nella presente trattazione. Proprio nelle aree urbane è molto sentita anche la problematica dell'inquinamento acustico, ovvero la presenza di un rumore che disturba, causando effetti nocivi sull'attività, sulla salute delle persone, degli animali e dell'ambiente circostante. In particolare, l'inquinamento acustico provocato dal traffico veicolare risulta generato dai mezzi di trasporto cittadini, rappresentando la prima causa di discomfort e disagio acustico nelle città e comprendendo suoni quali clacson, il rumore degli pneumatici a contatto con l'asfalto, le rotaie dei tram, il rombo dei motori e altri [79]. A seguito di tali considerazioni, risultano di fondamentale importanza la scelta e l'accurata analisi dei parametri ambientali da esaminare nello studio in oggetto.

L'analisi di tali parametri in entrambi gli scenari costituisce un aspetto cruciale in quanto in molte città italiane si verifica il superamento dei valori limite giornaliero e annuale delle emissioni dei suddetti inquinanti, causando impatti irreparabili sulla salute e sulla qualità di vita [78]. Relativamente agli inquinanti, si considerano e si illustrano brevemente il particolato, gli ossidi di azoto e gli ossidi di carbonio. Il particolato PM comprende l'insieme delle particelle atmosferiche solide e liquide sospese in aria; con PM₁₀ si intendono le particelle con diametro aerodinamico minore o uguale a 10 µm, generate prevalentemente dal traffico veicolare. Numerosi studi evidenziano correlazioni tra le concentrazioni PM₁₀ e l'incremento della mortalità e dei ricoveri ospedalieri per malattie cardiache e respiratorie e il particolato aerodisperso è stato inserito dall'Agenzia

Internazionale per la Ricerca sul Cancro tra gli agenti sicuramente cancerogeni per l'uomo [78]. Anche gli ossidi di azoto (NO e NO_2) provocano effetti negativi sulla salute e contribuiscono ai fenomeni di smog fotochimico e delle piogge acide [78]. Il monossido di carbonio (CO) assume particolare rilevanza tra gli inquinanti prodotti dalla combustione e risulta molto pericoloso in quanto rappresenta un gas tossico, incolore, inodore, insapore e non irritante che, senza ventilazione adeguata, può raggiungere concentrazioni elevate, venendo inalato in modo impercettibile, fino a raggiungere nell'organismo concentrazioni letali [80]. L'anidride carbonica (CO_2) costituisce il principale gas nell'atmosfera prodotto da attività umane, nonché la principale causa dell'inquinamento atmosferico. Infatti, la sovrapproduzione di anidride carbonica determina una crescita dell'effetto serra e contribuisce a provocare il surriscaldamento globale del pianeta, con tutti i fenomeni negativi che ne conseguono [81].

Da legge, per gli inquinanti sono presenti dei valori limite che non possono essere superati, in relazione a diversi intervalli temporali di riferimento (giornaliero, stagionale, annuale, valore di picco). Inoltre, il 22 settembre 2021 l'Organizzazione Mondiale della Sanità ha pubblicato le nuove linee guida sulla qualità dell'aria per diversi inquinanti, tra cui $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} , NO_2 e CO , con l'obiettivo di proteggere la salute delle popolazioni [82]. I dati della fonte [82] non rappresentano i limiti di legge, ma sono valori indicativi della qualità dell'aria che costituiscono un riferimento per la formulazione dei valori di legge.

Su SUMOPy è disponibile una vasta gamma di output relativi alla qualità ambientale. Tali dati sono disponibili per ogni arco in relazione a diverse tipologie di inquinanti ambientali, all'inquinamento acustico e al consumo di carburante. I dati in output relativi alle emissioni degli inquinanti ambientali sono disponibili sia in valore assoluto [mg], sia in valore specifico [g/km/h]; le categorie di inquinanti disponibili su SUMOPy sono proprio il particolato, gli ossidi di azoto, il monossido di carbonio e il biossido di carbonio. Relativamente all'inquinamento acustico e al consumo di carburante, SUMOPy fornisce in output rispettivamente il valore del disturbo acustico prodotto [dB] e del consumo assoluto di carburante [ml].

Infine, si evidenzia che i dati di output forniti da SUMOPy riguardano solamente l'emissione e la generazione degli inquinanti, ottenuti dall'applicazione dei relativi modelli matematici. Infatti, il programma non prevede l'applicazione dei modelli

matematici che studiano la diffusione e la successiva concentrazione degli inquinanti. Infatti, sarebbe irrealistico pensare di poter valutare la concentrazione degli inquinanti nella presente simulazione in quanto questa dipende fortemente anche dalle condizioni atmosferiche, non considerate come variabili dello studio in oggetto.

5.2. Risultati Scenario Base

Lo Scenario base, Simulando la situazione attuale della città di Bologna nelle ore di punta della mattina, riflette a pieno le condizioni reali del traffico cittadino che si verifica ogni giorno. La Fig. 5.a costituisce una rappresentazione grafica dei flussi sugli archi della rete nell'intervallo di simulazione considerato. Osservando la figura si nota che la rete risulta essere più carica proprio in corrispondenza delle infrastrutture principali della città, ovvero la tangenziale, i viali e molte delle arterie che collegano la periferia al centro. In particolare, nelle 2h di simulazione, la tangenziale è caratterizzata dal passaggio del massimo numero di veicoli, superiore ai 3000, e i viali accolgono il transito di circa 2000 veicoli; valori elevati si registrano anche in Via Sabotino (circa 2500 veicoli) e in Via Saffi, Via S. Donato, Via Mazzini e Via Massarenti (circa 2000 veicoli).

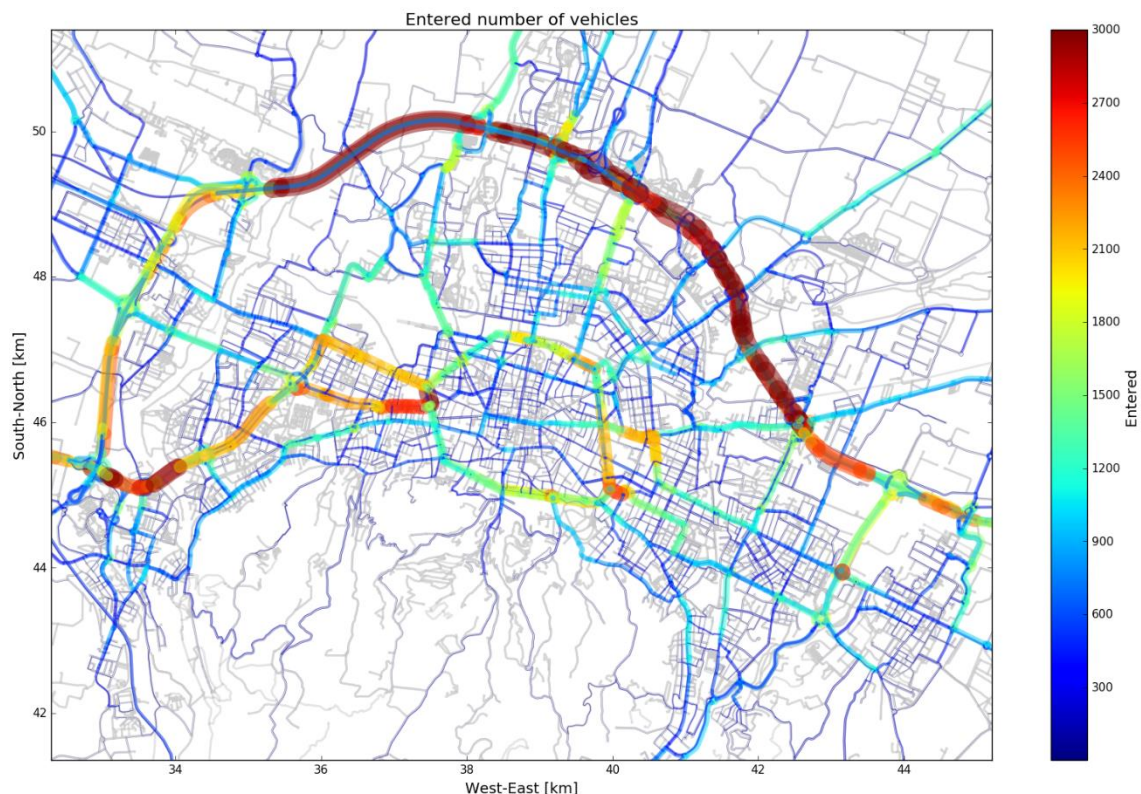


Fig. 5.a: rappresentazione dei flussi simulati sugli archi della rete di Bologna nello Scenario Base

Proprio le infrastrutture che accolgono un maggior numero di veicoli sono caratterizzate anche da una maggior densità veicolare, rappresentata in Fig. 5.b, raggiungendo picchi fino a 200 veh/km in corrispondenza di esse, ma mantenendo un valore medio sull'intera rete piuttosto basso, dell'ordine di 10 veh/km. Si sottolinea che la tangenziale, pur presentando i valori di veicoli entranti più elevati, non è caratterizzata dalla maggiore densità veicolare.

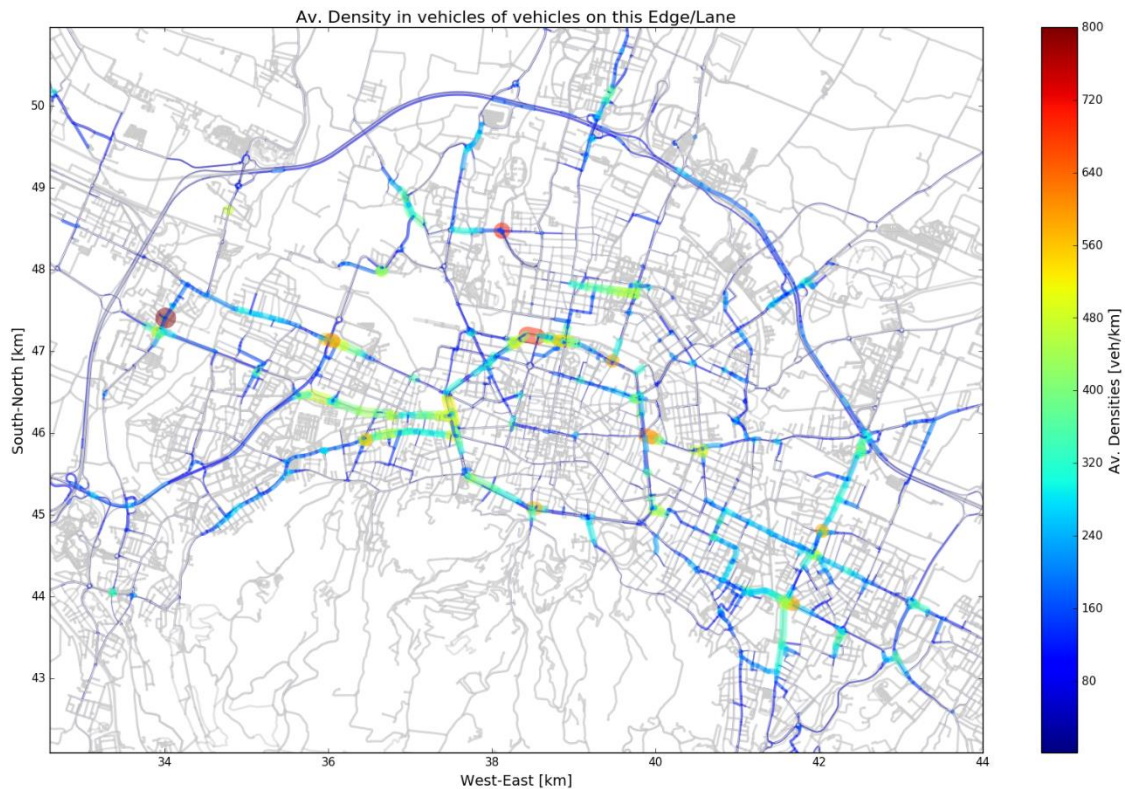


Fig. 5.b: rappresentazione della densità veicolare media [veh/km] sugli archi della rete di Bologna nello Scenario Base

Nel dettaglio, si nota che gli archi con una densità superiore alla media siano anche caratterizzati da un tempo di attesa molto elevato e da una bassa velocità media di percorrenza, inferiore alla velocità media sull'intera rete. La velocità media calcolata sull'intera rete è pari a circa 6,1 m/s e il picco si ha in corrispondenza della tangenziale, dove raggiunge i 35 m/s. Sono presenti ulteriori picchi di velocità, dell'ordine dei 20 m/s, allontanandosi dal centro e andando verso la periferia.

Tali considerazioni si riflettono sull'osservazione delle emissioni inquinanti sulla rete. Un parametro di fondamentale importanza, rappresentato in Fig. 5.c, è costituito dall'andamento dell'inquinamento acustico sulla rete che assume un valore medio sull'intera rete pari circa a 33 dB.

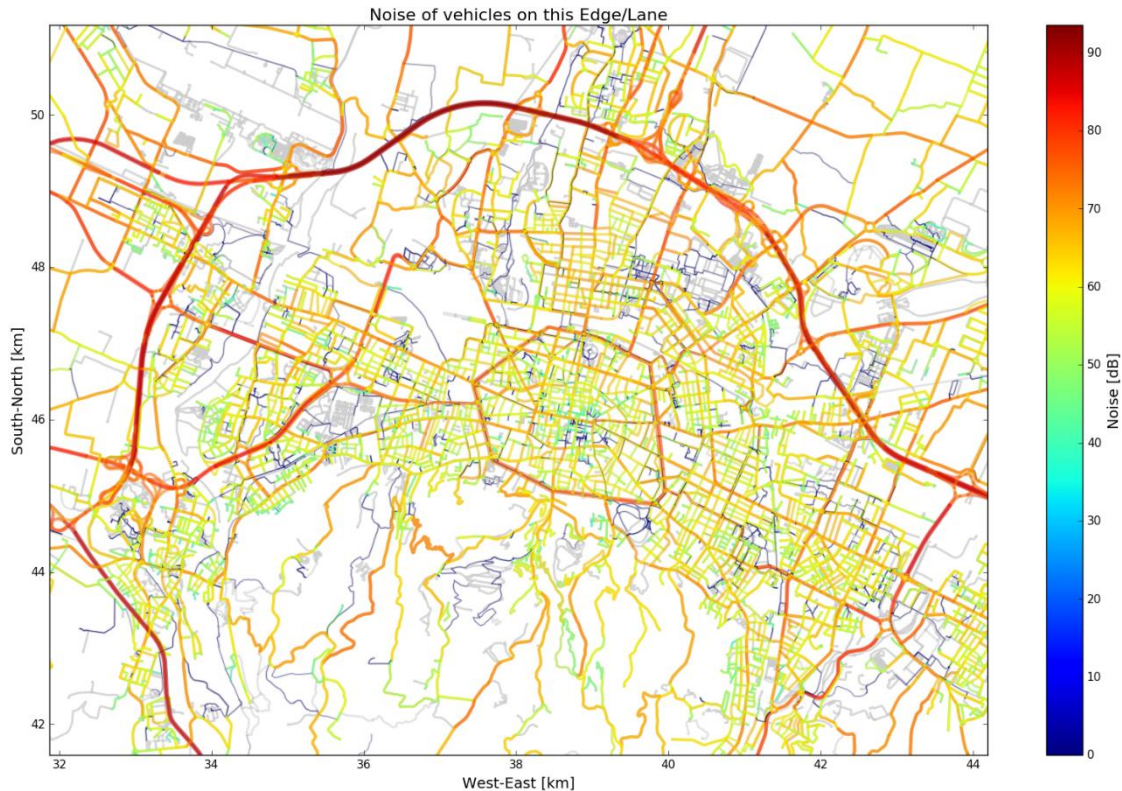


Fig. 5.c: rappresentazione inquinamento acustico [dB] sugli archi della rete di Bologna nello Scenario Base

Inoltre, si valuta con attenzione l'andamento delle emissioni, assolute e specifiche, del monossido di carbonio. Infatti, esso è un inquinante molto pericoloso, poiché è un gas tossico, inodore, insapore e non irritante che si inala in modo impercettibile; inoltre, esiste una relazione statisticamente significativa tra la concentrazione di CO su una data infrastruttura ed il flusso che la percorre

Le emissioni assolute sull'intera rete, rappresentate in Fig. 5.d, sono dell'ordine di 15 000 kg di CO e presentano dei picchi proprio in corrispondenza delle infrastrutture in cui avviene il transito del maggior numero di veicoli, come nella tangenziale e in Via Sabotino. Le emissioni specifiche rappresentano le emissioni normalizzate, ovvero le emissioni assolute su ogni arco, divise per la lunghezza di quest'ultimo, espressa in chilometri, e per l'intervallo temporale della simulazione, espresso in ore. In questo modo i valori ottenuti per le emissioni non sono influenzati dalla lunghezza dell'arco analizzato, ma consentono di valutare la criticità della situazione a prescindere dall'estensione; i valori delle emissioni specifiche di CO sono rappresentati nella Fig. 5.e.

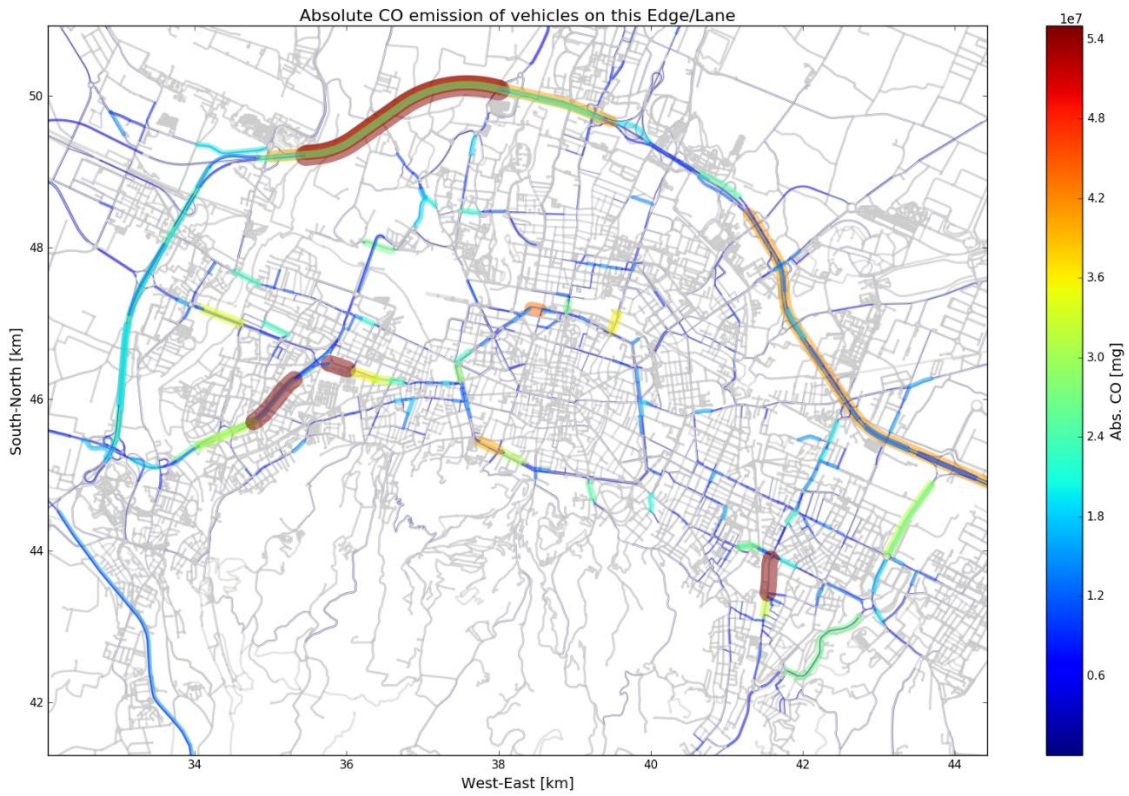


Fig. 5.d: rappresentazione delle emissioni assolute di CO [mg] sugli archi della rete di Bologna nello Scenario Base

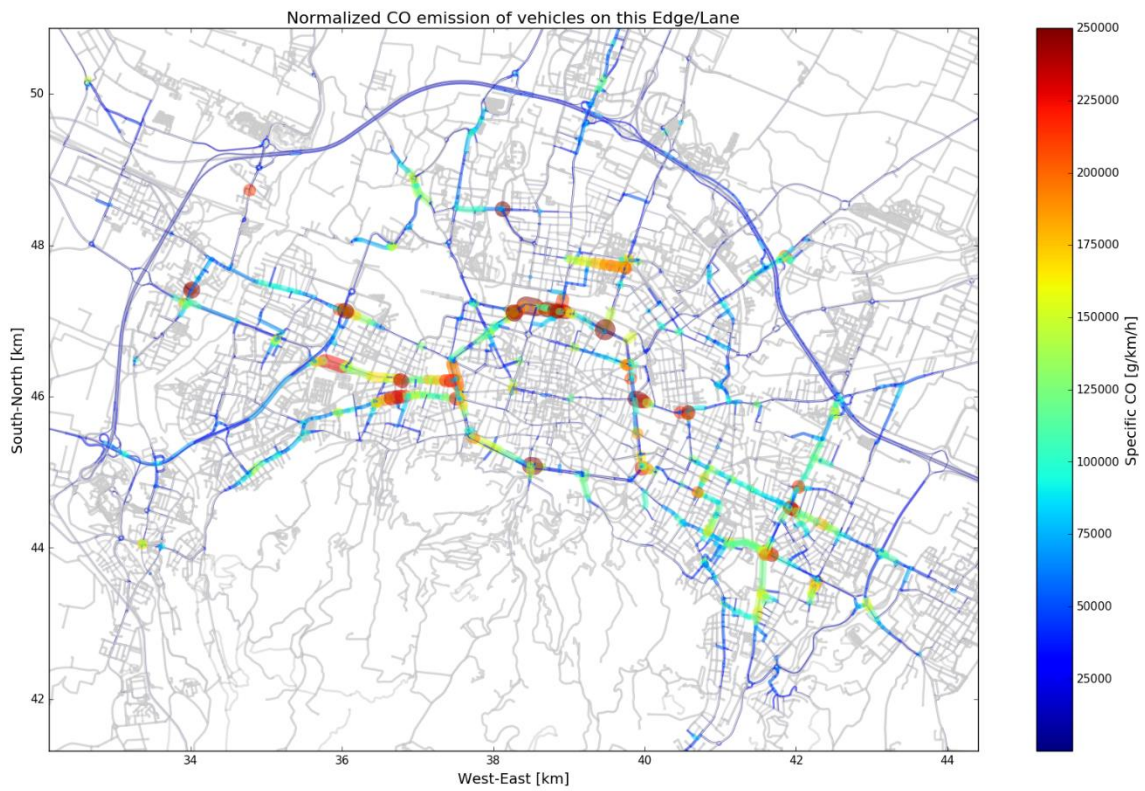


Fig. 5.e: rappresentazione delle emissioni specifiche di CO [g/km/h] sugli archi della rete di Bologna nello Scenario Base

Si nota che la rappresentazione del consumo assoluto di carburante, circa 130 000 l sull'intera rete, in Fig. 5.f, presenta un andamento sulla rete di Bologna speculare a quello delle emissioni assolute di monossido di carbonio, mostrato precedentemente.

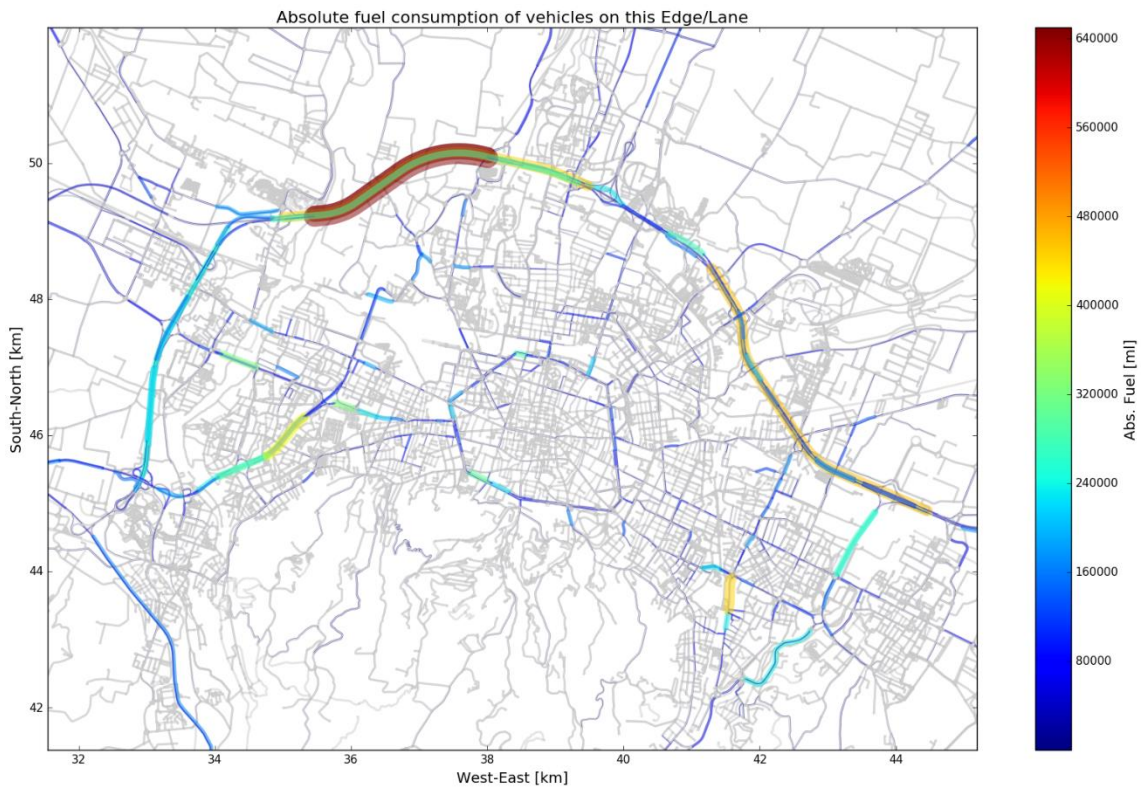


Fig. 5.f: rappresentazione del consumo assoluto di carburante [ml] sugli archi della rete di Bologna nello Scenario Base

Come output della simulazione si ottiene anche la ripartizione modale (Fig. 5.g e Fig. 5.h (1)) e la stima del tempo medio per ogni strategia di viaggio (Fig. 5.h (2)). Si nota che circa il 48% degli utenti della popolazione virtuale si sposta utilizzando l'auto privata, che risulta la modalità più diffusa, il 20% si muove usufruendo del servizio di trasporto pubblico locale, il 15% effettua spostamenti a piedi, il 14% con la moto e il 3% sceglie di utilizzare la bici. Tali valori possono essere interpretati analizzando contemporaneamente i tempi di viaggio medi stimati per ogni strategia e alcune considerazioni socioeconomiche.

L'auto privata, che risulta la strategia più scelta, è caratterizzata da uno dei tempi medi minori, superiore solo al tempo medio delle moto. D'altra parte, le moto, caratterizzate dal tempo medio di percorrenza minore in assoluto, non sono contraddistinte da una percentuale di share modale tanto elevata in quanto non tutti gli utenti della popolazione

virtuale dispongono di tale mezzo. Gli spostamenti a piedi, pur essendo al terzo posto nella ripartizione modale, risultano caratterizzati dal tempo medio di percorrenza più elevato e una così alta percentuale di utilizzo potrebbe essere dovuta al fatto che tutti gli utenti dispongono di questa alternativa. Il trasporto pubblico locale è una scelta molto diffusa nonostante i tempi medi elevati in quanto garantisce uno spostamento motorizzato, protetto dagli agenti atmosferici e in grado di coprire grandi distanze anche a chi non dispone di un mezzo privato, come gli studenti che nelle ore di punta della mattina raggiungono la scuola. Infine, la bicicletta, nonostante sia caratterizzata da tempi medi di percorrenza relativamente bassi, occupa l'ultimo posto della ripartizione modale in quanto la transizione modale da modalità motorizzate a modalità dolci non è ancora stata completata e i veicoli privati e motorizzati risultano ancora l'alternativa preferita dalla popolazione.

RIPARTIZIONE MODALE

Scenario Base

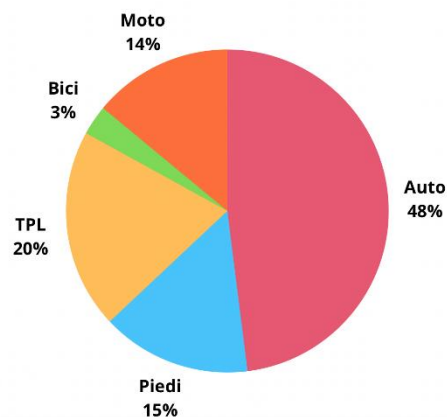


Fig. 5.g: ripartizione modale dello Scenario Base

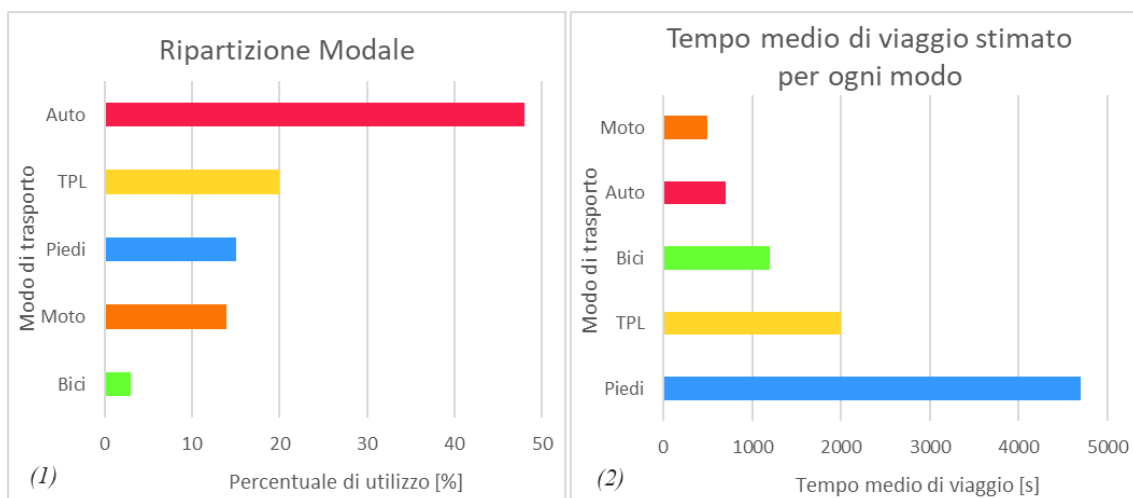


Fig. 5.h: analisi contemporanea della ripartizione modale (1) e del tempo medio di viaggio stimato per ogni modo (2) nello Scenario Base

Si evidenzia come i valori della ripartizione modale ottenuti attraverso la simulazione dello Scenario Base siano coerenti con i valori di ripartizione modale relativi all'anno 2016 e presenti nel PUMS, descritti nel paragrafo 4.1.4, Fig. 4.i. In particolare, le percentuali di utilizzo delle auto, delle biciclette e del Trasporto Pubblico Locale, pari rispettivamente a 48%, 20% e 3% rispecchiano i dati a disposizione, ovvero 42%, 21% e 5%. Gli spostamenti pedonali, pari al 15% nella simulazione, sono leggermente sottostimati rispetto ai dati a disposizione, pari al 27%, a favore degli spostamenti che avvengono utilizzando la moto, che conseguentemente risultano sovrastimati (14% dalla simulazione anziché 4% dai dati).

Relativamente al Trasporto Pubblico Locale, l'intero servizio offerto è caratterizzato da una velocità commerciale di 18,9 km/h. La velocità commerciale esprime il tempo effettivamente impiegato per completare un determinato itinerario ed è data dal rapporto fra la distanza percorsa da un mezzo di trasporto e il tempo speso per percorrerla; pertanto, la velocità commerciale include il tempo trascorso alle fermate e tutti i tempi accessori e le soste effettuate durante il percorso. Tale valore risulta decisamente coerente con il valore della velocità commerciale degli autobus che svolgono il servizio di trasporto pubblico locale in Italia, pari a 19,4 km/h e, più nel dettaglio, con i dati della velocità commerciale relativi all'Emilia Romagna, pari a 20,7 km/h, e a Bologna centro città, pari a 16,2 km/h [83].

La Fig. 5.i mostra un andamento della distribuzione di frequenza delle velocità commerciali delle linee di trasporto pubblico realizzate nello Scenario Base. Si osserva che la maggior parte delle linee è caratterizzata da una velocità commerciale coerente con quella a disposizione dai dati, che la minima velocità appartiene alla classe [12, 14] km/h, che è presente un picco nelle classi [14, 16] e [16, 18] km/h e che la massima velocità appartiene alla classe [26, 28] km/h. Si sottolinea inoltre che lo spazio percorso dall'intera flotta dei veicoli costituenti il servizio di trasporto pubblico locale è pari a 3405km.

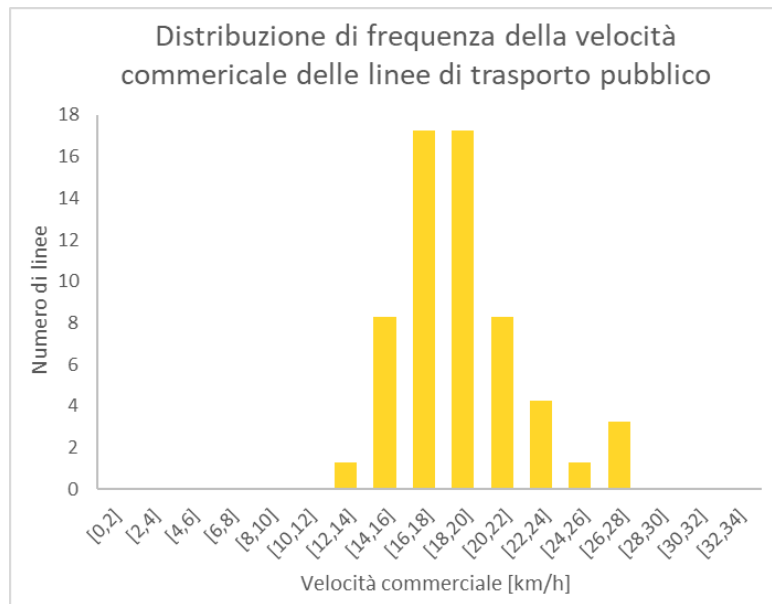


Fig. 5.i: distribuzione di frequenza della velocità commerciale delle linee di trasporto pubblico dello Scenario Base

5.3. Risultati Scenario Superblock

Lo Scenario Superblock simula la situazione ipotetica della città di Bologna, in cui sono stati precedentemente definiti e realizzati i superblocks e tutte le modifiche urbanistiche che ne conseguono; pertanto, offre la possibilità di valutare le conseguenze del suddetto intervento di pianificazione sul traffico e sull'inquinamento cittadino.

La Fig. 5.j rappresenta una visualizzazione grafica dei flussi simulati sugli archi della rete nell'intero intervallo di simulazione considerato, pari a 2h. Osservando la figura si nota che la rete risulta essere più carica proprio in corrispondenza delle infrastrutture principali della città, come la tangenziale e i viali, e, coerentemente con quanto atteso, in corrispondenza della rete principale che individua il perimetro dei superblocks. In particolare, la tangenziale è caratterizzata dal passaggio del massimo numero di veicoli, dell'ordine di grandezza di 2500/3000, e i viali accolgono il transito di circa 1000 veicoli; valori elevati si registrano anche in Via Sabotino, in Via Saffi, in Via Mezzofanti e in Via Massarenti (circa 1500 veicoli). D'altra parte, in linea con le aspettative, il numero di veicoli entranti negli archi interni ai superblocks risulta estremamente basso, in quanto nella simulazione l'accesso è consentito solamente ai taxi condivisi.

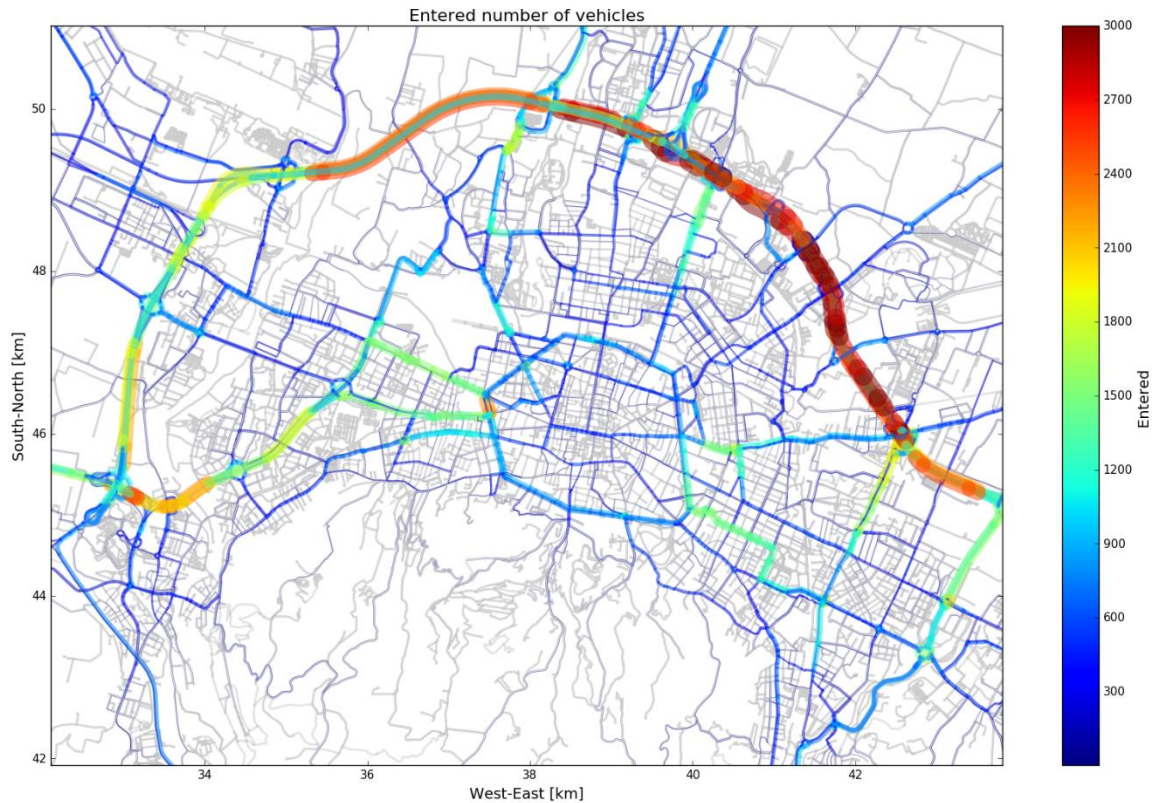


Fig. 5.j: rappresentazione flussi simulati sugli archi della rete di Bologna nello Scenario Superblock

Anche in questo caso, le infrastrutture che accolgono un maggior numero di veicoli sono caratterizzate anche da una maggior densità veicolare, raggiungendo picchi fino a 100 veh/km in corrispondenza di esse, pur mantenendo un valore medio sull'intera rete decisamente basso, dell'ordine di 3 veh/km. Tale valore appare coerente con le aspettative in quanto numerosi archi della rete risultano quasi completamente scarichi per via della regolazione degli ingressi nelle aree interne ai superblocks. Si osserva inoltre che la velocità media di percorrenza sull'intera rete risulta pari a 6,3 m/s e il picco si verifica in corrispondenza della tangenziale, dove la velocità raggiunge picchi di 35 m/s.

Le suddette osservazioni si riflettono sull'inquinamento acustico e ambientale sulla rete. In particolare, le emissioni assolute di monossido di carbonio sull'intera rete, rappresentate in Fig. 5.k, sono dell'ordine di 7000 kg e presentano il picco lungo la tangenziale, proprio dove transita il maggior numero di veicoli. Anche in questo caso, in linea con le aspettative, la rappresentazione del consumo assoluto di carburante, pari a circa 80 000 l e mostrata in Fig. 5.l, presenta un andamento speculare a quello delle emissioni di CO.

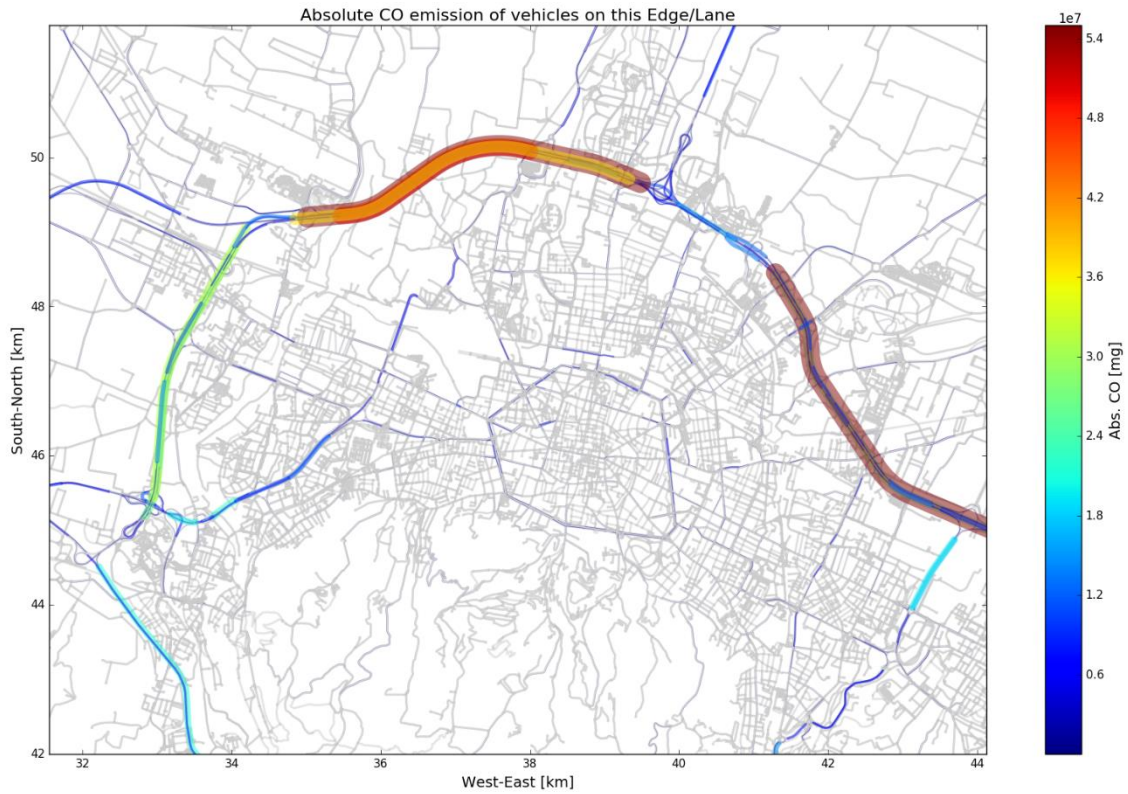


Fig. 5.k: rappresentazione delle emissioni assolute di CO [mg] sugli archi della rete di Bologna nello Scenario Superblock

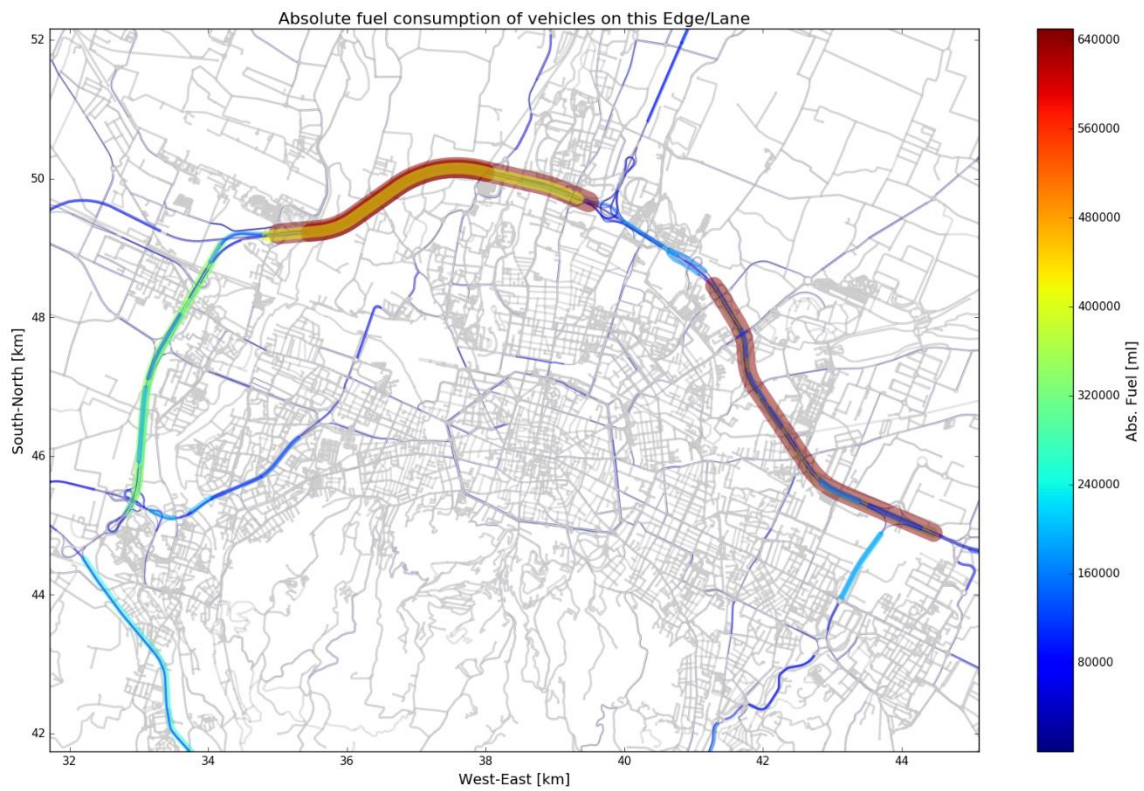


Fig. 5.l: rappresentazione del consumo assoluto di carburante [ml] sugli archi della rete di Bologna nello Scenario Superblock

Le considerazioni sulla distribuzione dei veicoli si riflettono ancora sull'inquinamento acustico, rappresentato in Fig. 5.m, che assume un valore medio sulla rete pari a 30 dB.

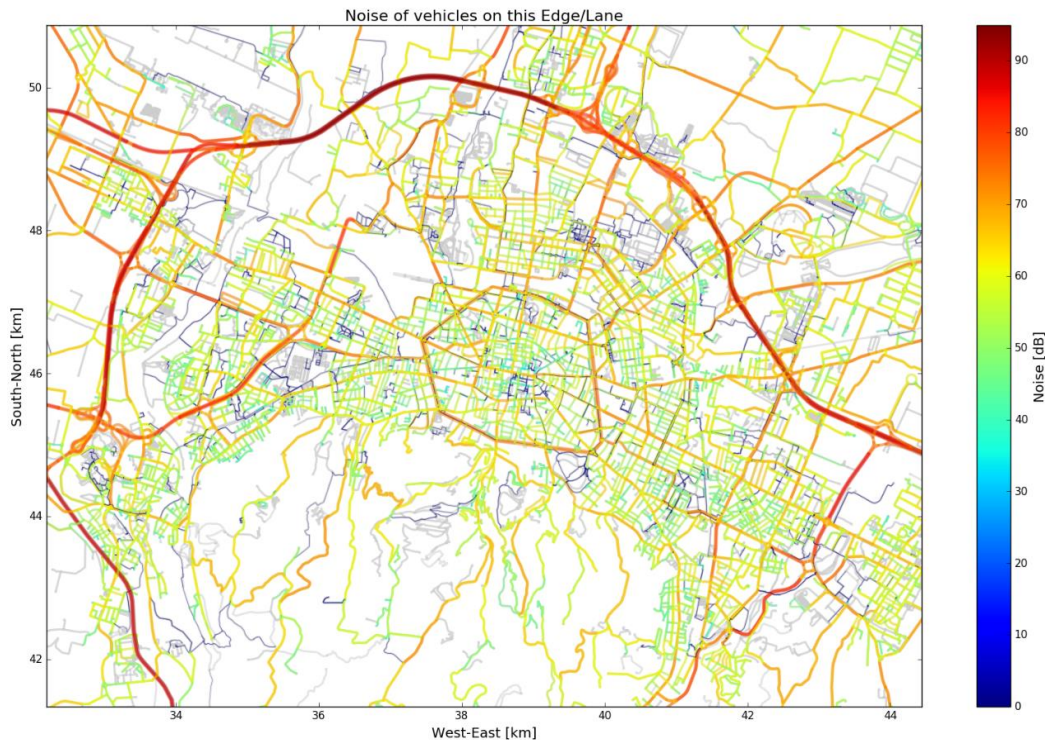


Fig. 5.m: rappresentazione inquinamento acustico [dB] sugli archi della rete di Bologna nello Scenario Superblock

La ripartizione modale (Fig. 5.n) e il tempo medio delle strategie (Fig. 5.o (2)) esigono un'analisi accurata. Nel dettaglio, circa il 52% della popolazione si sposta con il servizio taxi, il 18% con la propria auto, il 12% si muove a piedi, l'11% usufruisce del trasporto pubblico, il 5% utilizza la moto e il 2% la bici. Tali valori sono da interpretare analizzando parallelamente i tempi di viaggio medi delle strategie, considerazioni socioeconomiche, la strategia di assegnazione e il numero di taxi implementato nella simulazione.

RIPARTIZIONE MODALE

ScenarioSuperblock

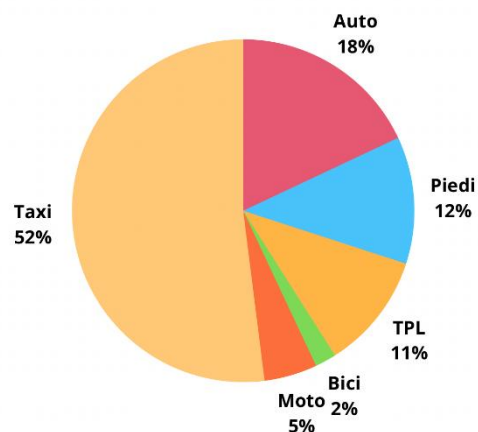


Fig. 5.n: ripartizione modale dello Scenario Superblock

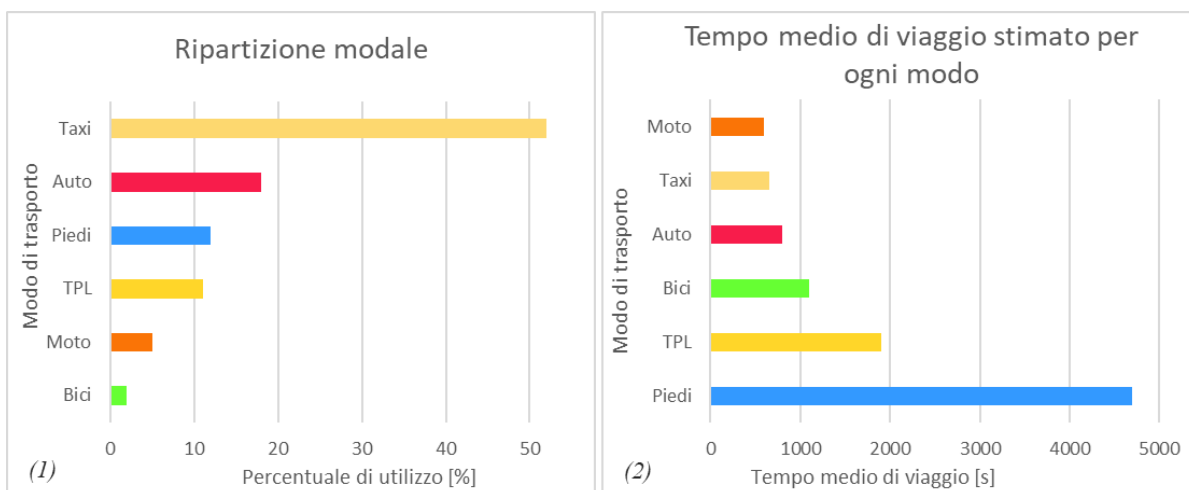


Fig. 5.o: analisi contemporanea della ripartizione modale (a) e del tempo medio di viaggio stimato per ogni modo (b) nello Scenario Superblock

Nel secondo scenario, l'auto privata non risulta più la strategia maggiormente scelta dagli utenti e occupa solamente il terzo posto nell'istogramma dei tempi medi di percorrenza per i modi di trasporto considerati. Infatti, le auto non risultano più particolarmente vantaggiose in quanto non è consentito l'accesso nei superblocks, ma anzi devono essere lasciate in appositi parcheggi centralizzati per poi raggiungere una certa destinazione a piedi, in bici o in bus. Si sottolinea come la percentuale di utenti che utilizzano la macchina (18%) sia addirittura inferiore al valore target fornito dal PUMS al 2030 (22%).

Anche in questo caso le moto sono caratterizzate dal tempo di percorrenza minore in assoluto e da una percentuale di utilizzo relativamente alta rispetto ai valori attuali forniti dal PUMS, sia relativi all'anno 2016, sia relativi alla previsione al 2030. Gli spostamenti a piedi, pur essendo al terzo posto nella ripartizione modale, risultano contraddistinti dal tempo medio di percorrenza più elevato e una così alta percentuale di utilizzo è dovuta al fatto che tutti gli utenti dispongono di questa alternativa. La bicicletta, nonostante sia caratterizzata da tempi medi di percorrenza relativamente bassi, occupa di nuovo l'ultimo posto della ripartizione modale. Il trasporto pubblico locale è caratterizzato da un'attrattività bassa da un lato a causa dei tempi medi elevati, dall'altro anche per via della presenza di un altro servizio di trasporto pubblico, ovvero quello dei taxi condivisi.

I taxi condivisi, assimilabili a un ulteriore sistema di trasporto pubblico, sono il modo di trasporto più scelto. Questo risultato non sorprende in quanto rappresentano l'unica strategia a cui è concesso l'ingresso nelle aree interne ai superblocks, risultando più vantaggiosi per gli utenti. Altre caratteristiche che influenzano la diffusione del servizio

sono il dimensionamento, ovvero il numero di taxi implementati nella simulazione, e i limiti di velocità imposti, sia internamente, sia esternamente ai blocchi. In particolare, abbassando tali limiti per i taxi che transitano nelle aree interne ai blocchi, è probabile che la percentuale di utenti che scelgono di spostarsi con tale mezzo, diminuisca.

Infine, si sottolinea che le percentuali di ripartizione modale ottenute dipendono dal numero di iterazioni svolte nell'applicazione del metodo Relaxation (paragrafo 3.4). In particolare, nel presente studio si realizzano quattro iterazioni, ma considerando un numero di iterazioni maggiore gli utenti potrebbero svolgere scelte differenti sulla base delle loro esperienze pregresse e indurre ulteriori shift modali.

Relativamente al Trasporto Pubblico Locale, l'intero servizio è caratterizzato da una velocità commerciale di 20,9 km/h. Tale valore risulta leggermente superiore rispetto a quello della velocità commerciale degli autobus che svolgono il servizio di trasporto pubblico in Italia, pari a 19,4 km/h, alla velocità commerciale degli autobus in Emilia-Romagna (20,7 km/h), e a Bologna centro città (16,2 km/h) [83]. La Fig. 5.p mostra la distribuzione di frequenza delle velocità commerciali delle linee di trasporto pubblico realizzate nello Scenario Base. Si nota che la minima velocità appartiene alla classe [12, 14] km/h, che è presente un picco nella classe [20, 22] km/h e che la massima velocità appartiene alla classe [28, 30] km/h. Si sottolinea inoltre che lo spazio percorso dall'intera flotta dei veicoli costituenti il servizio di trasporto pubblico locale è pari a 5076 km.

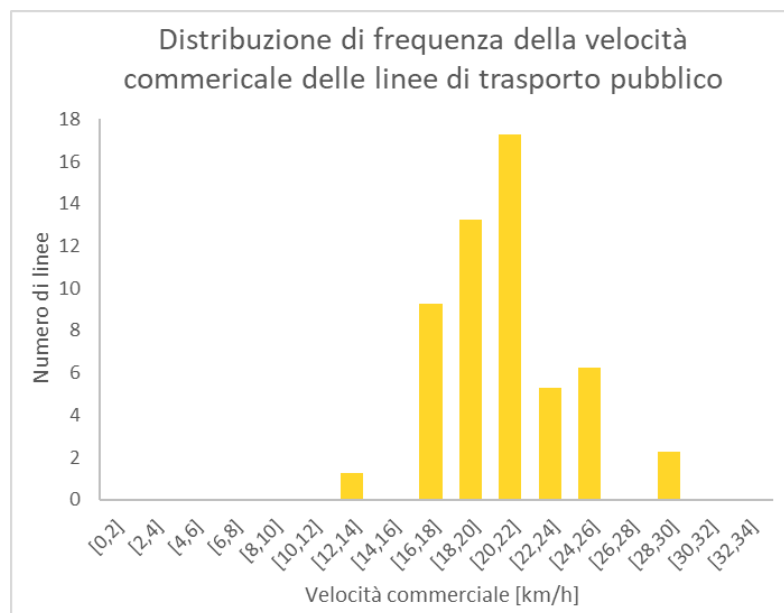


Fig. 5.p: distribuzione di frequenza della velocità commerciale delle linee di trasporto pubblico dello Scenario Superblock

5.4. Confronto: Scenario Base – Scenario Superblock

Dall'analisi dei risultati ottenuti in entrambe le simulazioni si nota che, a fronte di flussi sugli archi della rete circa dello stesso ordine di grandezza, la distribuzione dei veicoli risulta differente (Fig. 5.a e Fig. 5.j). La diversa distribuzione dei veicoli sulla rete è la causa principale dell'attuazione del modello di Superblock, in quanto nelle strade interne ai blocchi è vietata la circolazione delle auto private. Questo si riflette positivamente sia nei singoli blocchi e nelle strade interne ad essi, ma anche a livello macroscopico su tutta la rete, influenzando sia i parametri cinematici, sia i parametri trasportistici, sia i parametri ambientali, di cui si riporta una sintesi nella tabella in Fig. 5.q.

	Densità media [veh/km]	Densità massima [veh/km]	Velocità media [km/h]	Emissioni specifiche medie CO [kg/km/h]	Emissioni assolute CO [kg]	Consumo assoluto carburante [l]	Emissioni acustiche [dB]
Scenario Base	8	902	22	3,31	13526	134853	33
Scenario Superblock	3	595	23	1,21	6748	81163	30
Confronto %	-64%	-34%	4%	-63%	-50%	-40%	-9%

Fig. 5.q: tabella che esprime un confronto sintetico tra i due Scenari relativamente ad alcuni dei parametri disponibili, calcolati in riferimento all'intera rete considerata

Relativamente ai parametri cinematici e trasportistici, si nota un netto miglioramento; infatti, passando dallo Scenario Base allo Scenario Superblock si assiste a un calo della densità, sia in valore medio sia in valore massimo, rispettivamente pari al 64% e al 34%. D'altra parte, la velocità media sull'intera rete vede un leggero aumento, pari al 4%, pur continuando a mantenere valori relativamente bassi e idonei per un'analisi che comprende anche il centro città, senza incrementare significativamente il rischio di incidenti per i pedoni; infatti, anche la velocità massima nei due scenari resta pressoché invariata.

Anche considerando i parametri relativi all'inquinamento, ambientale e acustico, si assiste a un miglioramento nel passaggio allo Scenario Superblock. Relativamente alle emissioni acustiche, avviene un leggero calo, pari circa al 9%. Analizzando nel dettaglio le emissioni ambientali e in particolare quelle di monossido di carbonio, si nota che calano sia a livello globale su tutta la rete, mostrando una riduzione delle emissioni assolute pari al 50%, sia in riferimento alle emissioni specifiche medie, che calano addirittura del 63%. Tale valore, seppur molto elevato, non stupisce: essendo le emissioni specifiche calcolate

in riferimento alla lunghezza totale della rete, è coerente che il valore ottenuto risulti molto basso a causa delle regole di circolazione imposte dalla presenza dei Superblock. Inoltre, anche il consumo assoluto di carburante sull'intera rete cala del 40%, risultato atteso e in linea con il calo delle emissioni di CO. Si sottolinea che i valori ottenuti in riferimento agli altri inquinanti analizzati, mostrati nella tabella in Fig. 5.r, mostrano tutti una tendenza di netto calo analoga a quella illustrata per il monossido di carbonio, ad eccezione degli ossidi di azoto. Infatti, contrariamente alle aspettative e agli andamenti mostrati dagli altri inquinanti, NO_x aumenta nel passaggio al primo dal secondo scenario, sia in valore assoluto, sia in valore specifico, rispettivamente del 10% e del 17%.

	Emissioni assolute CO ₂ [kg]	Emissioni assolute NO _x [kg]	Emissioni assolute PM _x [kg]	Emissioni specifiche medie CO ₂ [kg/km/h]	Emissioni specifiche medie NO _x [kg/km/h]	Emissioni specifiche medie PM _x [kg/km/h]	Consumo spec. medio di carburante [l/km/h]
Scenario Base	308891	52	42	69695	21	9	30
Scenario Superblock	185941	57	28	32086	24	5	14
Confronto %	-40%	10%	-34%	-54%	17%	-50%	-54%

Fig. 5.r: tabella che esprime un confronto sintetico tra i due Scenari relativamente alle emissioni degli inquinanti ambientali, calcolati in riferimento all'intera rete considerata

Le osservazioni sopra, riferite globalmente allo scenario, trovano riscontro anche a livello locale. Nel dettaglio, considerando una stessa area, corrispondente a uno dei blocchi, in entrambi gli Scenari, l'analisi precedente risulta valida, mantenendo tutte le tendenze e gli andamenti di calo e di crescita dei parametri. Pertanto, si illustra con particolare attenzione un esempio significativo costituito dal Superblock delimitato da Via Emilia Levante, Via degli Ortolani, Via Po' e Via Arno, Fig. 5.s, nella parte est di Bologna.



Fig. 5.s: individuazione di un Superblock esemplificativo e oggetto di analisi

La Fig. 5.t mostra la distribuzione dei flussi simulati sugli archi nello Scenario Base (1) e nello Scenario Superblock (2), nell'intero intervallo di simulazione pari a 2h. Si può notare che nello Scenario Base in corrispondenza delle vie interne, quali Via Bellaria, Via Friuli-Venezia Giulia, Via Calabria e Via Lombardia siano presenti veicoli; d'altra parte, nello Scenario Superblock in corrispondenza delle stesse vie non avviene alcun ingresso.



Fig. 5.t: flussi simulati sugli archi in un dato superblock nello Scenario Base (1)



Fig. 5.t: flussi simulati sugli archi in un dato superblock nello Scenario Superblock (2)

Le modifiche alla circolazione date dall'applicazione dei superblocks che si riflettono sui flussi sugli archi, si ripercuotono anche sulla distribuzione sulla rete dell'inquinamento acustico, del consumo di carburante e degli inquinanti atmosferici. Infatti, si può osservare un andamento speculare confrontando le emissioni acustiche nella stessa area, rispettivamente Fig. 5.u (1) e (2), in quanto il livello di inquinamento acustico nelle vie interne si riduce approssimativamente da 70 dB a 50 dB, ovvero del 29%, e confrontando le emissioni assolute di CO nei due scenari Fig. 5.v (1) e (2), che calano nuovamente.

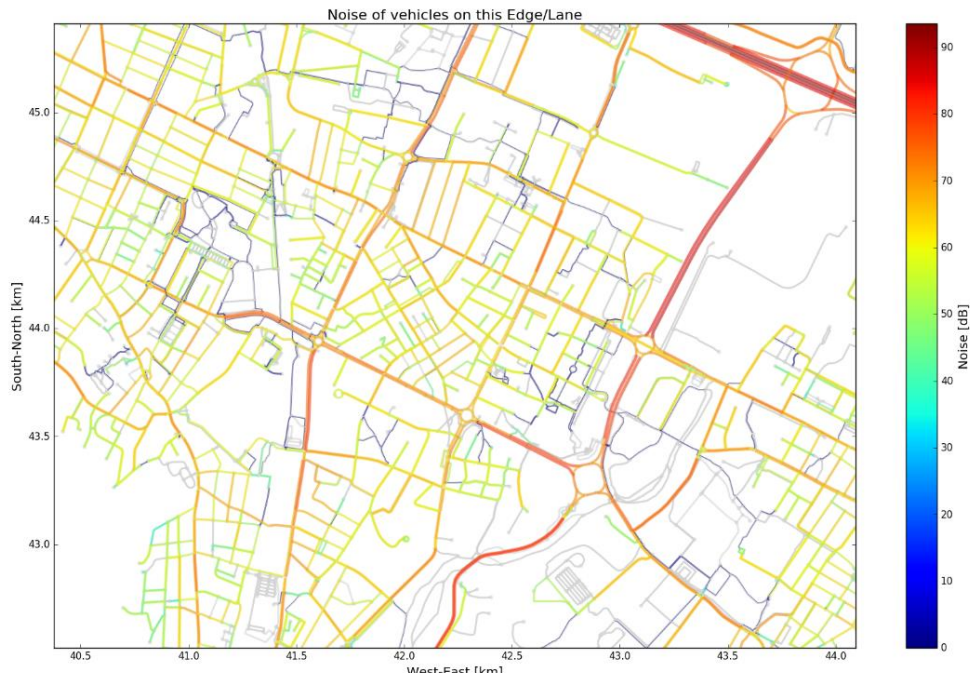


Fig. 5.u: inquinamento acustico sugli archi in un dato superblock nello Scenario Base (1)

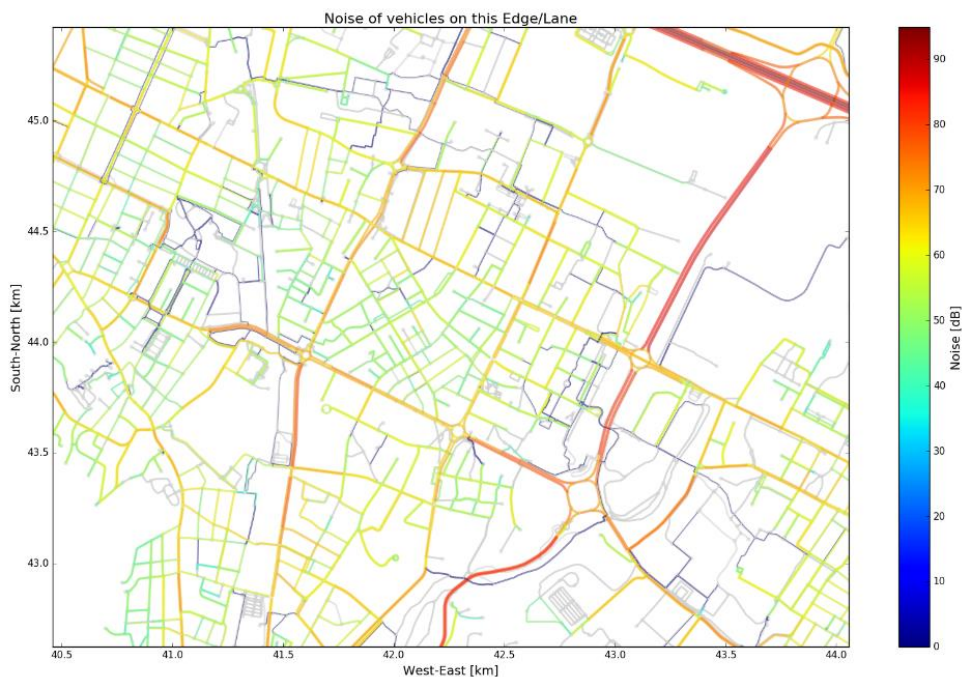


Fig. 5.u: inquinamento acustico sugli archi in un dato superblock nello Scenario Superblock (2)

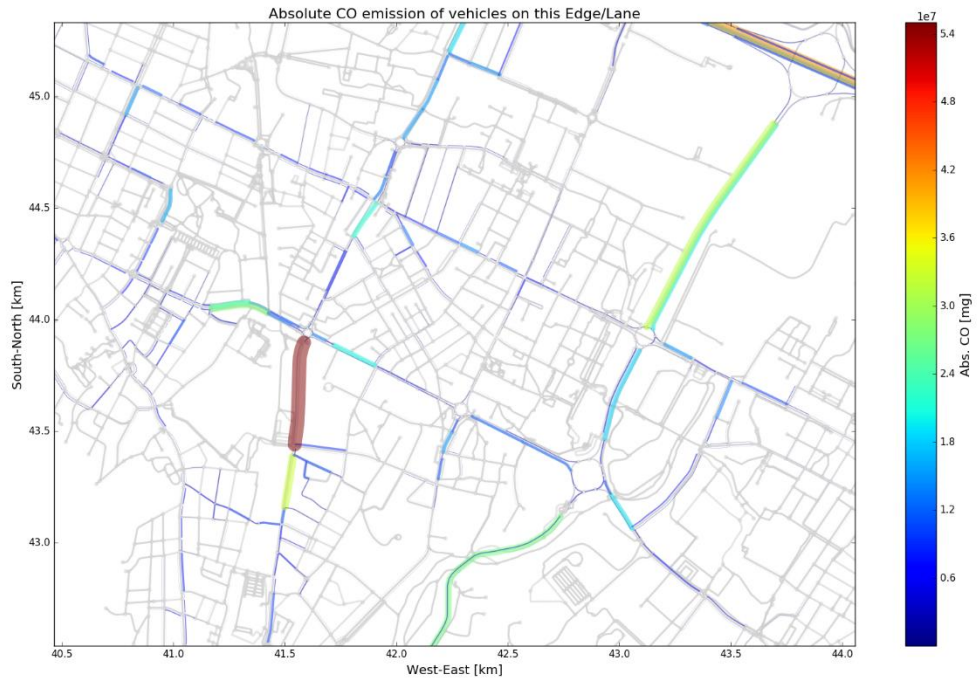


Fig. 5.v: emissioni assolute di CO sugli archi in un dato superblock nello Scenario Base (1)

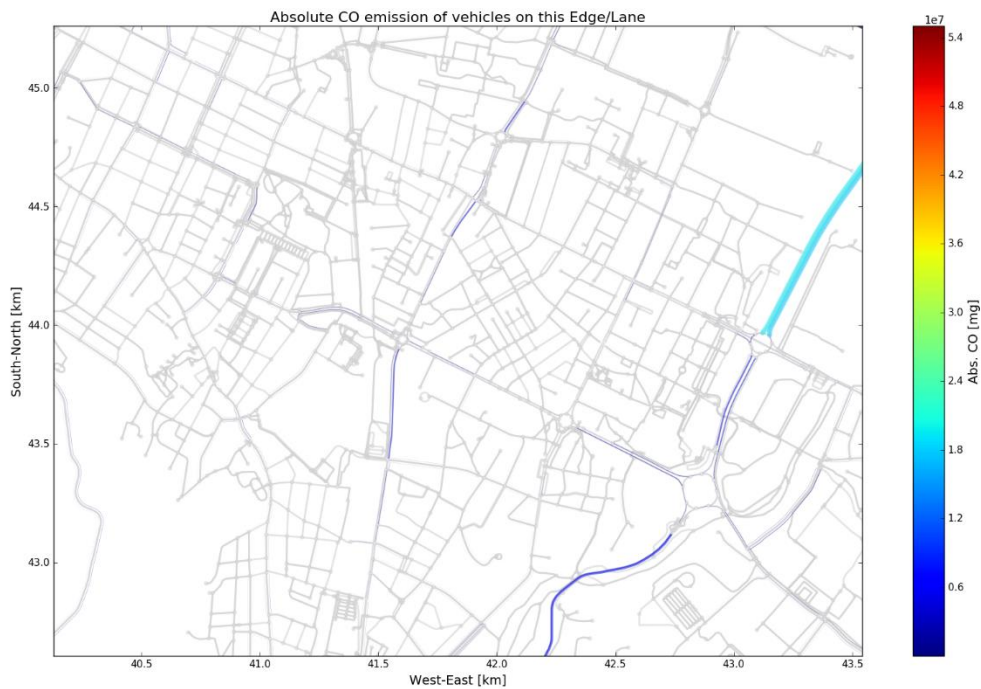


Fig. 5.v: emissioni assolute di CO sugli archi in un dato superblock nello Scenario Superblock (2)

Le regole di circolazione imposte dall'applicazione del modello di Superblock si riflettono chiaramente anche sulla ripartizione modale ottenuta nei due scenari simulati, di cui si mostra un confronto nella Fig. 5.w, considerando i taxi condivisi implementati nello Scenario Superblock come parte del servizio di trasporto pubblico.

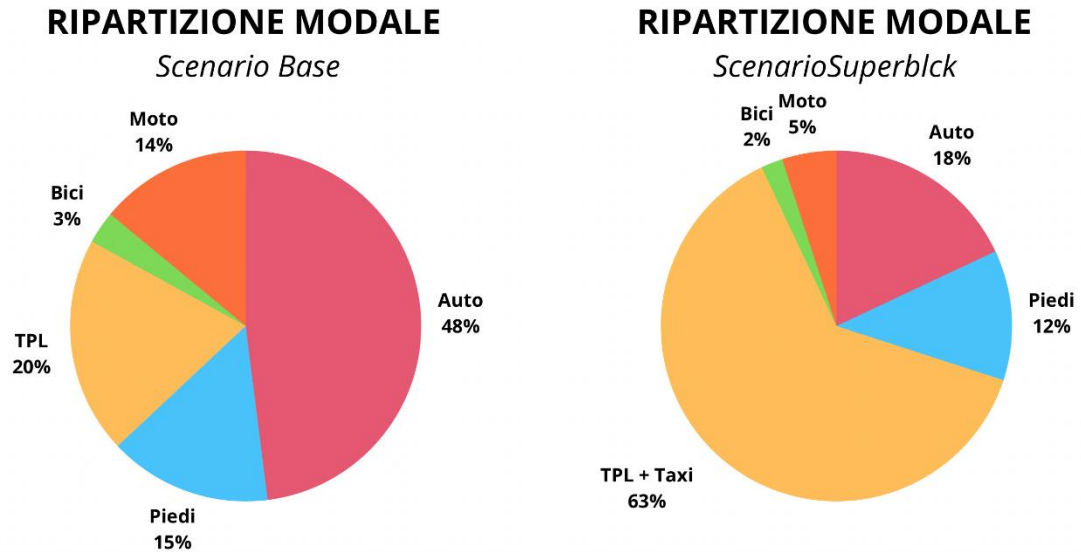


Fig. 5.w: confronto tra la ripartizione modale ottenuta nello Scenario Base (1) e nello Scenario Superblock (2), considerando i taxi condivisi come un ulteriore sistema di trasporto pubblico

Si nota chiaramente la diversa percentuale di utenti che utilizza l'auto privata nei due scenari. Lo shift modale avviene prevalentemente dalla modalità auto alla modalità taxi condiviso, in quanto i taxi rappresentano un'alternativa caratterizzata da una maggiore utilità percepita dagli utenti, per molteplici ragioni. La motivazione principale di una così alta utilità percepita è che, pur essendo caratterizzati dai vantaggi tipici dei mezzi motorizzati, i taxi condivisi possono entrare all'interno dei superblocks, accorciando notevolmente i tempi di percorrenza degli spostamenti e non comportando l'ulteriore spostamento a piedi dai parcheggi centralizzati alle destinazioni finali.

Si evidenzia che diminuisce anche la percentuale di utenti che utilizza il servizio di trasporto pubblico locale standard, sempre a favore dei taxi e delle moto. Si specifica che i taxi condivisi risultano più vantaggiosi anche rispetto al servizio di trasporto pubblico locale standard costituito dagli autobus sia per ragioni di privacy e comfort degli utenti e sia perchè costituiscono un servizio on demand, oltre alle precedenti motivazioni.

La scelta progettuale di consentire ai taxi l'ingresso nelle aree interne ai blocchi, seppur apparentemente in contrasto con il concetto teorico di Superblock, si compie proprio per favorire lo shift modale dall'auto ad altre modalità di trasporto pubblico, seppure non convenzionali, come il taxi condiviso. Infatti, nei contesti reali, gli utenti che abbandonano

definitivamente l'auto privata a favore delle altre modalità rappresentano un'enorme vantaggio per la strategia di pianificazione oggetto di studio poiché comportano un minor numero di parcheggi da provvedere all'interno delle città, garantendo più spazio di verde pubblico. Inoltre, si specifica che la flotta di taxi condivisi adottata nella realtà dovrebbe essere di tipo elettrico, in modo da impattare ancora meno sull'ambiente ed adattarsi il più possibile alla visione della strategia implementata.

Considerando il servizio taxi condiviso come una forma di trasporto pubblico, è possibile confrontare nuovamente i due share modali simulati, rispettivamente con i dati forniti dal PUMS relativi al 2016 e con i valori target previsti per il 2030, Fig. 5.x.

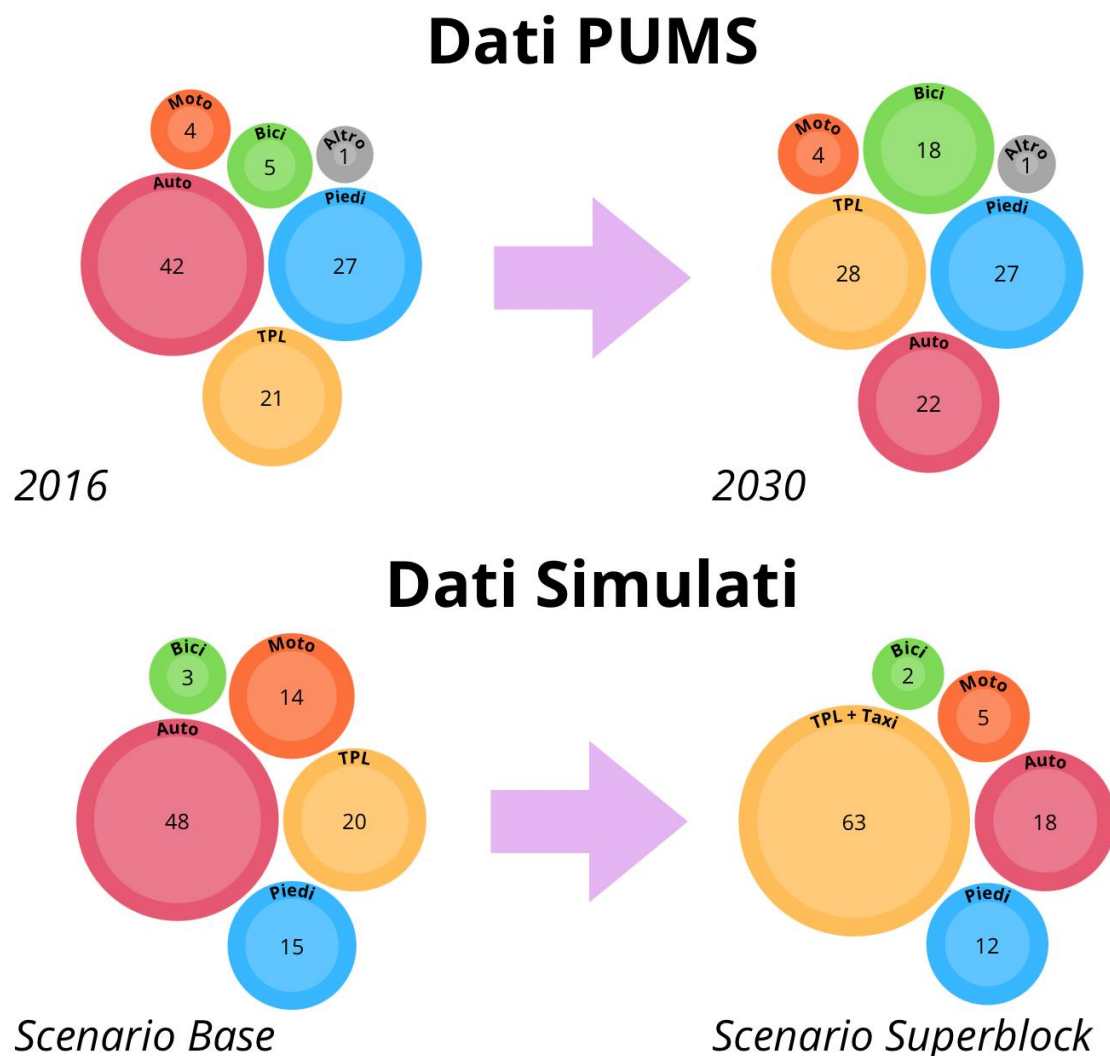


Fig. 5.x: confronto tra lo share modale all'anno 2016 e all'anno 2030, illustrati dal PUMS, rispettivamente con lo share modale dello Scenario Base e dello Scenario Superblock

Nello Scenario Superblock gli utenti si approcciano diversamente anche al Trasporto Pubblico Locale standard su gomma, ovvero gli autobus. In particolare, si assiste inaspettatamente a un calo della percentuale della ripartizione modale (dal 20% all'11%, considerando solamente gli autobus e non i taxi, che contribuiscono col 52% per raggiungere il valore totale di 63% illustrato nelle figure precedenti) a fronte di un incremento del servizio offerto in termini di capacità e delle prestazioni cinematiche raggiunte.

Infatti, nel secondo scenario, per soddisfare un eventuale trasferimento modale dall'auto privata agli autobus, si è incrementata la frequenza, comportando un maggior numero di mezzi circolanti per ogni linea, quindi un aumento del numero di veicoli complessivo della flotta e un aumento dei chilometri totali percorsi del 33%. Inoltre, la modifica delle regole di circolazione sulla rete e la conseguente diversa distribuzione dei veicoli su di essa, dovute all'implementazione dei superblocks, comportano l'incremento della velocità commerciale media della flotta degli autobus, che cresce del 10%, passando da 18,9 km/h a 20,9 km/h. Si sottolinea inoltre che, passando dallo Scenario Base allo Scenario Superblock, cala anche il tempo perso in media da tutti gli autobus appartenenti a ogni linea, pari all'11% in meno. Si nota come, nonostante il raggiungimento di migliori prestazioni cinematiche e l'incremento della capacità del servizio offerto, meno utenti scelgono l'alternativa autobus per compiere i propri spostamenti; pertanto, gli eventuali investimenti per realizzare le modifiche descritte relative al servizio di trasporto pubblico locale standard, non sembrano economicamente vantaggiose.

6. CONCLUSIONE

Le città sono le principali fonti dell'inquinamento ambientale e acustico e si evidenzia come un'efficiente pianificazione dei trasporti costituisca un elemento fondamentale per contribuire a contrastare i fenomeni citati. A tale scopo, il presente elaborato illustra la valutazione dell'applicazione alla città di Bologna di una nuova strategia di pianificazione urbana, intelligente e sostenibile: il modello di Superblock, che ambisce a modificare la pianificazione urbana attuale, fortemente dipendente dall'automobile e causa di elevati livelli di inquinamento e stili di vita sedentari, e a integrare le strategie di pianificazione esistenti, in modo raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione e neutralità climatica delineati nell'Accordo di Parigi.

Le finalità principali del modello si traducono nello studio in interventi che mirano a rivendicare lo spazio pubblico, ridurre i modi di trasporto motorizzati e incentivare la mobilità sostenibile attraverso la riorganizzazione del traffico, senza implicare ingenti investimenti economici e interventi infrastrutturali. La strategia di pianificazione applicata rientra nell'approccio "Avoid-Shift-Improve", ampiamente studiato e diffuso per raggiungere la decarbonizzazione. In particolare, il modello di Superblock proposto consente di ridurre la necessità di spostamento ridisegnando gli spazi urbani (avoid), di incentivare un trasferimento modale da veicoli privati a modi di trasporto più sostenibili (shift) e a potenziare le caratteristiche dei veicoli e dei carburanti e perfezionare l'esperienza di viaggio introducendo nuove tecnologie (improve).

Nel dettaglio, il presente elaborato analizza gli impatti provocati dall'applicazione del modello di Superblock in generale sulla città di Bologna, considerando aspetti quali la qualità della vita dei cittadini e la circolazione in ambito urbano, e, in particolare, sul Trasporto Pubblico Locale. Infatti, il trasporto pubblico incarna un aspetto fondamentale nella valutazione della qualità della vita della popolazione, poiché non solo soddisfa l'esigenza di mobilità della popolazione ma garantisce anche attrattività e competitività nel territorio in cui opera.

La metodologia adottata per la valutazione degli impatti prodotti dall'inserimento dei superblocks nell'area di studio consiste inizialmente nella definizione dei criteri per l'identificazione dei superblocks e successivamente si basa sulla realizzazione e

osservazione di due scenari principali, che rappresentano rispettivamente la situazione attuale della città di Bologna e la situazione futura che assiste all'inserimento dei superblocchi. Lo studio e la valutazione di entrambi gli scenari sono condotti grazie alla micro-simulazione, attraverso il software SUMOPy; in particolare, si realizzano una popolazione virtuale e una rete che rispecchia quella reale, ovvero un modello di digital twin della città di Bologna.

Infine, si svolge l'analisi dei risultati prodotti dall'adozione dei superblocchi, con particolare riferimento ai dati relativi al Trasporto Pubblico Locale. In primo luogo, coerentemente con le aspettative, dallo studio emerge che l'attuazione del modello provoca la variazione della distribuzione dei flussi sugli archi della rete. Infatti, la diversa distribuzione veicolare sulla rete è l'effetto principale dell'attuazione del modello di Superblock, in quanto nelle strade interne ai blocchi è vietata la circolazione delle auto private. La modifica alle regole di circolazione, che si riflette sulla distribuzione dei flussi sugli archi, si ripercuote positivamente sia a livello locale, ovvero nelle strade interne ai singoli blocchi, sia a livello globale su tutta la rete, determinando un miglioramento generale dell'impatto ambientale in relazione all'inquinamento acustico, al consumo di carburante e agli inquinanti atmosferici. In particolare, il netto miglioramento in termini ambientali è determinato dal calo del 9% del livello di inquinamento acustico e dalla riduzione del 50% delle emissioni totali di monossido di carbonio rispetto alla situazione attuale simulata.

Si osserva che le regole di circolazione imposte dall'applicazione del modello di Superblock si riflettono in maniera evidente anche sulla ripartizione modale ottenuta nei due scenari simulati. Nel dettaglio, nonostante i miglioramenti apportati al servizio autobus in termini di capacità e prestazioni cinematiche, avviene un rilevante trasferimento modale dall'auto privata e dai bus verso i taxi condivisi, strategia assimilabile a un ulteriore sistema di trasporto pubblico. Il trasferimento che si verifica dall'auto privata ai taxi è dovuto prevalentemente al fatto che, pur essendo caratterizzati dai vantaggi tipici dei mezzi motorizzati, i taxi condivisi possono entrare all'interno dei superblocchi, accorciando notevolmente i tempi di percorrenza e senza comportare ulteriori spostamenti a piedi. Il trasferimento modale dagli autobus ai taxi si spiega considerando, oltre alle precedenti motivazioni, anche le necessità di privacy e comfort di viaggio degli utenti e la realizzazione di un servizio on demand, a contrario del

trasporto pubblico locale standard. Considerando che, nonostante l'incremento delle prestazioni cinematiche e della capacità del servizio di autobus, i dati mostrano una riduzione percentuale degli utenti che scelgono tale mezzo, eventuali investimenti per realizzare i miglioramenti descritti, non sembrano economicamente vantaggiosi.

La scelta progettuale di consentire ai taxi l'ingresso nelle aree interne ai blocchi, seppur apparentemente in contrasto con il concetto teorico di Superblock, favorisce il trasferimento modale dall'auto ad altri mezzi pubblici, anche non convenzionali, come i taxi condivisi. Nelle applicazioni reali, gli utenti che abbandonano definitivamente l'auto privata a favore delle altre modalità rappresentano un vantaggio per la strategia di pianificazione attuata poiché comportano un minor numero di parcheggi da provvedere all'interno delle città, garantendo più spazio di verde pubblico. Inoltre, la flotta di taxi condivisi adottata dovrebbe essere di tipo elettrico, in modo da diminuire l'impatto sull'ambiente ed adattarsi il maggiormente alla visione della strategia implementata.

Si sottolinea che, confrontando i risultati di entrambe le simulazioni con i dati forniti dal PUMS, la ripartizione modale dello scenario attuale risulta decisamente coerente con quella disponibile al 2016, e la ripartizione modale dello scenario con i superblocks determina dei valori percentuali compatibili con i valori target proposti per il 2030.

Infine, nella trattazione è presente anche la realizzazione di un ulteriore scenario, che rappresenta un eventuale ampliamento dello studio, descritto solamente in maniera qualitativa, caratterizzato dall'inserimento del sistema di trasporto pubblico PRT nella città di Bologna. Tale soluzione richiederebbe sicuramente importanti investimenti economici e infrastrutturali, ma rappresenta un ottimo elemento da considerare per la pianificazione della città in riferimento a un orizzonte temporale maggiore.

7. FONTI: BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] Serrano, W. Digital Systems in Smart City and Infrastructure: Digital as a Service. *Smart Cities* **2018**, *1*, 134–153, doi:10.3390/smartcities1010008.
- [2] Savithramma, R.M.; Ashwini, B.P.; Sumathi, R. Smart Mobility Implementation in Smart Cities: A Comprehensive Review on State-of-Art Technologies. In Proceedings of the 2022 4th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT); IEEE: Tirunelveli, India, January 20 2022; pp. 10–17.
- [3] Mueller, N.; Rojas-Rueda, D.; Khreis, H.; Cirach, M.; Andrés, D.; Ballester, J.; Bartoll, X.; Daher, C.; Deluca, A.; Echave, C.; et al. Changing the Urban Design of Cities for Health: The Superblock Model. *Environment International* **2020**, *134*, 105132, doi:10.1016/j.envint.2019.105132.
- [4] Barth, M.; Boriboonsomsin, K. Real-World Carbon Dioxide Impacts of Traffic Congestion. *Transportation Research Record* **2008**, *2058*, 163–171, doi:10.3141/2058-20.
- [5] *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications*; Toth, P., Vigo, D., Eds.; MOS-SIAM series on optimization; 2. ed.; Society for Industrial and Applied Mathematics: Philadelphia, 2014; ISBN 978-1-61197-358-7.
- [6] VanDerHorn, E.; Mahadevan, S. Digital Twin: Generalization, Characterization and Implementation. *Decision Support Systems* **2021**, *145*, 113524, doi:10.1016/j.dss.2021.113524.
- [7] Berger, T.; Sallez, Y.; Raileanu, S.; Tahon, C.; Trentesaux, D.; Borangiu, T. Personal Rapid Transit in an Open-Control Framework. *Computers & Industrial Engineering* **2011**, *61*, 300–312, doi:10.1016/j.cie.2010.12.010.
- [8] Poliziani, C.; Schweizer, J.; Rupi, F. Sviluppo di un modello di domanda basato sulle attività tramite micro-simulazioni di reti di trasporto multi-modali. *Tesi di laurea in Laboratorio di infrastrutture viarie e trasporti*, a.a. **2017-2018**.
- [9] Dorokhin, S.; Artemov, A.; Likhachev, D.; Novikov, A.; Starkov, E. Traffic Simulation: An Analytical Review. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **2020**, *918*, 012058, doi:10.1088/1757-899X/918/1/012058.
- [10] Morgano, D.; Schweizer, J.; Rupi, F.; Poliziani, C. Micro-simulazione di traffico sulla rete di bologna, con domanda basata sulle attività e calibrazione di una funzione di utilità. *Tesi di laurea in Laboratorio di infrastrutture viarie e trasporti*, a.a. **2018-2019**.
- [11] Gastaldi, M.; Meneguzzer, C.; Rossi, R.; Lucia, L.D.; Gecchele, G. Evaluation of Air Pollution Impacts of a Signal Control to Roundabout Conversion Using Microsimulation. *Transportation Research Procedia* **2014**, *3*, 1031–1040, doi:10.1016/j.trpro.2014.10.083.

- [12] Alam, M.J.; Habib, M.A. Mass Evacuation of Halifax, Canada: A Dynamic Traffic Microsimulation Modeling Approach. *Procedia Computer Science* **2019**, *151*, 535–542, doi:10.1016/j.procs.2019.04.072.
- [13] Manser, P.; Becker, H.; Hörl, S.; Axhausen, K.W. Designing a Large-Scale Public Transport Network Using Agent-Based Microsimulation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **2020**, *137*, 1–15, doi:10.1016/j.tra.2020.04.011.
- [14] Zhao, Y.; Sadek, A.W. Large-Scale Agent-Based Traffic Micro-Simulation: Experiences with Model Refinement, Calibration, Validation and Application. *Procedia Computer Science* **2012**, *10*, 815–820, doi:10.1016/j.procs.2012.06.105.
- [15] VanLandegen, L.D.; Chen, X. Microsimulation of Large-Scale Evacuations Utilizing Metrorail Transit. *Applied Geography* **2012**, *32*, 787–797, doi:10.1016/j.apgeog.2011.08.012.
- [16] Schweizer, J.; Poliziani, C.; Rupi, F.; Morgano, D.; Magi, M. Building a Large-Scale Micro-Simulation Transport Scenario Using Big Data. *IJGI* **2021**, *10*, 165, doi:10.3390/ijgi10030165.
- [17] Melnikov, V.R.; Krzhizhanovskaya, V.V.; Lees, M.H.; Boukhanovsky, A.V. Data-Driven Travel Demand Modelling and Agent-Based Traffic Simulation in Amsterdam Urban Area. *Procedia Computer Science* **2016**, *80*, 2030–2041, doi:10.1016/j.procs.2016.05.523.
- [18] Schweizer, J.; Rupi, F.; Filippi, F.; Poliziani, C. Generating Activity Based, Multi-Modal Travel Demand for SUMO.; pp. 118–101.
- [19] López, I.; Ortega, J.; Pardo, M. Mobility Infrastructures in Cities and Climate Change: An Analysis Through the Superblocks in Barcelona. *Atmosphere* **2020**, *11*, 410, doi:10.3390/atmos11040410.
- [20] Arioli, M.; Fulton, L.; Lah, O. Transportation Strategies for a 1.5 °C World: A Comparison of Four Countries. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **2020**, *87*, 102526, doi:10.1016/j.trd.2020.102526.
- [21] Mårtensson, H.B.; Larsen, K.; Höjer, M. Investigating Potential Effects of Mobility and Accessibility Services Using the Avoid-Shift-Improve Framework. *Sustainable Cities and Society* **2023**, *96*, 104676, doi:10.1016/j.scs.2023.104676.
- [22] Schepel, S. Woonerf revisited: Delft as an example. *Childstreet* **2005**.
- [23] Karndacharuk, A.; Wilson, D. J.; Dunn, R. C. M. Evaluating shared spaces: methodological framework and performance index. *Road & Transport Research* **2013**, *22*, 2, 52-61.

- [24] Kukina, I. V.; Fedchenko, I. G. Rethinking evolution of spatial structure of russian microdistrict in the post-soviet space. *Post socialist urban form* **2019**, 273-280.
- [25] Nobis, C. The impact of car-free housing districts on mobility behaviour - case study. *Transactions on Ecology and the Environment* **2003**, 67, 701-710.
- [26] Brain, S. The 15 Minutes-City: For a New Chrono-Urbanism! - Pr Carlos Moreno. *Carlos Moreno* 2019. Available Online: <http://www.moreno-web.net/the-15-minutes-city-for-a-new-chrono-urbanism-pr-carlos-moreno/> (accesso agosto 2023)
- [27] Nieuwenhuijsen, M.J. New Urban Models for More Sustainable, Liveable and Healthier Cities Post Covid19; Reducing Air Pollution, Noise and Heat Island Effects and Increasing Green Space and Physical Activity. *Environment International* **2021**, 157, 106850, doi:10.1016/j.envint.2021.106850.
- [28] Ge, X.; Han, D. Sustainability-Oriented Configurational Analysis of the Street Network of China's Superblocks: Beyond Marshall's Model. *Frontiers of Architectural Research* **2020**, 9, 858–871, doi:10.1016/j.foar.2020.07.001.
- [29] Scoppa, M.; Bawazir, K.; Alawadi, K. Straddling Boundaries in Superblock Cities. Assessing Local and Global Network Connectivity Using Cases from Abu Dhabi, UAE. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **2019**, 130, 770–782, doi:10.1016/j.tra.2019.09.063.
- [30] Maing, M. Superblock Transformation in Seoul Megacity: Effects of Block Densification on Urban Ventilation Patterns. *Landscape and Urban Planning* **2022**, 222, 104401, doi:10.1016/j.landurbplan.2022.104401.
- [31] Caballero, H.; Hidalgo, L.; Quijada-Alarcon, J. Study of Pedestrian Zone According to Superblock Criteria in the Casco Antiguo of Panama. *Sustainability* **2022**, 14, 3459, doi:10.3390/su14063459.
- [32] Rodriguez-Rey, D.; Guevara, M.; Linares, M.P.; Casanovas, J.; Armengol, J.M.; Benavides, J.; Soret, A.; Jorba, O.; Tena, C.; García-Pando, C.P. To What Extent the Traffic Restriction Policies Applied in Barcelona City Can Improve Its Air Quality? *Science of The Total Environment* **2022**, 807, 150743, doi:10.1016/j.scitotenv.2021.150743.
- [33] Miralles, J. L.; Saraguro, J. Z. O. Mobility for Valencia City Centre – a Case Study. *Real Corp* **2017**, 373-382.
- [34] Schweizer, J.; Rupi, F. 1 Personal Rapid Transit Simulations with SUMO.
- [35] Schweizer, J.; Mantecchini, L.; Greenwood, J. Analytical Capacity Limits of Personal Rapid Transit Stations. In Proceedings of the Automated People Movers and Transit Systems 2011; American Society of Civil Engineers: Paris, France, November 30 2011; pp. 326–338.

- [36] Is Austin Ready for Personal Rapid Transit? Available online: <https://nextcity.org/urbanist-news/austin-personal-rapid-transit-idea> (accesso agosto 2023)
- [37] Arslan, O.; Reichert, M.; Sellaouti, A.; Hoffmann, S. Investigation of Personal Rapid Transit Station Capacities Using Microscopic Traffic Simulation. In Proceedings of the 2021 7th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS); IEEE: Heraklion, Greece, June 16 2021; pp. 1–6.
- [38] Anderson, J.E. A Review of the State of the Art of Personal Rapid Transit. *ATR* **2000**, *34*, 3–29, doi:10.1002/atr.5670340103.
- [39] Tahmasseby, S.; Kattan, L. Investigating Economic Viability of Personal Rapid Transit (PRT) System for a University Campus and Its Surroundings.; 2013.
- [40] Lawson, M. Personal Rapid Transit for Airport Applications. *Transportation Research Record* **1930**.
- [41] Marconi Express | Veloce, frequente, comodo, elettrico Available online: <https://www.marconiexpress.it/> (accesso agosto 2023).
- [42] About Us Available online: <https://pisa-mover.com/en/about-us/> (accesso Agosto 2023).
- [43] Freng, L.; Vincent, M. Preparing for PRT Operations at Heathrow Airport.; 2010.
- [44] Li, H.; Chen, Y.; Li, J.; Van Zuylen, Henk.J.; Van Arem, B. Demand Modeling of Innovative Transport System PRT at the Rotterdam Port Area. In Proceedings of the 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems; IEEE: Funchal, Madeira Island, Portugal, September 2010; pp. 137–142.
- [45] Gotzler, F.; Neumann, F.; Adenaw, L. Assessment of Personal Rapid Transit System Configurations Regarding Efficiency and Service Quality. *Future Transportation* **2022**, *2*, 734–752, doi:10.3390/futuretransp2030041.
- [46] Choudhary, J.; Sharma, A. Design and Feasibility Analysis of Personal Rapid Transit Network for an Indian Heritage City. **2016**.
- [47] SUMO Documentation. Available online: <https://sumo.dlr.de/docs/index.html> (accesso agosto 2023).
- [48] Welcome to Python.Org. Available online: <https://www.python.org/> (accesso Agosto 2023).

- [49] SUMOPy - SUMO Documentation. Available online: <https://sumo.dlr.de/docs/Contributed/SUMOPy.html> (accesso agosto 2023).
- [50] *Reports of the DLR-Institute of Transportation Systems*. Proceedings of the 1st SUMO User Conference SUMO2013, Berlin, May **2013**.
- [51] OpenStreetMap. Available online: <https://www.openstreetmap.org/> (accesso Agosto 2013).
- [52] Magi, M.; Schweizer, J.; Rupi, F.; Poliziani, C. Modello di micro-simulazione di traffico sull'intera area urbana di Bologna. *Tesi di laurea in Laboratorio di infrastrutture viarie e trasporti*, a.a. **2018-2019**.
- [53] Rupi, F.; Poliziani, C.; Schweizer, J. Data-Driven Bicycle Network Analysis Based on Traditional Counting Methods and GPS Traces from Smartphone. *IJGI* **2019**, 8, 322, doi:10.3390/ijgi8080322.
- [54] Stupar, A.; Jovanović, P.; Ivanović Vojvodić, J. Strengthening the Social Sustainability of Super-Blocks: Belgrade's Emerging Urban Hubs. *Sustainability* **2020**, 12, 903, doi:10.3390/su12030903.
- [55] Eggimann, S. The Potential of Implementing Superblocks for Multifunctional Street Use in Cities. *Nat Sustain* **2022**, 5, 406–414, doi:10.1038/s41893-022-00855-2.
- [56] Bologna - Bologna BO. Available online: <https://www.google.com/maps/place/Bologna+BO/@44.4991361,11.3316855,12z/data=!3m1!4b1!4m6!3m5!1s0x477fd498e951c40b:0xa2e17c015ba49441!8m2!3d44.494887!4d11.3426162!16zL20vMDk2ZzZM?entry=ttu> (accesso agosto 2023).
- [57] Abitanti | Quartieri Available online: <http://inumeridibolognametropolitana.it/quartieri/abitanti> (accesso agosto 2023)
- [58] Il territorio Available online: https://www.cittametropolitana.bo.it/portale/Il_territorio (accesso agosto 2023).
- [59] Mobility report: i dati della mobilità nella città metropolitana di Bologna Available online: https://pumsbologna.it/Home/Mobility_report_le_anticipazioni_sui_principali_dati_della_mobilita_nella_citta_metropolitana_di_Bologna#a (accesso agosto 2023).
- [60] Piano Urbano della Mobilità Sostenibile (PUMS). Bologna, Novembre 2018.

- [61] Territorio | 100 grafici - noibologna Available online: <http://inumeridibolognametropolitana.it/100grafici/territorio> (accesso agosto 2023).
- [62] Mobilità dall'ascolto della città. Available online: https://opendata.comune.bologna.it/pages/mobilita_dallascolto_della_citta/ (accesso Agosto 2023)
- [63] Mobilità sostenibile | 100 grafici – noibologna. Available online: <http://inumeridibolognametropolitana.it/100grafici/mobilit%C3%A0-sostenibile> (accesso agosto 2023).
- [64] Censimento popolazione e abitazioni 2001. Available online: <https://www.istat.it/it/archivio/3847> (accesso agosto 2023).
- [65] TPER - Trasporto Passeggeri Emilia Romagna. Available online: <https://www.tper.it/> (accesso agosto 2023).
- [66] Trasporto pubblico locale | 100 grafici – noibologna. Available online: <http://inumeridibolognametropolitana.it/100grafici/trasporto-pubblico-locale> (accesso agosto 2023).
- [67] TPER - Chi siamo. Available online: <https://www.tper.it/azienda/chi-siamo> (accesso agosto 2023).
- [68] TRenitaliatper - Lasocieta. Available online: <https://www.trenitaliatper.it/s/la-societa?language=it> (accesso agosto 2023).
- [69] TPERMezziXClasseAmbientale. Available online: <http://inumeridibolognametropolitana.it/dati-statistici/tper-spa-parco-vetture-numero-mezzi-urbani-classe-euro-serie-storica> (accesso agosto 2023).
- [70] TPER Spa. Parco Vetture - Numero Mezzi Urbani Con Diverse Caratteristiche Di Accessibilità o Di Comfort - Serie Storica | I Numeri Di Bologna. Available online: <http://inumeridibolognametropolitana.it/dati-statistici/tper-spa-parco-vetture-numero-mezzi-urbani-con-diverse-caratteristiche-di> (accesso agosto 2023).
- [71] Slide corso Pianificazione Territoriale, Conticelli, E., Alma Mater Studiorum – Università di Bologna. La pianificazione integrata territorio trasporti.
- [72] PUMS - Home Page. Available online: <https://pumsbologna.it> (accesso agosto 2023). <https://pumsbologna.it/> (accesso agosto 2023).
- [73] PUMS - Obiettivi generali. Available online: https://pumsbologna.it/Obiettivi/Obiettivi_generali (accesso agosto 2023).

- [74] PUMS - Obiettivi Bologna Città. Available online: https://pumsbologna.it/Obiettivi/Obiettivi_generali/Obiettivi_Bologna_Citta (accesso agosto 2023).
- [75] TPER. Mappa. Available online: https://www.tper.it/sites/tper.it/files/ESTERNO_mappa_2019.pdf (accesso agosto 2023)
- [76] Parcometri a Bologna. Available online: <https://www.comune.bologna.it/muoversi/sosta-parcheggi> (accesso settembre 2023).
- [77] Bologna Città Metropolitana Di Bologna Italia Parcheggio - Parcheggi, Garage, Parcometri, Parcheggi Privati. Available online: https://en.parkopedia.com/parking/locations/bologna_citt%C3%A0_metropolitana_di_bologna_italia_i706srbj45g7q90c3e/?arriving=202309072100&leaving=202309072300 (accesso settembre 2023).
- [78] SNPA. *Qualità dell'ambiente urbano: inquinamento dell'aria e cambiamenti climatici*. Technical Report, 2020.
- [79] Inquinamento Acustico: Cos'è e Cosa Rischiamo? Available online: <https://heracomm.gruppohera.it/cambiamenti/news/inquinamento-acustico-cos-%C3%A8-e-cosa-rischiamo-> (accesso Settembre 2023).
- [80] Ministero della Salute. *Direzione generale della prevenzione sanitaria: monossido di carbonio (CO)*. Technical Report, 2015.
- [81] Le cause dei cambiamenti climatici Available online: https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_it#:~:text=e%20il%202010.-,Cause%20dell'aumento%20delle%20emissioni,assorbendo%20CO2%20dall'atmosfera (accesso settembre 2023).
- [82] EpiCentro Qualità dell'aria in Europa nel 2016 Available online: <https://www.epicentro.iss.it/ambiente/qualita-aria-linee-guida-oms-2021> (accesso settembre 2023).
- [83] ANSA, A. Autobus, la velocità media più alta si registra nelle Marche - Attualità Available online: https://www.ansa.it/canale_motori/notizie/attualita/2018/08/01/autobus-la-velocita-media-piu-alta-si-registra-nelle-marche_e6cf204a-8698-4eed-abf9-4c867bccbf40.html (accesso settembre 2023).