

**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**

**VALUTAZIONE E ANALISI DEGLI IMPATTI PRODOTTI SUL  
TRASPORTO PRIVATO DALL'INSERIMENTO DEI  
SUPERBLOCKS NELLA CITTÀ DI BOLOGNA**

CANDIDATO:

**Leonardo Posati**

RELATORE:

**Chiar.mo Prof. Joerg Schweizer**

CORRELATORE:

**Chiar.mo Prof. Federico Rupi**

**Dott. Ing. Ngoc An Nguyen**

Anno Accademico 2022/2023

Sessione II



## Sommario

INTRODUZIONE .....	4
1. GLI EFFETTI DELL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO E LA SOLUZIONE DEI SUPERBLOCKS .....	5
1.1 I problemi dell'inquinamento atmosferico .....	5
1.2 Possibili interventi sui trasporti e sulla città.....	8
1.3 Il modello dei <i>Superblocks</i> .....	11
1.4 L'esempio di Barcellona .....	14
1.5 Altri modelli urbani utilizzati in Europa.....	20
2. LA MICROSIMULAZIONE.....	22
2.1 Macro e micro-simulazione .....	22
2.2 I modelli della micro-simulazione .....	23
2.3 SUMO.....	25
2.4 SUMOPY .....	25
2.4.1 Rete.....	25
2.4.2 Domanda.....	27
2.4.3 Veicoli e conducenti.....	28
3. RACCOLTA DATI SULL'AREA URBANA DI BOLOGNA .....	33
3.1 Presentazione della città .....	33
3.2 La rete stradale.....	35
3.3 Il parco veicolare .....	36
3.4 Accenni sulla qualità dell'aria ed emissioni .....	38
3.5 La rete ciclabile .....	40
3.6 Statistiche sull'incidentalità.....	42
4. APPLICAZIONE DEL MODELLO DEI <i>SUPERBLOCKS</i> ALLA CITTÀ DI BOLOGNA.....	44

4.1 Introduzione al progetto .....	44
4.2 <i>Base Scenario</i> .....	47
4.3 <i>Superblock Scenario</i> .....	48
4.4 <i>Superblock + PRT Scenario</i> .....	53
5. ANALISI E CONFRONTO DEI RISULTATI .....	56
5.1 Share modale e utilizzo degli archi.....	56
5.2 Utilizzo dell'automobile .....	62
5.3 Utilizzo della motocicletta.....	63
5.4 Confronto sulla mobilità attiva.....	64
5.5 Emissioni degli inquinanti .....	68
5.6 Confronto in dettaglio tra due <i>superblocks</i> .....	77
CONCLUSIONI.....	81
BIBLIOGRAFIA .....	83

## INTRODUZIONE

In tutto il mondo la pianificazione urbana incentrata sull'utilizzo dell'automobile ha portato negli anni ad abbassare sempre di più i livelli di attività fisica svolta e ad alzare invece quelli dell'inquinamento ambientale, sia di tipo atmosferico che acustico, i quali superano costantemente i limiti dell'OMS causando un notevole onere sanitario.

Il traffico automobilistico risulta essere la causa di più di un quarto delle emissioni globali di sostanze inquinanti, con i motori a scoppio come principali responsabili, dato che, durante l'uso, possono emettere ossidi di azoto, anidride carbonica, biossido di zolfo, particolato e metalli pesanti.

Il disegno urbano densamente costruito delle città lascia poco spazio disponibile per il verde e gli spazi aperti pubblici, in quanto gran parte di queste aree vengono utilizzate per ospitare veicoli a motore, amplificando inoltre la generazione di calore di origine antropica. Risulta dunque necessario adottare nuovi approcci di progettazione urbana sostenibile, per poter affrontare le molteplici sfide che scaturiscono dai problemi sopra evidenziati alle quali vanno ad aggiungersi quelle dovute ai cambiamenti climatici; si deve infatti puntare a progettare delle città intelligenti, sostenibili, vivibili, eque e sane, che applichino soluzioni basate sulla natura, abbiano un'economia circolare e promuovano la mobilità attiva e lo spazio verde, passando così da una città per le auto ad una città per le persone.

La finalità del presente elaborato supporta la Tesi di fattibilità di applicazione del concetto urbano dei *superblocks* alla città di Bologna. Il progetto, svolto in un team con la supervisione del Prof. J. Schweizer, è stato sviluppato in laboratorio tramite la creazione di modelli digitali nel software SUMO; in tal modo è stato possibile svolgere delle micro-simulazioni e valutare l'impatto di questa nuova configurazione della città.

Il modello dei *superblocks* fa parte di un insieme più ampio di modelli di pianificazione urbana, che hanno lo scopo di incentivare l'utilizzo del trasporto pubblico e attivo negli spostamenti, a discapito dell'impiego dell'auto privata, riducendo così l'inquinamento atmosferico ed acustico, e promuovendo l'attività fisica.

Questo elaborato di Tesi si incentra sullo studio delle conseguenze sul trasporto privato, relative al suo utilizzo e le emissioni ad esso correlate, derivanti dall'applicazione di tale modello alla città di Bologna.

# 1. GLI EFFETTI DELL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO E LA SOLUZIONE DEI SUPERBLOCKS

## 1.1 I problemi dell'inquinamento atmosferico

L'inquinamento atmosferico è tra i fattori di rischio principale per la mortalità in tutto il mondo, ed è responsabile di una quantità maggiore di decessi rispetto a molti altri fattori più conosciuti, come la malnutrizione, l'uso di alcol e la scarsa attività fisica.

Gli inquinanti presenti nell'aria hanno infatti delle forti ripercussioni sulla salute umana, in quanto causano problemi respiratori come l'asma, l'enfisema e le allergie, e aumentano il rischio di tumori al polmone e di malattie come il diabete, l'obesità e le malattie cardiovascolari. Gli effetti, che possono essere immediati o manifestarsi anche dopo anni, derivano principalmente dall'esposizione cronica all'inquinamento, che può colpire ogni organo del corpo, aggravando le condizioni di salute preesistenti.

L'Italia risulta essere il primo Paese nell'UE per morti premature imputabili alle polveri sottili, con quasi 70.000 persone decedute prematuramente nel 2020, ovvero oltre un quarto delle circa 300.000 vittime causate dall'inquinamento atmosferico nell'UE, presente in molti paesi oltre i limiti stabiliti dall'OMS.

Gli inquinanti si distinguono in primari, ovvero quelli emessi direttamente nell'atmosfera, e secondari, i quali invece si formano a seguito di reazioni chimiche tra gli inquinanti primari e i componenti naturali presenti in atmosfera, come ossigeno e acqua.

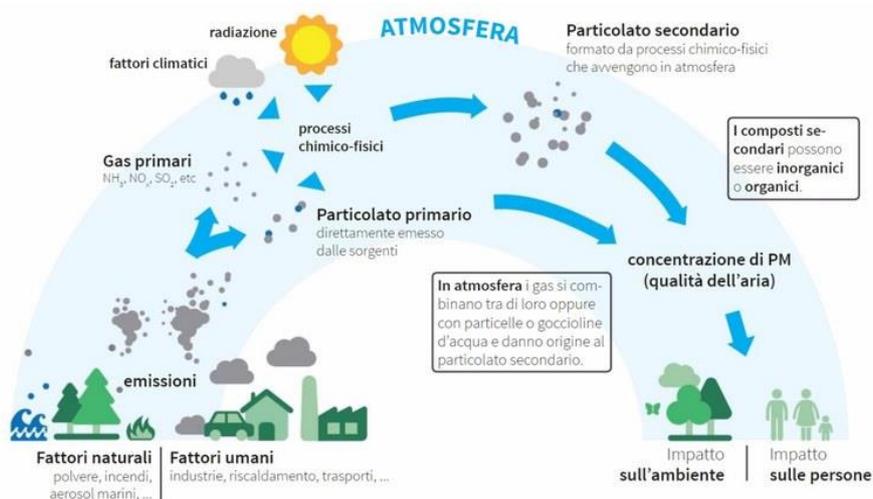


Figura 1.1: Formazione di inquinanti primari e secondari.

Tra i più importanti inquinanti atmosferici ci sono il particolato (PM), l'ozono (O<sub>3</sub>), gli ossidi di zolfo (SO<sub>x</sub>), gli ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>), il benzene (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) e gli Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA).

L'inquinamento atmosferico ha diverse fonti, sia antropiche sia di origine naturale:

- Utilizzo di combustibili fossili nella produzione di elettricità, nei trasporti, nell'industria e nelle abitazioni;
- Processi industriali e utilizzo di solventi, come nell'industria chimica e mineraria;
- Agricoltura;
- Trattamento dei rifiuti;
- Eruzioni vulcaniche, polveri aerodiffuse, spuma del mare ed emissioni di composti organici volatili provenienti dalle piante.

L'esposizione all'inquinamento atmosferico è determinata dall'insieme delle concentrazioni degli inquinanti presenti nell'aria, dal tempo trascorso negli ambienti contaminati e dalla distanza da sorgenti di inquinamento, come ad esempio fabbriche e strade trafficate; di importanza rilevante è il dato per cui circa il 90% degli abitanti delle città risulta essere esposto a concentrazioni di inquinanti superiori ai livelli di qualità dell'aria ritenuti dannosi per la salute.

Uno degli strumenti legislativi a sostegno dell'ambizione di raggiungere un inquinamento zero per avere un ambiente privo di tossine, come annunciato nel Green Deal Europeo, è la direttiva sugli impegni nazionali di riduzione delle emissioni (NEC) dell'Unione Europea, che stabilisce degli obblighi per i paesi membri al fine di ridurre le emissioni di alcuni degli inquinanti principali che hanno impatti negativi significativi sulla salute umana e sull'ambiente.

L'Agenzia Europea dell'Ambiente (AEA), ovvero il centro dati dell'Unione Europea sull'inquinamento atmosferico, è l'organo che sostiene l'attuazione della legislazione dell'UE in relazione alle emissioni atmosferiche e alla qualità dell'aria, contribuendo anche alla valutazione delle politiche dell'UE stessa in materia di inquinamento atmosferico e allo sviluppo di strategie di lungo termine per migliorare la qualità dell'aria in Europa. Di seguito sono riportate le parole del direttore esecutivo dell'AEA, Hans Bruyninckx, che si possono trovare nel sito di informazione dell'Agenzia stessa: "L'inquinamento atmosferico sta danneggiando la salute umana e gli ecosistemi. Larghe

fasce della popolazione non vivono in un ambiente sano, in base alle norme attuali. Per imboccare un cammino sostenibile, l'Europa dovrà essere ambiziosa e andare oltre la legislazione attuale.”.

### How clean is the air in my city?

based on the levels of fine particulate matter measured in the air in cities in 2021 and 2022

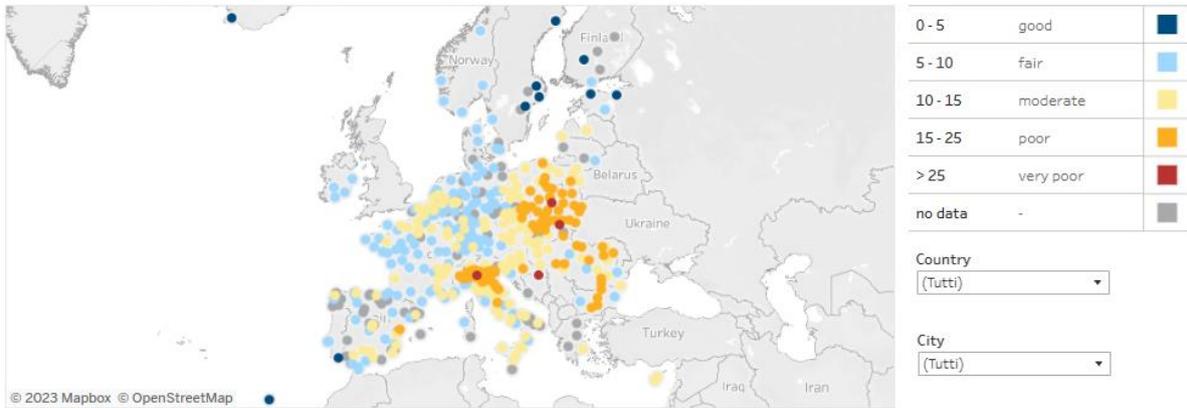


Figura 1.2: Concentrazione annuale del PM2.5 nell'UE, ricavata dal sito dell'AEA.

La salute, il benessere e la sostenibilità sono strettamente interconnessi tra loro. Secondo l'Obiettivo di Sviluppo Sostenibile n.3 delle Nazioni Unite “Assicurare la salute e il benessere per tutti e per tutte le età” risulta fondamentale proteggere il nostro pianeta per garantire la prosperità globale, promuovendo una vita sana e uno sviluppo socioeconomico basato sull'utilizzo sostenibile delle risorse ambientali.

L'obiettivo a lungo termine dell'UE è quello di raggiungere livelli di qualità dell'aria che non comportino conseguenze o rischi inaccettabili per la salute umana e l'ambiente mirando a ridurre l'esposizione all'inquinamento atmosferico e riducendo le emissioni fissando limiti e valori obiettivo per la qualità dell'aria. L'Unione opera su più livelli per ridurre l'esposizione all'inquinamento atmosferico, attraverso la legislazione, la cooperazione con i settori responsabili di tale inquinamento, nonché con le autorità internazionali, nazionali e regionali, le organizzazioni non governative e attraverso la ricerca. Un esempio particolarmente importante da conseguire per il 2030, riguardo gli obiettivi relativi all'inquinamento atmosferico nell'ambito del piano d'azione per l'inquinamento zero prima accennato, è quello di ridurre del 55% il numero di morti premature causate dall'inquinamento atmosferico e del 25% l'area degli ecosistemi dell'UE in cui l'inquinamento atmosferico minaccia la biodiversità.

## 1.2 Possibili interventi sui trasporti e sulla città

Tornando al discorso affrontato nell'introduzione, e rimanendo nell'ambito dei mezzi di trasporto e la riqualificazione delle aree urbane, le principali soluzioni che possono avere un maggior impatto per affrontare la situazione dell'inquinamento atmosferico vanno cercate nell'applicazione di soluzioni strutturali forti. Un'idea a lungo termine, per esempio, è quella della sostituzione di tutti i veicoli vecchi e ad alto inquinamento con mezzi ecologici ed elettrici, insieme all'istituzione e la diffusione di comportamenti pro-ambiente radicati nella cultura delle persone e che ognuno dovrebbe rispettare.

Partendo dalle zone più densamente popolate, che rappresentano la maggioranza delle zone più a rischio degli effetti prodotti dagli inquinanti atmosferici, il lavoro di miglioramento della qualità dell'aria si può iniziare riducendo la circolazione urbana, tramite provvedimenti concreti, come ad esempio la circolazione a targhe alterne, i blocchi del traffico e la creazione di apposite zone chiuse al traffico. Partendo da questi semplici interventi si potrebbe successivamente passare a dei veri e propri modelli urbani, basati su una progettazione che vede come attore principale il cittadino, e non più l'automobile.

La priorità nella pianificazione passerebbe così dalle automobili al trasporto pubblico, agli spostamenti a piedi e in bicicletta, concedendo più spazio pubblico e creando più infrastrutture per quest'ultime modalità di trasporto.



Figura 1.3: Differenza dello spazio occupato dallo stesso numero di persone in auto e in autobus.

I vantaggi legati al trasporto pubblico sono molti:

- Facilita gli spostamenti delle persone, che possono così arrivare dove vogliono (scuola, lavoro, negozi,...);
- È accessibile a persone di tutte le età e ceti sociali;
- Aiuta le persone a risparmiare denaro, poiché i costi di mantenimento di un veicolo sono spesso molto superiori ai costi associati ai trasporti pubblici;
- Diminuisce la presenza degli ingorghi;
- Diminuisce la frequenza degli incidenti legati ai veicoli;
- Aiuta a sostenere l'economia locale.

Quando il trasporto pubblico è disponibile e funziona bene, molte persone scelgono di utilizzarlo invece di guidare la propria auto, evitando in tal modo di affrontare il traffico giornaliero, il quale, di conseguenza, si ridurrebbe, insieme al relativo inquinamento legato al consumo di carburante.

Un altro importante tema è quello relativo alla disponibilità di spazi verdi all'interno della città, i quali, nella maggior parte delle volte, non sono equamente distribuiti all'interno della città stessa. Ai fini del raggiungimento dell'obiettivo di migliorare la vivibilità delle aree abitative, non c'è solo bisogno di nuovi insediamenti come i parchi, ma bensì anche di più verde nelle strade e infrastrutture verdi, per migliorare gli ecosistemi e aumentare la biodiversità nella città. Rendere la città più verde significa indurre molti benefici per la salute, tra cui un'aspettativa di vita più lunga, meno problemi di salute mentale e un miglioramento del funzionamento cognitivo e dell'umore.

Il recupero degli spazi per attività ricreative e comunitarie, tuttavia, aggiunge fascino estetico, fornendo resilienza urbana e adattamento al cambiamento climatico attraverso la fornitura di servizi ecosistemici come, ad esempio, il controllo passivo dell'inquinamento atmosferico e acustico, e il raffreddamento attraverso ombreggiamento ed evapotraspirazione dell'acqua.

Al fine di incentivare l'individuo a camminare, al fine di apportare molti benefici per la sua salute, risulta però importante anche la cura dell'aspetto dell'ambiente edificato, come la pedonalità, la densità residenziale, la connettività stradale, l'accesso e la disponibilità di destinazioni e servizi, le infrastrutture, il paesaggio stradale e la sicurezza.

## Benefits of Urban Trees

Research has linked the presence of urban trees to...

The Nature Conservancy 

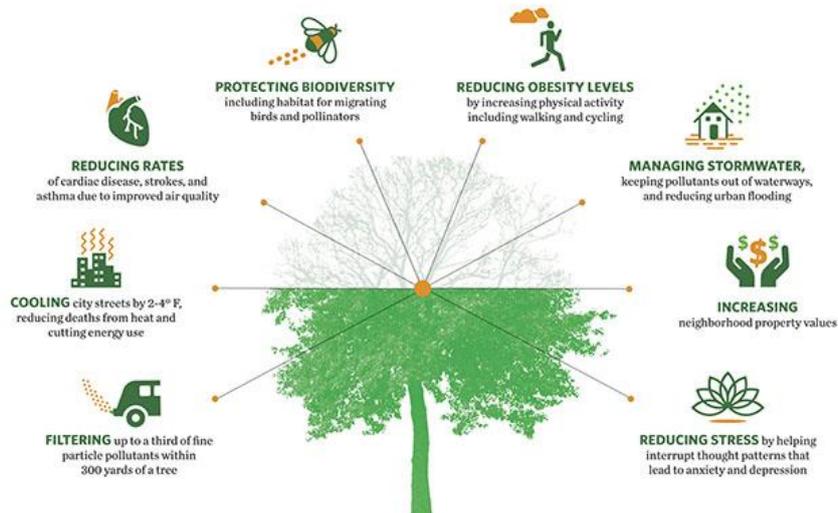


Figura 1.4: Benefici degli alberi in città.

È attestato da tantissime ricerche scientifiche che la camminata abbia una funzione di prevenzione sia primaria che secondaria nei confronti di tutte le patologie coinvolgenti l'apparato cardiocircolatorio, dall'infarto del miocardio, alle arteriopatie periferiche degli arti inferiori o all'ictus cerebrale, ma anche a quelle patologie che sono legate a uno stile di vita non sano, come il fumo, l'elevato consumo di grassi e la sedentarietà. La camminata inoltre potenzia la forza muscolare, la resistenza cardiovascolare, l'elasticità e il rapporto tra il tessuto muscolare e i grassi, migliorando la qualità della vita agendo come antistress e come stimolo psicologico alla positività, rafforzando l'autocontrollo e l'autostima e, se fatta in compagnia, aiutando così anche la socializzazione.

Inoltre, ampliare la rete ciclabile, al fine di aumentare il tasso di utilizzo della bicicletta, è al contempo un modo per ridurre il traffico motorizzato e le relative emissioni, aumentando la mobilità attiva. Il ciclismo porta con sé molti benefici, poiché combinando il trasporto con l'attività fisica, riduce le malattie cardiovascolari e il rischio di cancro, non causa inquinamento atmosferico e acustico e utilizza molto meno spazio dell'auto. L'attività respiratoria e aerobica richiesta dalla bicicletta, se praticata con costanza, migliora la resistenza alla fatica e la capacità respiratoria; pedalare inoltre aiuta a bruciare grassi e calorie, con circa 600 kcal in un'ora a pedalata sostenuta, aiutando così a diminuire l'adipe e migliorare il metabolismo tenendo sotto controllo i livelli di colesterolo, glicemia e trigliceridi.

### 1.3 Il modello dei *Superblocks*

La maggior parte delle città è composta da una particolare varietà di dimensioni e forme di isolati urbani, i cosiddetti *blocks*, i quali costituiscono un'importante unità informale di lunghezza, data dalla distanza tra due strade all'interno della griglia stradale. Un isolato è definito come il gruppo più piccolo di edifici che risulta essere circondato da strade, ed esso è considerato un elemento centrale della pianificazione urbana.

Gli isolati urbani sono sviluppati in modo tale che gli edifici siano posizionati lungo il perimetro dell'isolato stesso, con gli ingressi che si affacciano sulla strada e i cortili semi-privati sul retro degli edifici, al fine di fornire una buona interazione sociale tra le persone.

Un *superblock*, o superblocco, è un'area di terreno urbano delimitata da arterie stradali e dalle dimensioni di più isolati di dimensioni tipiche messi insieme, all'interno della quale la rete stradale locale è progettata per soddisfare solo le esigenze locali. Questo modello di organizzazione urbana può anche essere sovrapposto in modo retroattivo al piano della griglia stradale preesistente, modificando le regole del traffico e il paesaggio stradale all'interno dei *superblocks* che lo compongono.

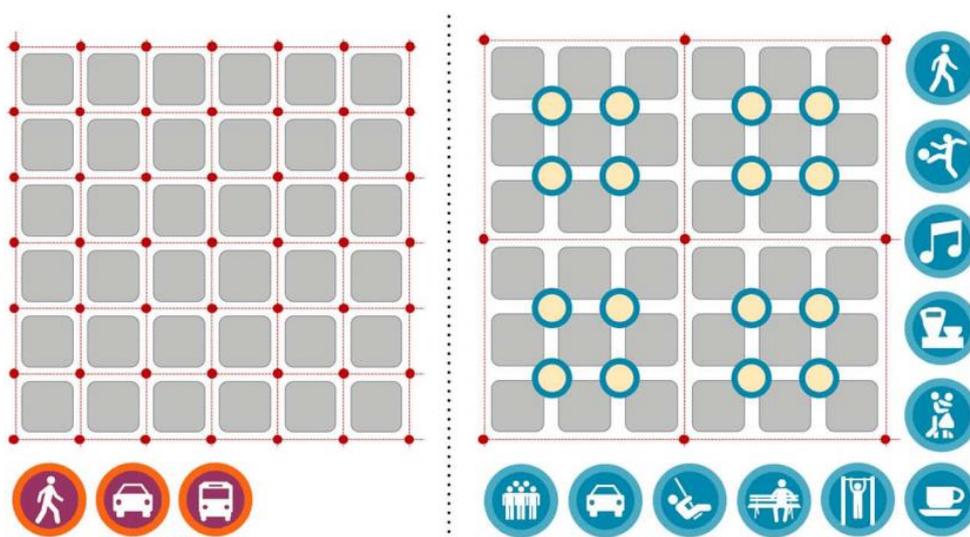


Figura 1.5: Differenza dell'utilizzo della rete stradale tra un modello classico (sinistra) e un modello con *superblocks* (destra).

All'interno del concetto ampio di *superblock*, emergono varie tipologie basate principalmente sulle reti stradali al suo interno, sul loro contesto storico e sul fatto che siano auto-centriche o pedoni-centriche, come nel caso del progetto svolto.

Le strade interne ai *superblocks* forniscono in questo modo una rete locale accessibile esclusivamente al trasporto attivo, come ad esempio a piedi e in bicicletta, e sostenibile, come i monopattini elettrici e le *e-bike*, vietando la circolazione delle automobili, la quale è resa possibile solo sulle strade perimetrali esterne. L'obiettivo principale è quello di creare uno spazio pubblico sano, più verde e più sicuro, che promuova le relazioni sociali e l'economia locale, riducendo l'inquinamento atmosferico, i livelli di rumore e gli effetti dell'isola di calore. Il tutto viene fatto trasformando le strade interne ai *superblocks* per nuovi usi urbani condivisi, come piazze, parchi e aree verdi, creando così quartieri multifunzionali e indipendenti tramite un intervento innovativo di uso del territorio che mira a recuperare spazio per le persone, ridurre il trasporto motorizzato, promuovere la mobilità sostenibile e stili di vita attivi.

I *superblocks* rappresentano dunque un nuovo modello innovativo di pianificazione urbana e dei trasporti che riformula l'attuale paradigma della mobilità e pone al centro le persone e il loro benessere. Oltre alla liberazione e la riqualificazione dello spazio collettivo appena discusse, risulta necessaria anche una riconfigurazione del trasporto pubblico, il quale deve essere reso un'alternativa attraente per l'utente, facendo circolare gli autobus con una maggiore frequenza e aumentando le relative fermate, poste lungo il perimetro dei *superblocks*, al fine di garantire un accesso comodo ed ottimale a tale servizio. Inoltre, si richiede un simultaneo miglioramento della rete per i pendolari suburbani, per offrire loro vere alternative e il miglioramento del sistema di trasporto pubblico dove risulta essere meno sviluppato all'interno della zona metropolitana presa in considerazione.

I *superblocks*, dunque, non solo ridefiniscono la mobilità urbana spostando la ripartizione modale verso il trasporto pubblico, la bicicletta o favorendo la pedonalità, ma hanno anche l'intenzione di migliorare le infrastrutture verdi urbane e la biodiversità, creando corridoi urbani che attraversano la città.

La diversità strutturale e la densità sono due caratteristiche urbane chiave per valutare l'idoneità dei *superblocks*, in quanto nelle città le aree ad alta densità sono le più esposte agli effetti negativi derivante dalla concentrazione urbana, rendendo quindi l'uso alternativo delle strade potenzialmente più urgente. Le informazioni relative alla diversità strutturale possono basarsi sulla presenza di determinati punti di interesse delle aree interessate, come scuole, supermercati, ambulatori, uffici, ecc. e sull'elevata disponibilità

attuale di terreno impermeabilizzato e di poco verde urbano, rendendo così la trasformazione di una strada più vantaggiosa e prioritaria.



Figura 1.6: Esempio di riqualificazione di una strada ad uso pedonale.

La scelta delle zone adatte all'applicazione dei *superblocks* parte da un'analisi dettagliata della città, basata sui flussi e la mobilità dei cittadini, sulle strutture componenti i quartieri, tenendo conto del tessuto edilizio e sociale, e sulla presenza di spazi verdi. Attraverso questo approccio globale si può così creare una gerarchia nella rete stradale, basata sulle caratteristiche urbane e topologiche delle strade costituenti la rete stessa, e, di conseguenza, stabilire per ognuna di esse l'idoneità alla progettazione del *superblock*, basata su tale gerarchia.

L'esempio di organizzazione urbana fornita dai *superblocks* rappresenta una potenziale soluzione per rendere le strade delle città più sicure, verdi, inclusive e vivaci, basandosi su un modello di circolazione costituito principalmente da una fitta rete pedonale, la quale è complementare ma indipendente dalla rete automobilistica. Questa rete contribuisce così a creare una nuova mappa della città in cui i cittadini sono gli attori centrali, dove, oltre ai benefici per la salute e ambientali già presentati, si possono considerare anche altri potenziali vantaggi collaterali dati dalla creazione di questi nuovi spazi comunitari, come la creazione di un attaccamento al luogo e la fornitura di una sicurezza che incide positivamente sulla formazione dell'identità, del senso di comunità e del benessere emotivo e sociale.

## 1.4 L'esempio di Barcellona

Barcellona ha una popolazione costante di circa 1,6 milioni di abitanti da anni, e la mancanza di alloggi, insieme alla crescita economica della regione metropolitana, costringe ogni giorno un gran numero di pendolari a spostarsi nel centro della città per lavorare o studiare, aumentando sempre di più la densità automobilistica nella città.

Dall'estrema esigenza di tamponare il traffico automobilistico nasce così il concetto di *superblock*, *superille* in catalano, o anche *supermanzanas*, emerso già diverse volte nella pianificazione urbana di Barcellona nel secolo scorso, ma che non è stato trasformato in un'iniziativa di progettazione urbana fino a qualche anno fa.

Barcellona ha introdotto il suo primo *superblock* nel 1993 nel quartiere storico di El Born, continuando poi nel 2005 con la pianificazione di altri due *superblocks* a Gràcia, ma è con il Piano di Mobilità Urbana di Barcellona 2013-2018 che questo modello inizia a mettere la sua impronta nel disegno urbano della città con l'inizio dei lavori, dal 2016, per l'implementazione di sei *superblocks* completamente funzionanti.



Figura 1.7: Parte della pianta della città di Barcellona che mostra la sua, che costituisce un incentivo per la realizzazione dei superblocks.

L'obiettivo del modello dei *superblocks* di Barcellona è quello di rompere l'inerzia e cambiare le regole del gioco, sviluppando piani e progetti che aiutino a delineare una città futura più sana, inclusiva, diversa e produttiva.

Dal sito del comune di Barcellona sono ricavabili i fondamenti alla base della realizzazione dei *superblocks*:

- Recupero ed ampliamento degli spazi pubblici: si lavora alla trasformazione urbana per avere una vita migliore, guadagnando un milione di metri quadrati di spazio per le persone, rendendo la città un ambiente più verde e più sano con meno rumore e inquinamento, calmando inoltre il traffico e proteggendo le scuole, con strade e piazze in cui incontrarsi e vivere la vita;
- Trasformare la città per il benessere delle persone: una città dove anziani e bambini sono i protagonisti di strade e piazze, dove trovare ombra, luoghi per sedersi e incontrarsi, passeggiare, andare in bicicletta, giocare e accedere ai negozi locali;
- Più trasporti pubblici per un minor inquinamento: una città con aria pulita, più e meglio collegata, dove la priorità è data al trasporto pubblico sostenibile, con corsie esclusive per gli autobus, raddoppiamento del numero di chilometri della rete ciclabile e la promozione di infrastrutture chiave, come i collegamenti tranviari;
- Una città economicamente più competitiva: sostenendo l'economia locale, che protegge i negozi, si rigenerano i tessuti industriali, integrandoli nella città e trasformandoli in magneti di talento e innovazione, incentivando così un modello economico che crea posti di lavoro di qualità e porta valore aggiunto ai quartieri;
- Hub verdi, piazze e parchi per una città più verde: riuscendo a moltiplicare la quantità di verde sono stati guadagnati più di 40 nuovi ettari di vegetazione, rendendo verde un terzo delle strade della città, con nuove specie di alberi e arbusti, creando inoltre rifugi climatici per aiutare le persone ad affrontare le temperature sempre più estreme.



*Figura 1.8: Esempio di una strada trasformata in un luogo per la comunità.*

Questo modello urbano sta quindi trasformando la città in uno spazio dove tutti possono avere una vita migliore, dando la priorità all'utilizzo della bicicletta e dei trasporti pubblici, generando inoltre ampi marciapiedi, favorendo la crescita di più piante e più spazi per incontrarsi e dedicati alle attività locali. Questa trasformazione mette al centro la vita quotidiana, portando coesione ai quartieri e guidando la transizione ecologica, verso una città dove il talento e i grandi investimenti nella tecnologia sono benvenuti, poiché aiutano a migliorare l'ambiente. I *superblocks* sono unità di 400x400 m, facilmente ricavabili in pianta grazie alla regolarità della rete stradale che caratterizza la città, ma che possono avere diverse forme e dimensioni, a seconda della struttura e dell'importanza della zona presa in considerazione.

I gruppi di strade minori interne ai *superblocks*, chiamate strade verdi, sono chiuse al traffico di attraversamento, mentre ai veicoli è consentito l'accesso principalmente per raggiungere le residenze, reso possibile in una sola direzione. Inoltre, si impone un limite di velocità di 10 km/h, sia per le auto, che per i ciclisti (ma anche per monopattini elettrici e altri tipi di veicoli), i quali sono propensi a muoversi più velocemente all'interno di questo nuovo spazio sicuro offerto dai *superblocks*.



Figura 1.9: Inserimento di un *superblock* nella città e relative limitazioni imposte ai trasporti (Agenzia Ecologica Urbana de Barcelona).

Ma cosa c'è di tecnologico in tutto questo? “Un processo decisionale integrato nei dati” spiega ad Architectural Record Salvador Rueda, direttore dell'Agencia Ecologia Urbana de Barcelona, psicologo e urbanista che ha immaginato queste conformazioni già nel 1987.

L'iniziativa dei *superblocks* va di pari passo con la ridefinizione della mobilità, in quanto il Piano di Mobilità Urbana 2024, il quale alimenta la visione di creare in futuro 503 *superblocks* in tutta la città, si concentra sulla trasformazione dei modelli di mobilità della città, con l'obiettivo di ridurre i viaggi in auto private dal 26,04% al 18,48%, di avere l'81,54% di tutti i viaggi a piedi, in bicicletta e con i mezzi pubblici. Il consiglio ha elencato 300 misure specifiche per i prossimi anni, tra cui aggiungere 32 km di strade pedonali, l'espansione la rete ciclabile del 40%, l'aggiunta di una corsia a 30 km/ora sulle strade con tre o più corsie, ecc.

Con tutte le restrizioni derivanti in seguito alla presenza dei *superblocks*, la capacità stradale per le auto tende a ridursi sempre di più, favorendo così un passaggio dell'utente ad un utilizzo maggiore dei trasporti pubblici. Pertanto, il comune di Barcellona sta anche aggiungendo 67 km di corsie per autobus, che, insieme alla riprogettazione dei tragitti dei mezzi e la riduzione del numero di linee, vanno ad aumentare l'efficienza del trasporto pubblico, per il quale si avrà un tempo di attesa di circa cinque minuti e un tempo di viaggio in una direzione di circa 35 minuti in tutta la città. Allo stesso tempo è anche in cantiere una strategia di miglioramento del sistema metropolitano, e risultano in fase di sviluppo schemi come park-and-ride, book-and-ride bus e applicazioni per taxi pubblici.

Le linee guida per la progettazione delle strade hanno requisiti primari da applicare almeno al 20% della superficie permeabile e, allo stesso tempo, richiedono che l'80% della strada abbia una copertura arborea per favorire l'ombra d'estate. Altre azioni fondamentali includono l'eliminazione delle aree di parcheggio dai marciapiedi, il monitoraggio delle piste ciclabili, ascensori e scale mobili negli spazi pubblici.

La rivitalizzazione delle aree, inoltre, non si limita a uno spazio aggiuntivo destinato alle attività di svago, ma considera anche elementi di design importanti, tra cui la pavimentazione senza bordi per migliorare l'accessibilità per tutti, i blocchi rigidi e le guide tattili per chi ha problemi visivi.



Figura 1.10: Esempio di strada resa pedonabile.

L'idea può sembrare perfetta, ma il percorso non è stato molto facile all'inizio, in quanto, durante la sperimentazione pilota nel quartiere di Poblenou, si è riscontrata una forte resistenza da parte dei quartieri selezionati per i *superblocks*, a causa delle preoccupazioni riguardanti la gentrificazione, l'aumento dei valori immobiliari e lo spostamento dei residenti. Anche i negozianti locali non sono stati immediatamente convinti, in quanto per loro il movimento limitato delle auto avrebbe influito sulle attività commerciali, facendo calare drasticamente le vendite, tesi in seguito contrastata da un'analisi del consiglio comunale, che ha appurato che solo il 5% dei clienti accedeva ai locali commerciali interessati in auto. Alla fine, dopo un periodo di assestamento, le resistenze si sono smorzate e la città ha deciso di investire in strutture permanenti, prototipo di un modello che, come detto prima, sarà un sistema diffuso in tutta la città.

I cambiamenti cosiddetti "tattici" sono veloci, costano poco e hanno grande impatto immediato, come per esempio il cambio del senso di marcia di una strada, mentre quelli cosiddetti "strutturali" sono più duraturi e più costosi, come invece il livellamento di una strada con il marciapiede o la costruzione di un campetto per giocare. Se si passa dunque dal tattico allo strutturale troppo velocemente, il rischio è che i residenti non abbiano il tempo per abituarsi ai nuovi spazi e alla nuova mobilità, ma se lo si fa troppo lentamente, c'è il pericolo di farli sentire all'interno di un "laboratorio" che funziona male e che non ha un punto di arrivo preciso.

Al momento, secondo diversi studi presenti in letteratura, gli effetti dei *superblocks* iniziano a farsi vedere all'interno della città, in quanto con la diminuzione del traffico

automobilistico si sono ridotte le emissioni di inquinanti da esso causato e i cittadini iniziano a giovare della presenza delle nuove aree verdi e pubbliche ricavate.

Secondo uno studio condotto dall'Istituto per la salute globale dell'Università Pompeu Fabra, se si implementasse completamente il radicale sistema a blocchi pedonalizzati, Barcellona potrebbe salvare ogni anno quasi 700 vite umane e ridurre di un quarto l'inquinamento atmosferico della città. Il rapporto afferma inoltre che la creazione di tutti i 503 *superblocks* proposti ridurrebbe i livelli di ossidi di azoto nell'aria del 24%, dall'attuale livello di 47 microgrammi per metro cubo a 36 microgrammi per metro cubo, mettendo tale valore in linea con la raccomandazione dell'OMS di un massimo di 40 microgrammi per metro cubo, facendo modo poi che l'aspettativa di vita del residente medio di Barcellona aumenti di quasi 200 giorni, risparmiando alla città 1,7 miliardi di euro di spese sanitarie all'anno.



*Figura 1.11: Superblocks ipotizzati dalla città di Barcellona.*

I maggiori benefici per la salute verrebbero dalla riduzione dell'inquinamento atmosferico, con una successiva prevenzione di 291 morti premature all'anno, seguita da una riduzione del rumore del traffico e dai danni delle isole di calore, anch'essa con la prevenzione di, relativamente, 163 e 117 morti premature.

Il piano aumenterebbe inoltre anche il numero di spazi verdi in una delle città più densamente popolate del mondo, con solo 6,6 metri quadri di spazio verde per abitante, contro i 27 di Londra e gli 87 di Amsterdam. I ricercatori calcolano che l'aumento della

vegetazione impedirebbe 60 morti premature all'anno e l'aumento dell'attività fisica altre 36, portando così, in tutto, un nuovo schema di mobilità che potrebbe salvare 667 vite umane l'anno.

Riportando ciò che ha scritto in merito ai *superblocks* il sito web giornalistico statunitense Vox: “Con un po’ di coraggio il processo di trasformazione dello spazio urbano può essere accelerato. Può funzionare meglio presentare i cambiamenti come un fatto compiuto e consentire ai residenti di modellarli piuttosto che rifiutarli. Richiede solo la fiducia nel fatto che gli spazi pubblici ben progettati, dove possono essere creati, saranno abbracciati e supportati”.

## **1.5 Altri modelli urbani utilizzati in Europa**

Il concetto dei *superblocks* è solo uno tra i diversi modelli urbani che negli ultimi anni hanno ricevuto molta attenzione nei media e nella letteratura scientifica; ciò che questi modelli hanno in comune tra loro è relativo all’incentivo di aumentare l’utilizzo del trasporto pubblico e attivo, a discapito della riduzione dell’uso dell’auto privata, riducendo così l’inquinamento atmosferico, il rumore e gli effetti dell’isola di calore, aumentando l’attività fisica e di conseguenza promuovendo e migliorando la salute.

Di seguito sono riportati alcuni esempi di questi modelli:

- Quartieri a basso traffico, *Londra*: questi quartieri riducono il traffico utilizzando dissuasori, fioriere e telecamere, mantenendo l'accesso dei veicoli a motore a tutte le case. Tali misure si adattano alle strade urbane minori, dove vive la maggior parte delle persone di questa città, riducendo così il possesso di automobili, la criminalità di strada e gli infortuni, rendendo inoltre le strade residenziali più sicure per il gioco, la socializzazione e l’esercizio fisico;
- La città dei 15 minuti, *Parigi*: questo modello prevede la creazione di una città di quartieri dove lavoro, scuola, negozi, intrattenimento, cultura, tempo libero e altre attività sono raggiungibili in 15 minuti a piedi o in bicicletta da casa. In questo modo la città risulta incentrata più sulle persone piuttosto che sulle automobili, incoraggiando una maggiore attività fisica e riducendo la necessità di viaggi a lunga distanza, e quindi le emissioni, l’inquinamento atmosferico e il rumore. Alcuni degli aspetti chiave come l’ecologia, la solidarietà e la partecipazione dei cittadini, rendono necessaria una riduzione del traffico motorizzato e un aumento delle piste ciclabili,

più negozi locali e spazi verdi e un uso multiplo dello spazio pubblico, riflettendo così la visione potenzialmente trasformativa della pianificazione urbana.

- La città e il quartiere senza auto, *Amburgo* e *Friburgo*: questo tipo di città fa affidamento principalmente sul trasporto pubblico, a piedi o in bicicletta per gli spostamenti all'interno dell'area urbana, riducendo così l'inquinamento atmosferico e i livelli di rumore, aumentando l'attività fisica e creando più spazi verdi. Le città e i quartieri senza auto riducono il traffico motorizzato privato non necessario e forniscono un facile accesso ai trasporti pubblici e attivi, con l'obiettivo di ottenere una città pacifica, senza il dominio dell'auto.

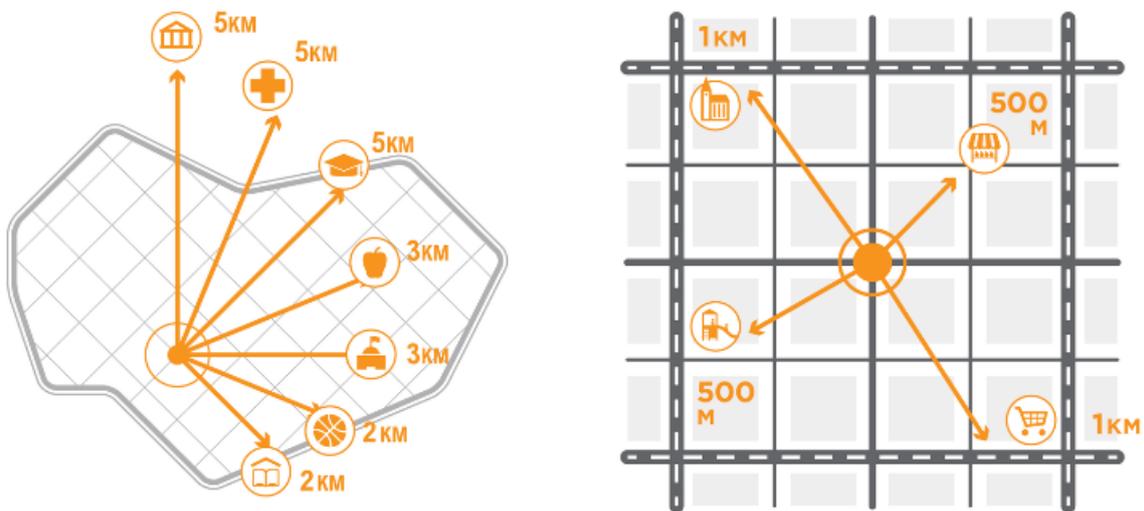


Figura 1.12: Confronto tra una città auto-centrica, più "estesa" (sinistra), e una città pedone-centrica, più compatta (destra).

## 2. LA MICROSIMULAZIONE

### 2.1 Macro e micro-simulazione

L'analisi di un sistema di trasporto tramite simulazione consente di studiare e definire sia l'offerta che la domanda di trasporto, per poi simulare il sistema in oggetto ed infine pianificarlo e ottimizzarlo al meglio tramite eventuali interventi. Tale analisi può avvenire seguendo diverse tipologie di approccio, le cui principali sono il macroscopico e il microscopico.

L'utilizzo di un modello macroscopico tradizionale consente di ottenere in uscita i valori medi dei parametri di interesse, senza necessitare di ingenti quantità di dati specifici in ingresso; esso risulta infatti basato su dati aggregati, come zone di traffico, matrice di domanda OD e flussi negli archi mediati su un'ora, sull'estrazione del grafo contenente le sole arterie principali della rete stradale dell'area di studio ed algoritmi di assegnazione basati su forti ipotesi, avendo così una forte semplificazione dei reali processi trasportistici.

La principale differenza che intercorre tra i modelli macroscopici e gli attuali modelli microscopici in via di sviluppo sta nel risultato finale e nella difficoltà del reperire i dati necessari allo studio, in quanto per poter studiare un sistema di trasporto con un approccio microscopico, risulta necessario conoscere molto più nel dettaglio la domanda di trasporto, in quanto si va ad analizzare il viaggio di ogni singolo utente, anziché considerare solamente il numero complessivo di persone che si muovono da una zona all'altra.

Ulteriori differenze tra i due metodi si trovano anche nell'elevato livello di dettaglio considerato per la rete di trasporto analizzata, il quale, anziché estrarre un semplice grafo che rappresenti le arterie principali, risulta essere molto alto nel caso di uno studio microscopico, e nei modelli di assegnazione utilizzati, in quanto per approcci macroscopici si utilizzano modelli statici, per reti congestionate e non, mentre con un approccio microscopico, invece, è possibile includere nell'analisi la variabile temporale, andando a valutare il livello di traffico nella rete in ogni istante.

Le semplificazioni attuate dai modelli macroscopici sono sempre state necessarie a causa della limitata potenza computazionale dei computer e alla mancanza di dati

sufficientemente accurati, in quanto la stima diretta della domanda risulta essere molto costosa in termini di risorse, ma, grazie ai progressi tecnologici e delle società di comunicazione, risulta ormai possibile rappresentare in modo più dettagliato e raffinato il mondo in cui viviamo, avendo così a disposizione dati disponibili per caratterizzare più dettagliatamente la domanda e l'offerta di trasporto.

Sempre più città rendono disponibili tramite internet una notevole quantità di dati, come ad esempio conteggi di traffico, reti di trasporto pubblico e le tabelle degli orari delle linee aggiornate e, tramite la disponibilità di software e database geografici, così come delle applicazioni sui cellulari che permettono di tracciare i viaggi percorsi con la tecnologia GPS, tutto ciò fornisce importanti informazioni per i modelli di rete e di domanda.

Nel ramo della pianificazione dei trasporti, i modelli che consentono di svolgere una micro-simulazione sono il naturale sviluppo dei modelli convenzionali, consentendo così di modellizzare in modo più efficace i processi trasportistici e di poter predire più precisamente i flussi di traffico nelle strade e le relative emissioni/concentrazioni di inquinante nell'atmosfera.

## **2.2 I modelli della micro-simulazione**

A fronte di un notevole set di dati di input richiesto, il modello di micro-simulazione consente di ottenere un ampio spettro di output da cui avere un'immagine, istante per istante, della situazione della rete dal punto di vista trasportistico; infatti, tale modello risulta in grado di rappresentare in maniera puntuale e specifica il traffico e la sua evoluzione istantanea, prendendo in considerazione le interazioni tra i diversi modi di trasporto, la geometria dell'infrastruttura, il comportamento reale dei conducenti e le caratteristiche specifiche dei veicoli, fornendo una visione dinamica del fenomeno. I principali output forniti sono:

- Informazioni di posizione, velocità e accelerazione di ogni singolo veicolo all'interno della rete;
- Dati relativi agli archi, come i flussi;
- Informazioni su ogni viaggio, come tempo di partenza e archi percorsi;
- Valori di emissione atmosferiche ed acustiche dei veicoli.

L'insieme dell'offerta e della domanda di trasporto costituisce uno scenario, all'interno del quale la micro-simulazione, in sostanza, fa eseguire i viaggi per ogni persona lungo

gli itinerari assegnati, secondo i loro piani, tenendo conto delle numerose interazioni fra veicoli, persone ed infrastrutture.

La domanda di trasporto può essere generata in termini di scelta del tempo di partenza, della destinazione, del mezzo di trasporto e dell'itinerario, tramite diversi metodi:

- Disaggregazione dei modelli di domanda classica, ovvero generata attraverso una disaggregazione della matrice OD;
- Generazione della domanda a partire dalla definizione dei flussi su alcuni archi, ottenuti simulando i dati ricavati dai conteggi, e delle probabilità di svolta;
- Analisi delle attività giornaliere svolte dagli utenti e ricostruzione dei viaggi, ovvero origine e destinazione, motivo, ora di partenza, modo/modi di trasporto, itinerario, per ciascuno di essi, dalle quali si genera in tal modo una domanda basata sulle attività; in particolare questi modelli riescono a modellizzare anche il trasporto concatenato e gli spostamenti multimodali.

Gli step principali per effettuare la micro-simulazione di un sistema di trasporto sono riassumibili come segue:

1. Preparazione della rete: consiste nella sua importazione da una sorgente di dati, come OpenStreetMap, e nel suo successivo editing, atto a correggere eventuali errori;
2. Specificazione della domanda di trasporto: può avvenire tramite l'utilizzo di uno tra i diversi metodi sopra elencati, e a seconda del procedimento applicato, risultano necessarie diverse tipologie di dati al fine di generare la domanda, come ad esempio i viaggi;
3. Micro-simulazione dello scenario: costituita dalla rappresentazione spazio-temporale di tutti gli utenti nello scenario, lungo i percorsi e tramite i piani predefiniti;
4. Analisi dei risultati: possono essere analizzati i consumi di carburante, le emissioni di inquinanti, i tempi di viaggio (distinti in tempi di percorrenza e tempi d'attesa), o i flussi sugli archi; i valori possono essere a loro volta aggregati, ovvero forniti in valori medi, o disaggregati, ovvero riferiti al singolo utente.

I risultati di una micro-simulazione possono inoltre essere utilizzati, nell'ambito di uno stesso progetto, al fine di migliorare i risultati per uno step di simulazione successivo, così da ottenere una simulazione che rispecchi quanto più possibile la realtà.

## **2.3 SUMO**

Per lo svolgimento del progetto è stato utilizzato il software di simulazione SUMO (Simulation of Urban MObility), corredato dall'interfaccia grafica SUMOPy, sviluppata dal prof J. Schweizer, dell'Alma Mater Studiorum - Università di Bologna. SUMO è un software opensource che permette di effettuare micro-simulazioni multimodali, con la possibilità di riprodurre con un elevato grado di dettaglio le interazioni tra gli utenti e gli elementi della rete di trasporto, rappresentando l'evoluzione del flusso di traffico, in termini di movimento di ogni singolo veicolo, ad intervalli di tempo regolari e in maniera continua nello spazio.

Oltre al micro-simulatore vero e proprio, il pacchetto software di SUMO comprende tutte le applicazioni necessarie per espletare le operazioni propedeutiche alla simulazione stessa, come la ricerca del percorso (DUAROUTER e JTRROUTER), la generazione della domanda basata sulle attività (ACTIVITYGEN), la visualizzazione e la modifica della rete (NETEDIT) ed il calcolo delle emissioni (EMISSIONSMAP e EMISSIONSDRIVINGCYCLE).

## **2.4 SUMOPY**

Tali estensioni possono essere utilizzate tramite l'interfaccia grafica di SUMOPy, il quale è un software-tool utile a facilitare l'uso del simulatore tramite la presenza di un ambiente scripting che consente l'import delle reti di trasporto, la creazione di scenari di studio, la generazione della domanda disaggregata (in base a diversi metodi adattabili alla tipologia di dati disponibili), le simulazioni di traffico, la visualizzazione e l'analisi dei dati.

### **2.4.1 Rete**

Come già detto in precedenza, nell'ambito della micro-simulazione è necessario utilizzare un modello di rete con un elevato grado di dettaglio al fine di realizzare simulazioni il più realistiche possibili; ciò viene fatto classificando ogni arco in base alla propria funzione, introducendo diversi parametri come l'accessibilità agli archi stessi, la velocità massima consentita, larghezza delle corsie, ecc., i quali devono essere modificati opportunamente al fine di rappresentare perfettamente le condizioni reali. Risulta inoltre utile l'integrazione della segnaletica stradale, dei semafori e di altre installazioni fisse utili al controllo del traffico sulla rete.

La rete di trasporto definita all'interno del software di micro-simulazione, è costituita da un grafo in due dimensioni composto da archi orientati, formati da una o più corsie, e da nodi, che rappresentano le intersezioni o i punti terminali degli archi; il tutto è modificabile tramite lo strumento NETEDIT.

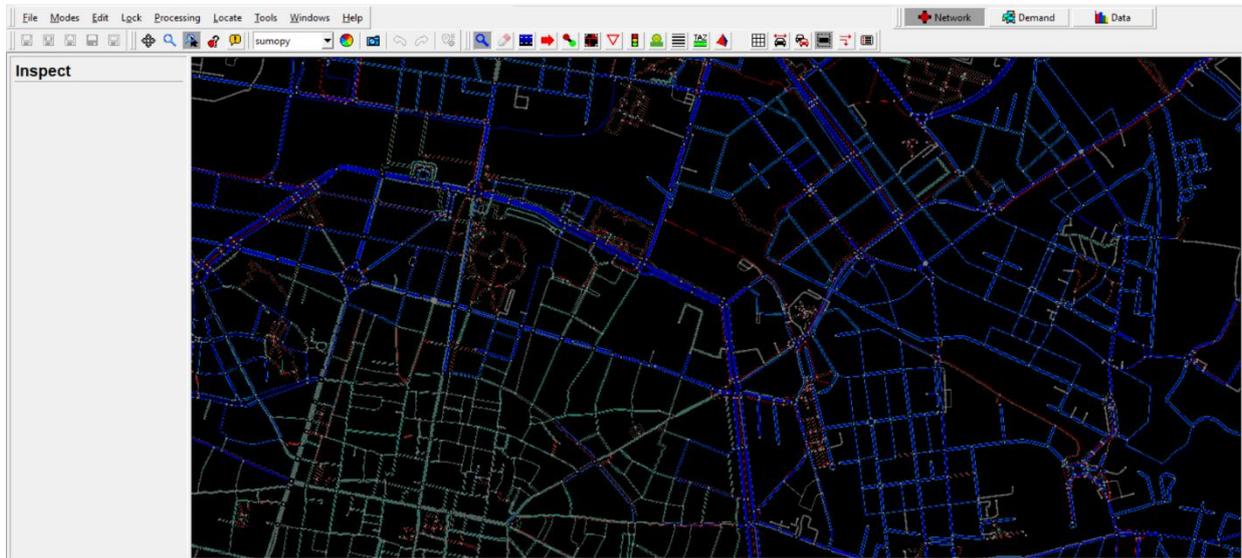


Figura 2.1: Interfaccia dello strumento NETEDIT.

Gli elementi fondamentali che compongono il sistema dell'offerta sono:

- **Nodo:** gli attributi più significativi di un nodo sono le coordinate del centro del nodo stesso, che possono essere geo-referenziate o proiettate su un sistema di coordinate locali, e la tipologia di nodo (incrocio con diritto di precedenza, incrocio semaforizzato, incrocio con obbligo di stop, ecc.). Il nodo, inoltre, è a sua volta composto da connettori;
- **Connettore:** è un collegamento tra due corsie, una di ingresso ed una di uscita, i cui attributi più significativi sono larghezza, velocità massima consentita e i limiti di accesso per alcune tipologie veicolari;
- **Arco:** gli attributi di un arco, oltre ai nodi di origine e destinazione, sono la lunghezza dell'arco stesso e la sua priorità, la quale è indicata con una scala da 1 a 10, dove un valore più alto indica maggiore priorità (es. autostrada);
- **Corsia:** ogni arco è composto da una o più corsie, pertanto, le caratteristiche di un arco vengono determinate fondamentalmente dalle caratteristiche delle corsie che lo compongono, che anche per loro sono la larghezza, la velocità massima consentita e i limiti di accesso per alcune tipologie veicolari.

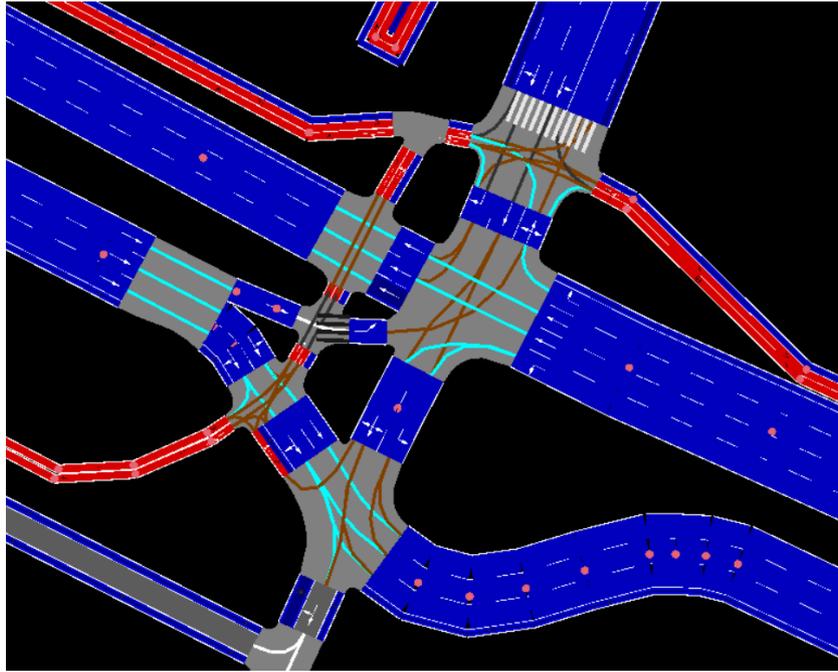


Figura 2.2: Particolare della rete in NETEDIT dove sono visibili tutti gli elementi sopra descritti.

Nel caso in cui un nodo rappresenti un incrocio semaforizzato, esso contiene anche le informazioni relative alle fasi del ciclo semaforico, il cui programma è definito attraverso una sequenza di fasi, nelle quali si definisce il colore del segnale associato ad ogni singolo connettore presente nel nodo stesso. Ogni colore ha un determinato significato:

- Verde: attraversamento consentito;
- Rosso: attraversamento impedito;
- Giallo: fase di transizione dal verde al rosso, che consente ai veicoli che sopraggiungono di arrestarsi o di sgomberare rapidamente l'intersezione;
- Off: il connettore non ha nessun semaforo associato e vige il diritto di precedenza.

### 2.4.2 Domanda

La domanda di trasporto descrive i movimenti previsti dai veicoli e dalle persone in un arco temporale predefinito, e la sua modellazione all'interno di una rete di micro-simulazione, al fine generare tali flussi di traffico sull'intera rete, è resa possibile dalla definizione di:

- Un viaggio, *trip*, come il movimento di un veicolo da una posizione ad un'altra della rete, per cui sono specificati l'arco origine, l'arco destinazione, l'istante di partenza e il modo di trasporto;

- Un itinerario, *route*, il quale contiene anche tutte le informazioni relative all'intero percorso lungo cui si muove l'utente, comprendente tutta la successione di archi occupati;
- Un piano, *plan*, che contiene i vari luoghi in cui una persona svolge le proprie attività e specifica quali viaggi svolge per spostarsi da un'attività a quella successiva.

Risulta fondamentale dunque lo strumento ACTIVITYGEN, prima indicato, il quale è in grado di creare piani di trasporto basati sulle attività, in un formato compatibile con il microsimulatore di SUMO, a partire da un file di rete e uno di dati socioeconomici e demografici che descrivono l'area di studio considerata, come quelli forniti dall'ISTAT.

La caratteristica distintiva di tale modello è l'utilizzo delle strategie di mobilità al posto dei classici modi di trasporto, che possono essere descritte come metodi di muoversi all'interno dell'ambiente urbano, utilizzando differenti veicoli, servizi e comportamenti, basandosi sulle caratteristiche socioeconomiche del generico individuo, sull'eventuale possesso di veicoli e sul posizionamento delle attività che esso deve svolgere, riproducendo al meglio il suo pensiero strategico di spostamento.

### **2.4.3 Veicoli e conducenti**

Uno degli aspetti principali in una micro-simulazione riguarda la modellazione del comportamento dei singoli utenti, con o senza veicoli, nella rete. Come già detto precedentemente la micro-simulazione consente di intervenire sul livello di conoscenza della rete e sul grado di reattività dei singoli utenti, andando così ad influenzare il comportamento degli individui della popolazione simulata, soprattutto in termini di *gap acceptance*, cioè la distanza o il tempo minimo che un utente considera sufficiente per inserirsi in una corrente di traffico, e la distanza dal veicolo precedente, che rappresenta un parametro fondamentale per la simulazione del comportamento cinematico dei veicoli, e la scelta, nonché l'utilizzo, delle corsie.

Infine, la micro-simulazione è in grado di rappresentare la dinamica del moto di diversi tipi di veicoli, dalle automobili ai veicoli commerciali, agli autocarri medi, pesanti e articolati, fino ad autobus, autosnodati, tram e veicoli d'emergenza.

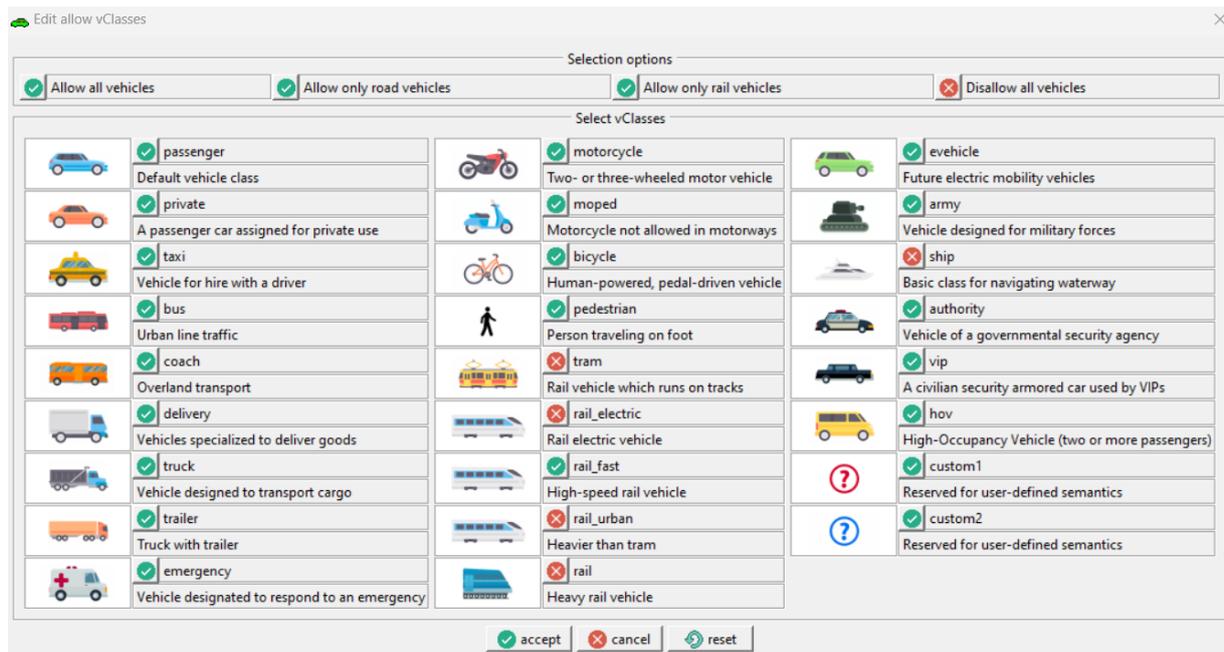


Figura 2.3: Lista dei veicoli utilizzabili nelle simulazioni in SUMOPy.

Nella micro-simulazione, l'autista e il veicolo costituiscono un unico modello chiamato "Drive/Vehicle Unit" (DVU), che, come un veicolo fisico, è caratterizzato da vari parametri:

- Massima accelerazione/decelerazione;
- Velocità massima;
- Lunghezza, larghezza e altezza del mezzo;
- Tipo di algoritmo per controllo del conducente-veicolo;
- Vari parametri dell'algoritmo di controllo (es. tempo di reazione del conducente, impazienza, ecc.)

L'idea del modello DVU è che il conducente abbia il pieno controllo del veicolo, in quanto può accelerare, frenare ed effettuare manovre; il conducente inoltre vede tutti i potenziali ostacoli, o avversari, indicati in inglese con la parola *foes*, e stima la distanza fra di loro e il proprio veicolo, decidendo all'occorrenza di frenare o accelerare.

Nella micro-simulazione si fa dunque avanzare ciascun veicolo o pedone istante per istante, con intervalli temporali costanti, e vengono valutati, sempre istante per istante, i seguenti parametri, indicati in *Figura 2.4*:

- $s(k)$ : posizione  $s$  all'istante  $k$ ;
- $a(k)$ : accelerazione  $a$  all'istante  $k$ ;

- $v(k)$ : velocità  $v$  all'istante  $k$ .

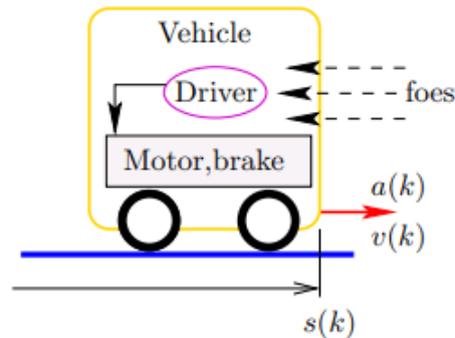


Figura 2.4: Il Drive/Vehicle Unit con conducente e veicolo.

Nell'intervallo  $k$  il tempo di simulazione è dunque  $t_k = kt_S$ , dove  $t_S$  è un tempo di campionamento costante, e, di conseguenza, la velocità  $v(k)$  e la posizione  $s(k)$  del veicolo variano con il tempo  $t_k = kt_S$ , come riportato in Figura 2.5.

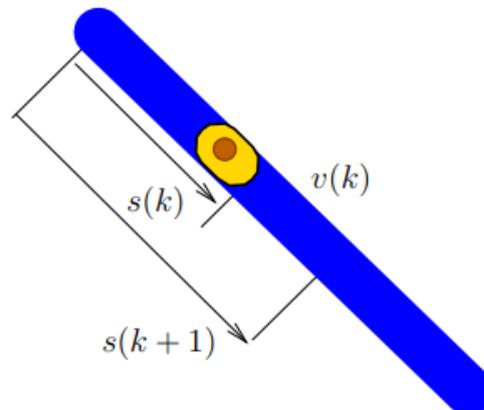


Figura 2.5: Illustrazione di uno step della simulazione di un veicolo.

Come nel caso di un conducente reale, tutti i potenziali ostacoli vengono osservati contemporaneamente e, l'ostacolo più vicino o che si imbatte prima sul conducente, condiziona l'azione dello stesso. Nel dettaglio, l'avanzamento di un veicolo è molto complesso, perché l'azione del conducente deve prevedere ogni possibilità di impatto, facendolo reagire in modo adeguato.

Gli ostacoli, *foes*, possono essere di diverso tipo, come per esempio il veicolo di fronte, un veicolo proveniente da un altro ramo della rete e che ha la precedenza, un pedone che sta per attraversare la strada oppure un semaforo giallo/rosso.

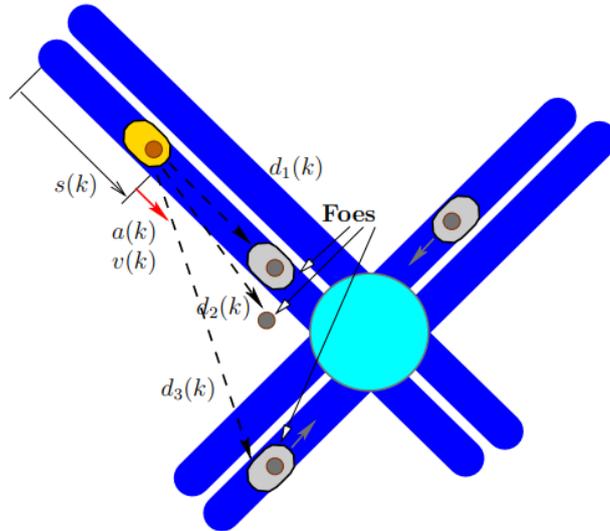


Figura 2.6: Illustrazione di un veicolo e dei suoi potenziali ostacoli (foes) che il conducente deve prendere in considerazione per determinare l'accelerazione  $a(k)$ .

I modelli sviluppati in merito sono vari, ma in sostanza si distinguono nella funzione che determina l'accelerazione  $a_i(d_{i,j}(k), \dots)$  del veicolo  $i$ , in funzione alla presenza degli ostacoli e alla loro distanza  $d_{i,j}(k)$ , alla massima velocità ammessa sulla strada e ad altri fattori vari. Una volta determinata l'accelerazione dal modello di controllo del veicolo  $a_i(d_{i,j}(k), \dots)$ , la velocità  $v_i(k)$  e la posizione del veicolo  $s_i(k)$  possono essere aggiornate per lo step  $k \rightarrow k + 1$ :

$$s_i(k + 1) = s_i(k) + v_i(k)T_S$$

$$v_i(k + 1) = v_i(k) + a_i(d_{i,j}(k), \dots)T_S$$

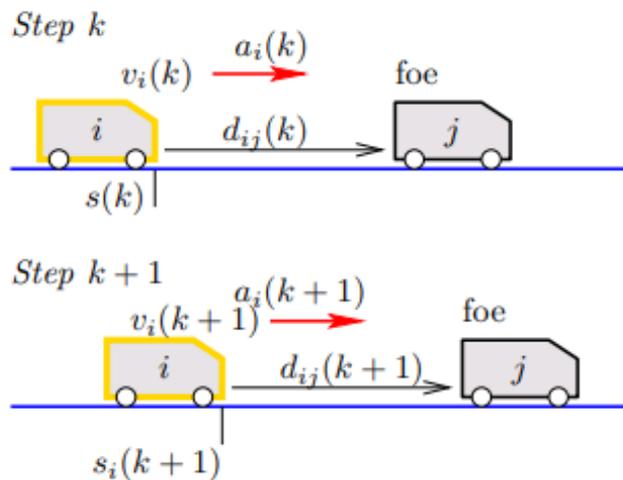


Figura 2.7: Aggiornamento dello stato di un veicolo.

Il microsimulatore ripete questa integrazione, per ogni veicolo  $i$ -esimo della rete, per ogni istante discreto  $t = kT_s$ , con  $k = 1, 2, 3, \dots$

In realtà il microsimulatore esegue, durante ogni iterazione, anche una serie di processi ausiliari, i cui più importanti sono:

- *Update traffic lights*: iterazione dei cicli semaforici;
- *Update train signalling*: aggiornamento dei segnali ferroviari;
- *Update battery charges*: aggiornamento del carico delle batterie dentro veicoli elettrici;
- *Update network load*: aggiornamento del calcolo dei valori medi per arco (flussi, densità, velocità) e valori sui viaggi (durata del viaggio, etc.);
- *Update emission models*: aggiornamento dei valori di emissioni e consumo di carburante per arco e per viaggio;
- *Update noise models*: aggiornamento dei valori di rumore per arco;
- *Custom update*: permette di interagire ed intervenire nella simulazione in corso, ad esempio di cambiare cicli semaforici o itinerari dei veicoli in tempo reale.

Le manovre trattate finora descrivono un movimento lineare lungo la strada, o arco, ma il simulatore prevede altre manovre, come l'inserimento e l'uscita in carreggiata (es. ingressi autostradali), o il cambio della corsia.

### 3. RACCOLTA DATI SULL'AREA URBANA DI BOLOGNA

#### 3.1 Presentazione della città

Capoluogo dell'omonima città metropolitana, che conta oltre un milione di abitanti, e della regione Emilia-Romagna, Bologna, situata tra le montagne dell'Appennino tosco-emiliano ed il cuore della Pianura Padana, è il settimo comune più popoloso d'Italia con circa 393.000 abitanti. Ogni giorno, escludendo i turisti, oltre 500.000 persone gravitano nella città, essendo la sede della più antica università del mondo occidentale, ed uno dei più importanti nodi di comunicazione stradale e ferroviaria del nord Italia, in un'area in cui risiedono importanti industrie meccaniche, elettroniche e alimentari. Bologna è inoltre sede di prestigiose istituzioni culturali, economiche e politiche, e di uno dei più avanzati quartieri fieristici d'Europa, avendo così una rilevante influenza economica e culturale sulle città e regioni limitrofe.

La città, nota per le sue torri, i suoi lunghi portici e il ben conservato centro storico, fra i più estesi d'Italia, si estende per una superficie di 140,86 km<sup>2</sup>, avendo così una densità demografica di poco superiore a 2750 ab/km<sup>2</sup>.

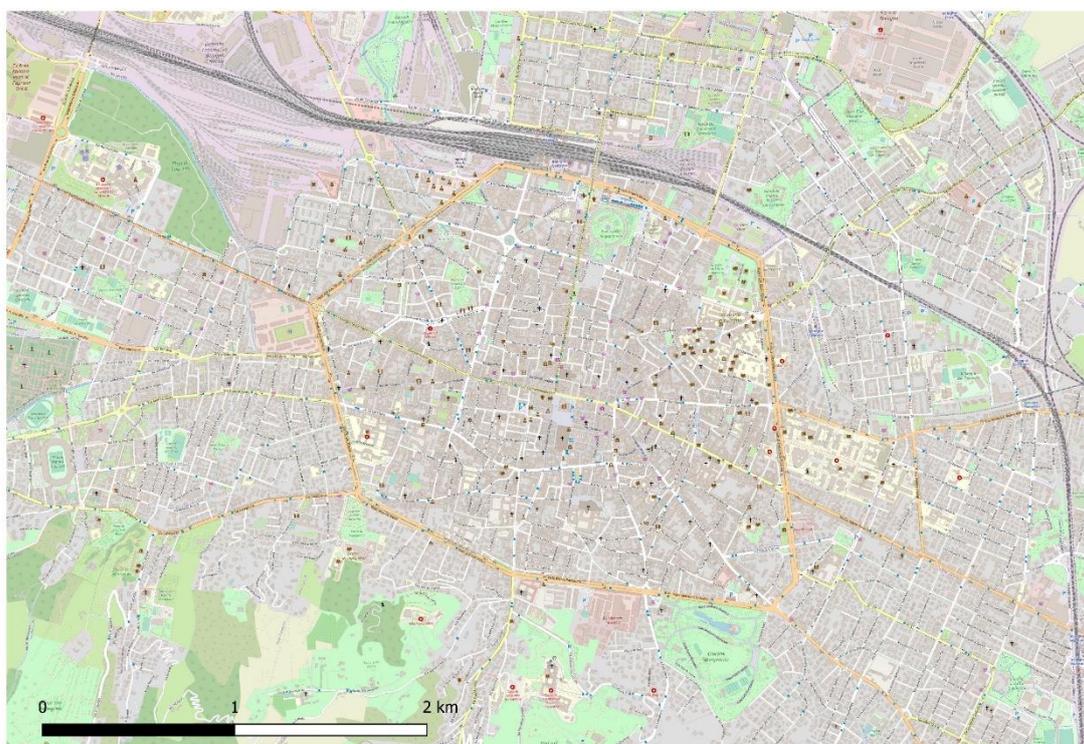
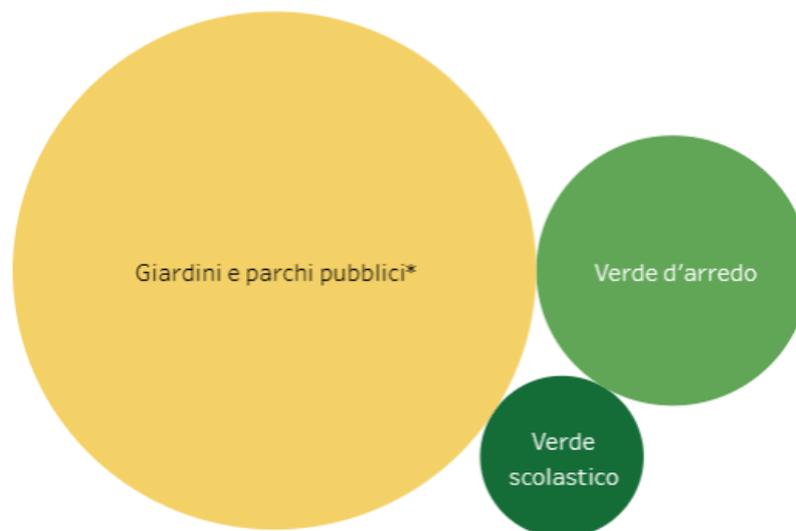


Figura 3.1: Pianta della città di Bologna.

La pianta della parte centrale e storica della città è il risultato della sovrapposizione di due modelli planimetrici, come si può bene notare dalla *Figura 3.1*, quello romano ortogonale e quello medievale a raggiera, sviluppatosi fino alle varie porte che si aprono lungo i resti delle mura; la città moderna si è invece estesa ancora di più, lungo la Via Emilia, e ha da tempo superato i limiti comunali includendo Borgo Panigale, Casalecchio di Reno, Corticella e San Lazzaro di Savena. Nel centro storico, la funzione abitativa è stata sostituita quasi interamente da quella terziaria e direzionale, facendo spostare verso l'esterno le aree residenziali e i quartieri specializzati prima nominati.

La superficie di verde urbano a gestione comunale all'interno del comune di Bologna, come riportato dal portale statistico metropolitano, risulta essere aumentata negli ultimi anni, arrivando ad ammontare nel 2021 ad un totale di 10.057.791 di mq, così divisi:

- Giardini e parchi pubblici: tutte le aree verdi di uso pubblico al netto del verde scolastico e del verde di arredo, pari a 7.343.610 mq, di cui 4.093.670 con presenza di giochi;
- Verde d'arredo: comprende il verde non attrezzato, le aiuole stradali, le banchine e il verde nei parcheggi, pari a 1.997.547 mq;
- Verde scolastico: comprende i giardini di pertinenza delle scuole, pari a 716.634 mq.



*Figura 3.2: Distribuzione delle aree verdi nella città.  
(\*con presenza di giochi)*

### 3.2 La rete stradale

La rete stradale della città di Bologna, con i comuni circostanti, costituisce un'area centrale di circa 50 km<sup>2</sup>, nella quale sono comprese piste ciclabili e sentieri pedonali. Importando la rete in SUMO sono stati valutati:

- Numero totale di archi stradali: 32.409;
- Lunghezza totale degli archi stradali: 3.316,20 km;
- Quota di strade principali, aventi livello di priorità superiore a 7: 20,11% della lunghezza totale, ovvero 667,05 km;
- Numero di incroci: 14.724, di cui 530 controllati da semafori;
- Numero di connettori: 59.218.



*Figura 3.3: Rete stradale della città di Bologna in SUMOPy.*

All'inquinamento proprio del traffico di una città metropolitana di un milione di abitanti si aggiunge inoltre quello prodotto dal traffico di transito, la cui densità risulta essere una delle più elevate d'Italia. Come si può ben osservare dalla *Figura 3.3*, il raccordo autostradale circonda la città a ovest, nord ed est, ed è affiancato per circa 22 km

dalla tangenziale di Bologna. Nel nodo autostradale di Bologna confluiscono inoltre la A1 (Autostrada del Sole Milano-Firenze-Roma-Napoli), la A14 (Autostrada Adriatica Bologna-Ancona-Taranto) e la A13 (Bologna-Padova).

I trasporti pubblici urbani sono gestiti da Trasporto Passeggeri Emilia-Romagna (TPER), che offre un servizio di autobus e filobus, con linee urbane, suburbane ed extraurbane, con alcune linee appaltate ad altre compagnie. Ad aprile 2023 sono stati avviati i lavori per la costruzione della rete tranviaria di Bologna, con entrata in funzione prevista nel 2026.

### 3.3 Il parco veicolare

Bologna rientra nella cerchia delle città con il rapporto tra numero di autovetture iscritte al Pubblico Registro Automobilistico (PRA) e abitanti tra i più bassi riferito alle grandi città italiane, con 52,63 auto ogni 100 abitanti.

Tramite la consultazione del portale statistico metropolitano è possibile avere un'ampia immagine della composizione del parco auto bolognese.

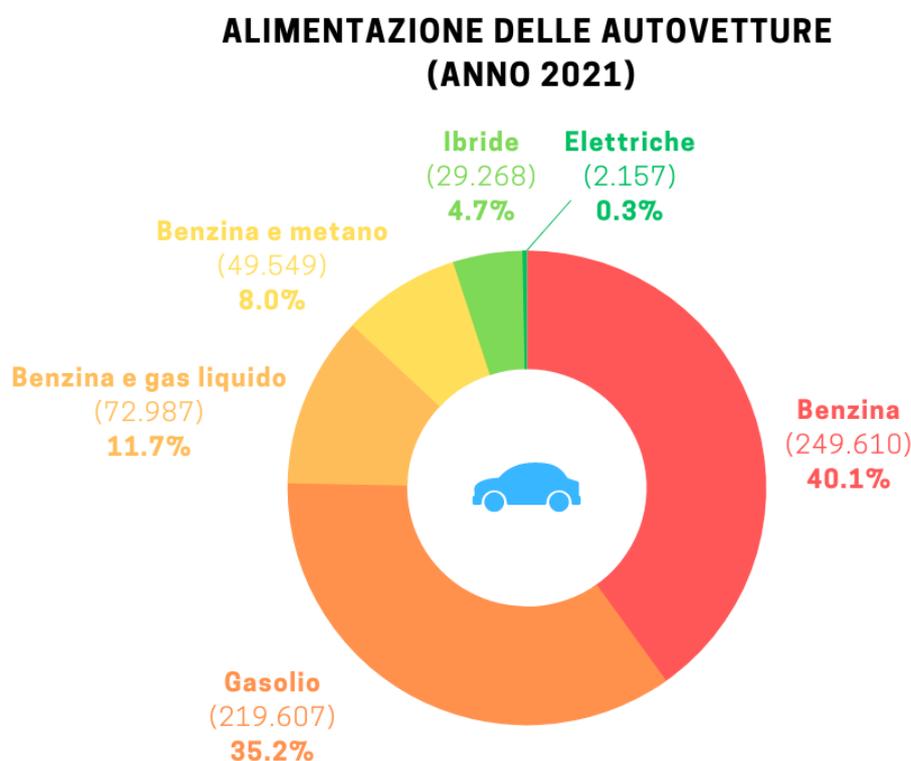


Figura 3.4: Alimentazione delle autovetture del parco veicolare di Bologna (2021).

La maggioranza delle auto bolognesi risulta dunque alimentata a benzina e gasolio, con le prime in linea con la media nazionale, mentre le seconde risultano essere, in proporzione, in quantità molto minore della media italiana del 42,9%. Al contrario risulta superiore invece la quota di auto a metano o Gpl, che a livello nazionale si ferma al 9,5%. Negli ultimi anni è inoltre cresciuto sia il numero di motocicli iscritti circolanti in città, aumentato del 53% nell'arco di 20 anni, che il numero delle vetture ibride ed elettriche, aumentate del 48%.

Il contributo di inquinanti prodotto da veicoli stradali è negli anni fortemente cambiato, tramite l'evoluzione tecnologica dei motori dei veicoli, omologati in modo tale da rispettare le normative ambientali della UE Euro, le quali indicano le norme emanate dall'Unione Europea per regolare le emissioni di gas di scarico dei veicoli.

### CLASSE EURO DELLE AUTOVETTURE (ANNO 2021)

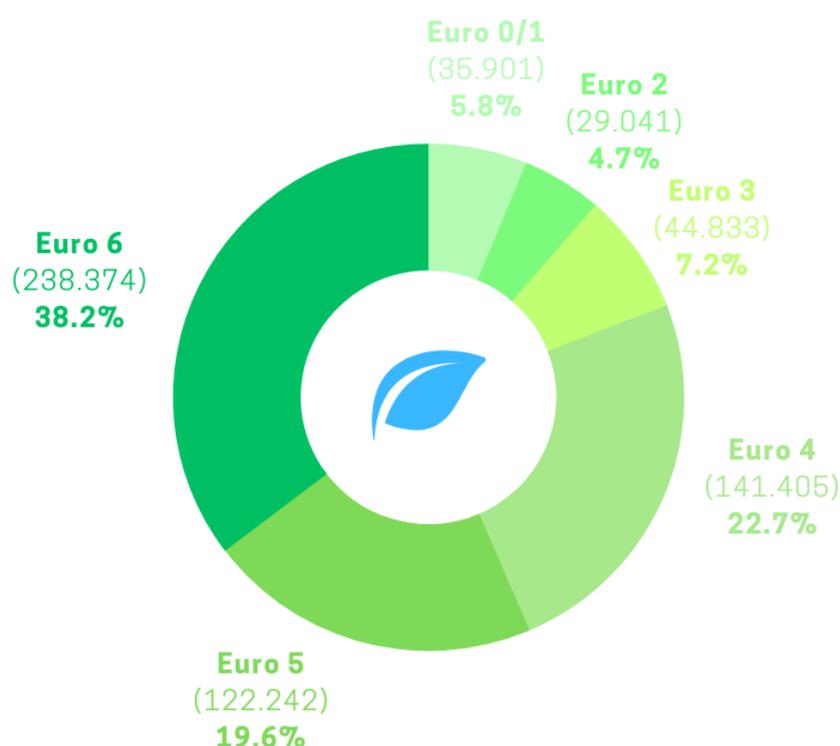


Figura 3.5: Classe EURO delle autovetture del parco veicolare di Bologna (2021).

Nella città di Bologna le autovetture circolanti in classe inferiore all'Euro 4 sono il 17,7% del totale, contro il 28,5% a livello nazionale, ed il 57,8% delle auto è invece Euro 5 o

Euro 6, contro il 46,8% mediamente diffuso in Italia, il che significa che un'autovettura ogni due è "recente".

Di seguito è riportata la lista delle norme, dove i numeri progressivi si riferiscono a veicoli sempre meno inquinanti:

- Euro 1: veicoli di nuova immatr. dal 1/1/1993;
- Euro 2: veicoli di nuova immatr. dal 1/1/1997;
- Euro 3: veicoli di nuova immatr. dal 1/1/2001;
- Euro 4: veicoli di nuova immatr. dal 1/1/2006 ;
- Euro 5: veicoli di nuova immatr. dal 1/1/2011;
- Euro 6: veicoli di nuova immatr. dal 1/9/2015;
- Euro 0: indicano tutti quei veicoli precedenti all'entrata in vigore della norma Euro 1, ovvero i veicoli non catalizzati immatricolati prima del 1993.

A Bologna sono inoltre attivi servizi di car sharing (Io Guido e Enjoy, con auto a benzina, e Corrente, con auto elettriche), due servizi di bike sharing, gestiti rispettivamente da Mobike e TPER, e, dalla primavera 2010, è in funzione nel centro città un servizio gratuito di taxi su bici, chiamato Bi-Bo.

### **3.4 Accenni sulla qualità dell'aria ed emissioni**

La densità di traffico è una delle più elevate d'Italia e l'ambiente e la qualità dell'aria ne risentono fortemente; quest'ultima è valutata tramite una rete fissa di monitoraggio della qualità dell'aria, costituita da centraline situate sul territorio comunale di Bologna.

A partire dal 2006 è stato avviato il progetto di modifica della rete di monitoraggio regionale della qualità dell'aria per l'adeguamento alle Direttive Europee, finalizzate ad omogeneizzare e rendere confrontabili i dati rilevati negli stati membri; questa trasformazione comporta sia la riduzione del numero complessivo dei siti di misura sul territorio regionale, sia il riposizionamento di alcune stazioni a fronte di un incremento e un aggiornamento della dotazione strumentale.

Dall'atlante metropolitano statistico risulta possibile accedere a diversi dati riguardanti la qualità dell'aria rilevata, attualmente in riferimento al 2021, con i quali risulta possibile fare delle analisi preliminari.

Per quanto riguarda la distribuzione delle emissioni secondo i macrosettori di attività, Bologna si discosta dal dato italiano, in particolare per una percentuale più elevata del settore trasporto su strada, con 18 punti percentuali in più, e della combustione non industriale (+13) , mentre nel settore produzione energia e trasformazione combustibili risulta avere quasi 22 punti percentuali in meno.

Dalle centraline si analizzano in particolare le concentrazioni dei seguenti inquinanti, riportati in termini di valori medi annui e confrontati con i valori di legge relativi, sempre su media annuale, emanati nel 2018:

- Benzene: valore medio annuo di 0,900 µg/mc (limite 5 µg/mc);
- Biossido di azoto (NO<sub>2</sub>): valore medio annuo di 43,0 µg/mc (limite 40 µg/mc);
- PM<sub>2,5</sub>: valore medio annuo di 16,0 µg/mc (limite 25 µg/mc);
- PM<sub>10</sub>: valore medio annuo di 26,0 µg/mc (limite 40 µg/mc).

I valori di questi inquinanti risultano essere calati considerevolmente negli ultimi anni, rimanendo nella maggior parte al di sotto dei limiti nazionali; un'ulteriore analisi mostra come essi derivino principalmente dal flusso veicolare transitante sulle autostrade e, secondariamente, da quello transitante su strade extraurbane ed urbane.

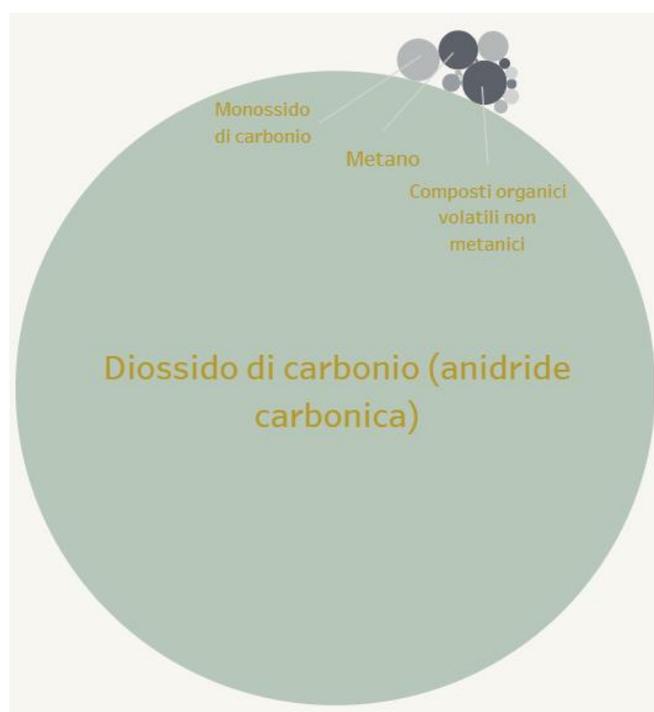


Figura 3.6: Distribuzione delle emissioni atmosferiche dei principali inquinanti.

Nella *Figura 3.6* è rappresentata la distribuzione delle emissioni atmosferiche dei principali inquinanti, derivanti da traffico veicolare e altre azioni antropiche, con l'anidride carbonica che ne rappresenta il 98% del totale. Sono infatti 5.395.971 le tonnellate di CO<sub>2</sub> prodotte (al 2019), dove i due settori che influiscono di più alla sua emissione sono:

- Il traffico veicolare (44,8%), diviso tra automobili (57,89%), veicoli pesanti >3,5 ton e autobus (28,7%), veicoli leggeri <3,5 ton (11,63%), e ciclomotori e motocicli (2,20%);
- Il riscaldamento non industriale (32,67%), diviso tra impianti commerciali ed istituzionali (35,87%) e impianti residenziali (64,13%).

La capacità di compensazione dell'anidride carbonica dovuta all'ambiente naturale risulta sempre più importante da valorizzare, in quanto gli elementi che garantiscono un assorbimento degli inquinanti prodotti, principalmente del CO<sub>2</sub>, sono di base le aree verdi, di cui sono stati diverse volte elencati i pregi della loro presenza nel contesto urbano. Sempre in riferimento all'atlante metropolitano statistico, per la città di Bologna l'assorbimento di CO<sub>2</sub> avviene principalmente tramite la biomassa vivente, che assorbe 320.897 ton/anno, e i terreni convertiti in praterie o foreste, i quali invece assorbono poco più di 145.000 ton/anno.

### **3.5 La rete ciclabile**

Bologna dispone di una fitta rete di piste ciclabili, le quali, a giugno 2022, contano una lunghezza superiore ai 220 km, di cui almeno 150 km in sede protetta, e i restanti spartiti tra percorsi ciclabili in carreggiata e percorsi verdi, in aree verdi o fluviali, con una previsione di realizzazione, entro il 2024, di 50 ulteriori chilometri.

La rete ciclabile della città metropolitana di Bologna, individuabile nei percorsi della Bicipolitana, propone 12 percorsi ben identificati e segnalati, di cui 10 sono percorsi radiali, che partono dal centro della città, e gli altri 2 sono invece percorsi tangenziali che la circondano.

Come si può notare dalla seguente *Figura 3.7*, Bologna si è occupata sempre di più di soddisfare la domanda in aumento di ciclisti negli ultimi anni, al fine di garantire loro percorsi appositi e sicuri.

### Lunghezza delle piste ciclabili esistenti nel territorio comunale

- Corsie bus aperte al transito ciclabile
- Lunghezza delle piste ciclabili
- Percorsi naturalistici
- Percorsi promiscui veicolari e ciclabili

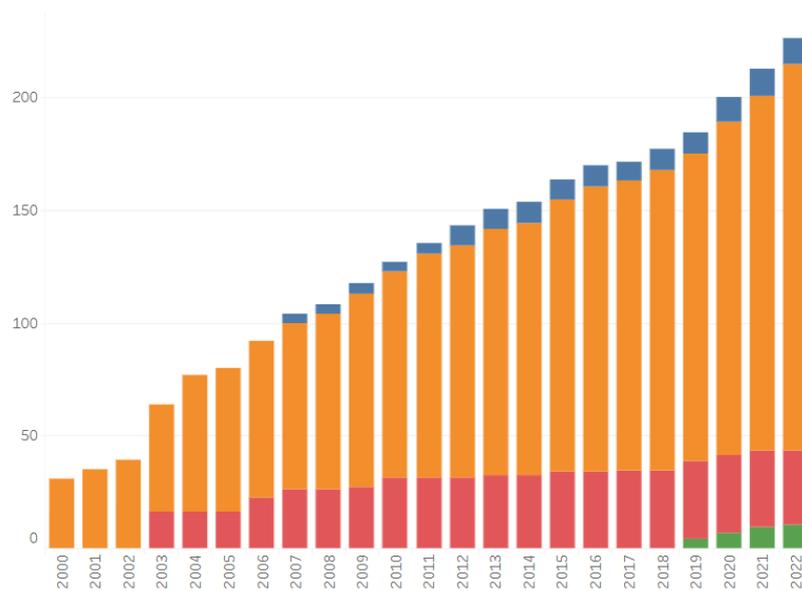


Figura 3.7: Evoluzione negli anni della lunghezza delle piste ciclabili nel territorio comunale di Bologna.

Questo progetto è stato reso possibile grazie alle varie proposte in merito fornite dal PUMS (Piano Urbano della Mobilità Sostenibile), in quanto nel corso degli ultimi anni la ciclabilità è diventata un elemento centrale nelle politiche della mobilità e lo stesso si pone come obiettivo, per il 2030, che il 18% degli spostamenti interni al comune di Bologna avvengano in bicicletta.

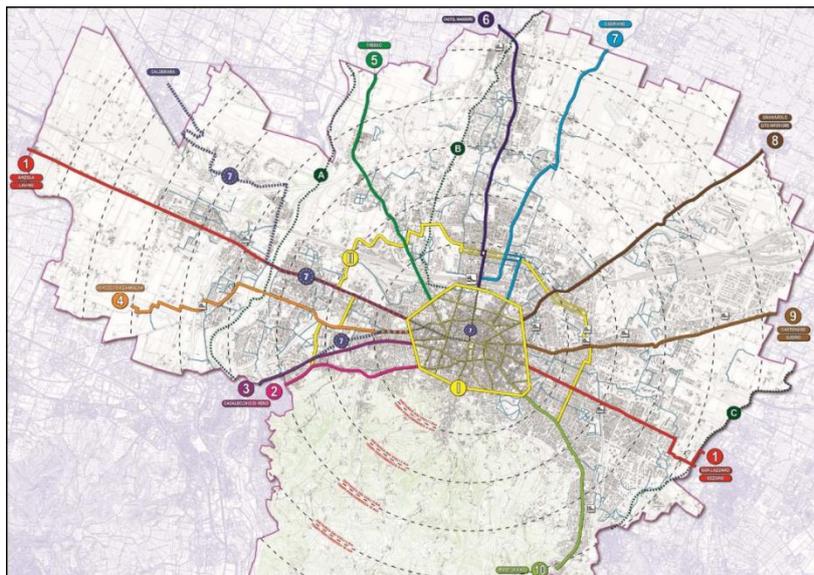


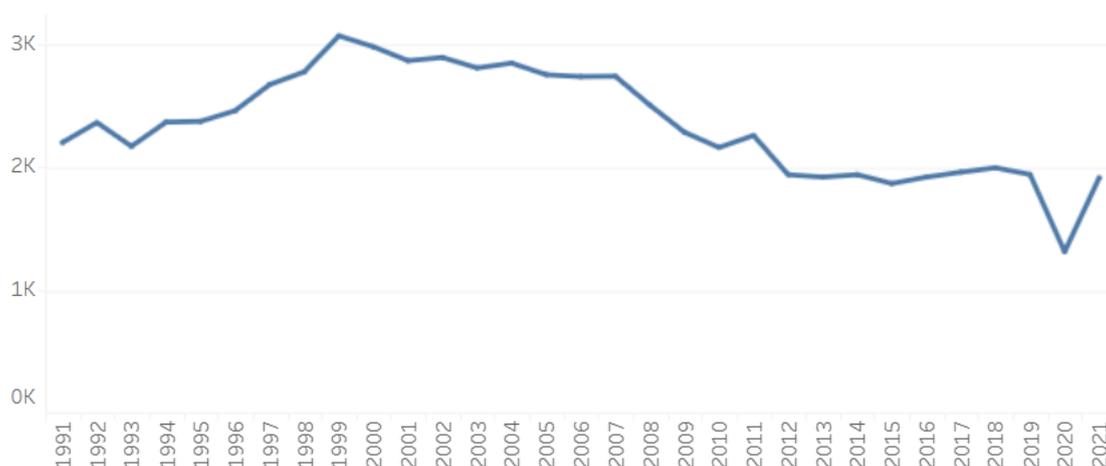
Figura 3.8: Mappa della bicipolitana dell'Area Metropolitana di Bologna.

### 3.6 Statistiche sull'incidentalità

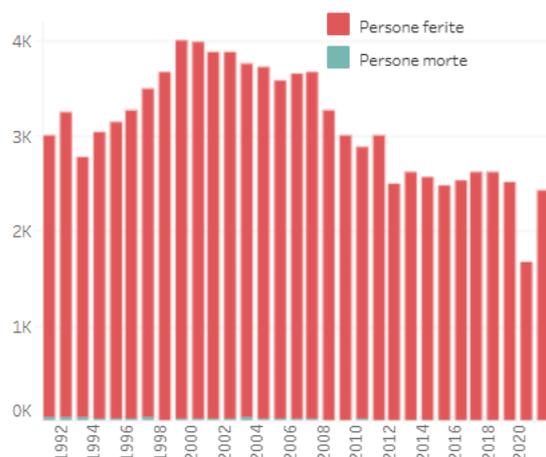
L'analisi dell'incidentalità stradale, è basata sulla compilazione del "Rapporto statistico di incidente stradale", modello Istat CTT.INC redatto dalle Forze dell'ordine ogni volta che intervengono in sinistri con danni a persone. Per definizione, l'incidente stradale è il fatto "verificatosi in una zona aperta alla circolazione, nel quale risultino coinvolti veicoli e dal quale siano derivate lesioni a persone".

Stando all'atlante statistico metropolitano gli incidenti con infortunati si sono ridotti di circa il 30% negli ultimi anni, mentre quelli con morti stanno toccando i livelli più bassi mai registrati, diminuiti di più dell'80%.

Incidenti stradali a Bologna



Persone infortunate



Pedoni coinvolti

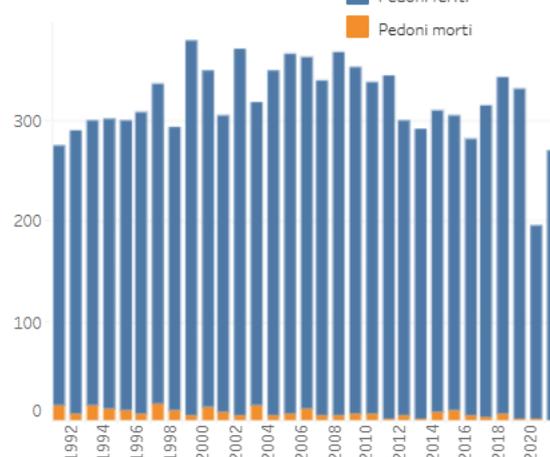


Figura 3.9: Evoluzione negli anni dell'incidentalità nel territorio comunale di Bologna.

I pedoni feriti in incidenti sono diminuiti del 15%, m, al contrario, gli incidenti con biciclette sono cresciuti circa dello stesso valore. Nel complesso l'incidentalità che riguarda i ciclisti è dell'ordine del 10% del totale, una percentuale decisamente più elevata rispetto al peso sempre più maggiore assunto dalla bicicletta nel complesso del traffico cittadino. L'incidentalità che coinvolge i ciclisti dipende da diversi fattori, i quali, elencati in ordine di importanza, sono il numero di ciclisti in transito, il loro volume, le caratteristiche del traffico motorizzato conflittuale e le caratteristiche della strada o del nodo di traffico interessato.

## 4. APPLICAZIONE DEL MODELLO DEI *SUPERBLOCKS* ALLA CITTÀ DI BOLOGNA

### 4.1 Introduzione al progetto

Il lavoro svolto prevede l'applicazione del concetto dei *superblocks* alla città di Bologna, al fine di valutare gli impatti da questi prodotti sul traffico automobilistico, e la relativa variazione nella produzione di inquinamento atmosferico e acustico, tipici dei mezzi a motore; apportando le modifiche necessarie al contesto urbano dovute alla presenza dei *superblocks*, affrontate nel primo capitolo, e migliorando l'alternativa di viaggio offerta dai mezzi pubblici, con questa simulazione è stato inoltre possibile determinare la variazione nella scelta del mezzo di trasporto utilizzato dagli utenti per svolgere le loro attività.

La micro-simulazione, svolta tramite il software SUMO, ha previsto l'utilizzo dell'ultimo scenario della città, presentato in parte nel paragrafo 3.4, proposto e aggiornato dal prof J. Schweizer ed altri collaboratori dell'Università di Bologna nel 2021; la creazione di questo scenario su larga scala è stata possibile grazie all'utilizzo delle varie fonti di big data, come ad esempio il database OpenStreetMap (OSM), le tracce GPS registrate dai cittadini e le misurazioni del flusso di veicoli da rilevatori a bordo strada.

La domanda, che prevede l'utilizzo di una popolazione virtuale, è stata sviluppata sempre tramite l'utilizzo di questi dati, con l'aggiunta di quelli forniti dall'ISTAT (al 2021), al fine di svolgere la simulazione nell'orario compreso tra le 6.00 e le 8.00 di un giorno feriali; questa popolazione, essenzialmente, consiste in un database di persone, ciascuna caratterizzata dai propri attributi, come ad esempio il luogo di casa/lavoro, la proprietà dei veicoli, la modalità di trasporto preferita e gli attributi socioeconomici, che corrispondono alle statistiche dell'area di studio e di conseguenza della popolazione nel suo complesso. Come introdotto nel paragrafo 2.4.2, nella micro-simulazione si utilizza un modello basato sulle attività dei singoli utenti, ovvero ogni individuo svolge una sequenza specifica di attività durante la giornata e fa piani di mobilità per spostarsi da un'attività all'altra nel miglior modo possibile. Il tempo di esecuzione stimato o effettivo dei piani rappresenta infatti il fattore più importante nella scelta di una modalità di trasporto urbano, e consente alle persone di scegliere la soluzione di mobilità ottimale per le loro attività specifiche, comprese le modalità e i percorsi di viaggio.

Per quanto riguarda la domanda esterna invece, la quale comprende tutti i viaggi tra l'area centrale di simulazione e le aree extraurbane, nonché i viaggi in auto tra aree extraurbane, risulta anch'essa ricavata dal database di dati disponibili, ma con un presupposto alla base che prevede la sua indipendenza dal comportamento di viaggio della popolazione virtuale situata nell'area urbana, fatta eccezione per la scelta del percorso.

Il modello di assegnazione utilizzato per lo sviluppo della micro-simulazione è l'*anti-jam routing*, ovvero un modello che presuppone che gli utenti dispongano di informazioni dettagliate sulla posizione e l'intensità degli ingorghi; in questo modo il percorso anti-ingorgo (*anti-jam*) è simile al percorso stocastico in rotta, con la differenza che invece di reindirizzare una quota fissa di veicoli, ne viene deviata solo una parte, la quale dipende dalla gravità dell'ingorgo, misurata con la densità dei veicoli. Ciò significa che maggiore è la densità di veicoli sul loro percorso, maggiore è la probabilità che i veicoli tentino di trovare un percorso alternativo.

## Study Approach

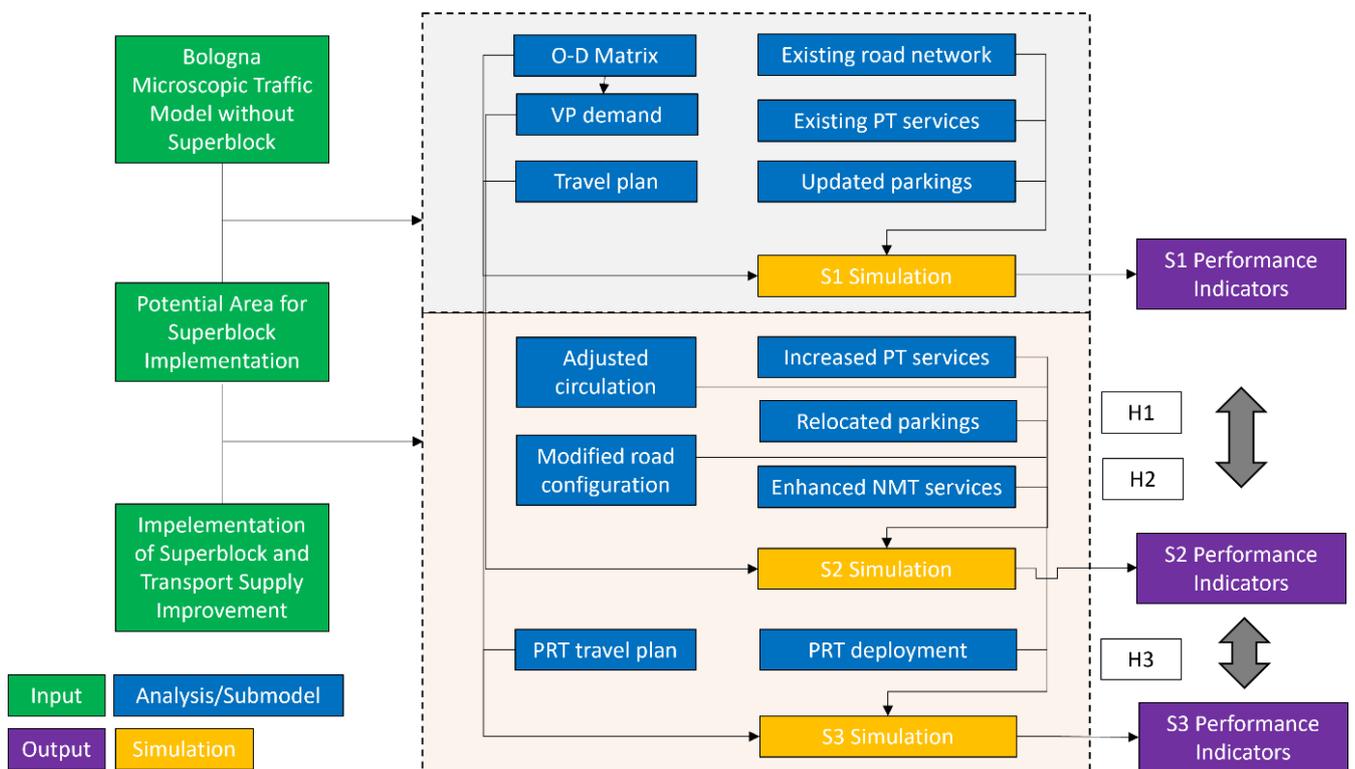


Figura 4.1: Diagramma riassuntivo dell'approccio utilizzato.

Nel progetto sono stati sviluppati ed analizzati tre diversi scenari:

1. *Base Scenario*: scenario iniziale che riproduce la situazione attuale della città di Bologna;
2. *Superblock Scenario*: scenario che prevede l’inserimento di alcuni *superblocks* nella città di Bologna;
3. *Superblock + PRT Scenario*: scenario che prevede l’inserimento dell’innovativo sistema di trasporto del PRT nello scenario in cui sono già presenti i *superblocks*.

La costruzione del secondo e del terzo scenario, che verranno descritti più nel dettaglio nei successivi paragrafi, si basa sull’apportare le modifiche richieste dall’inserimento dei *superblocks* nel contesto urbano della città di Bologna, e, successivamente, del PRT, sempre nello scenario di base; tali modifiche, che sono principalmente relative alla rete stradale e le sue regole sulla circolazione dei veicoli, ma che vanno anche ad intervenire sul trasporto pubblico, sono sintetizzate nella seguente tabella per tutti e tre gli scenari.

<b>Modifiche effettuate</b>	<i>Base Scenario</i>		<i>Superblock Scenario</i>		<i>Superblock + PRT Scenario</i>	
	Strade principali	Strade locali	Strade principali	Strade locali	Strade principali	Strade locali
Nuova circolazione del traffico				X	X	X
Restrizioni per il traffico				X		X
Rimuovere i parcheggi su strada			X	X	X	X
Fornire P&R, parcheggi multilivello e parcheggi multimodali			X		X	
Riorganizzare il trasporto pubblico			X		X	
Migliorare i servizi di mobilità attiva			X	X	X	X
Fornire la modalità di trasporto PRT						X

Tabella 4.1: Principali modifiche effettuate nei diversi scenari.

Nella *Tabella 4.1* viene inoltre introdotta la distinzione tra strade principali e locali; questa operazione, denominata gerarchizzazione delle strade, prevede la suddivisione della rete stradale nelle due categorie, principali e locali (*Figura 4.1*), dove con le prime vengono

indicate le strade più utilizzate, a doppio senso e aventi caratteristiche geometriche che permettono un elevato flusso di traffico, mentre le altre rientrano nella seconda categoria.

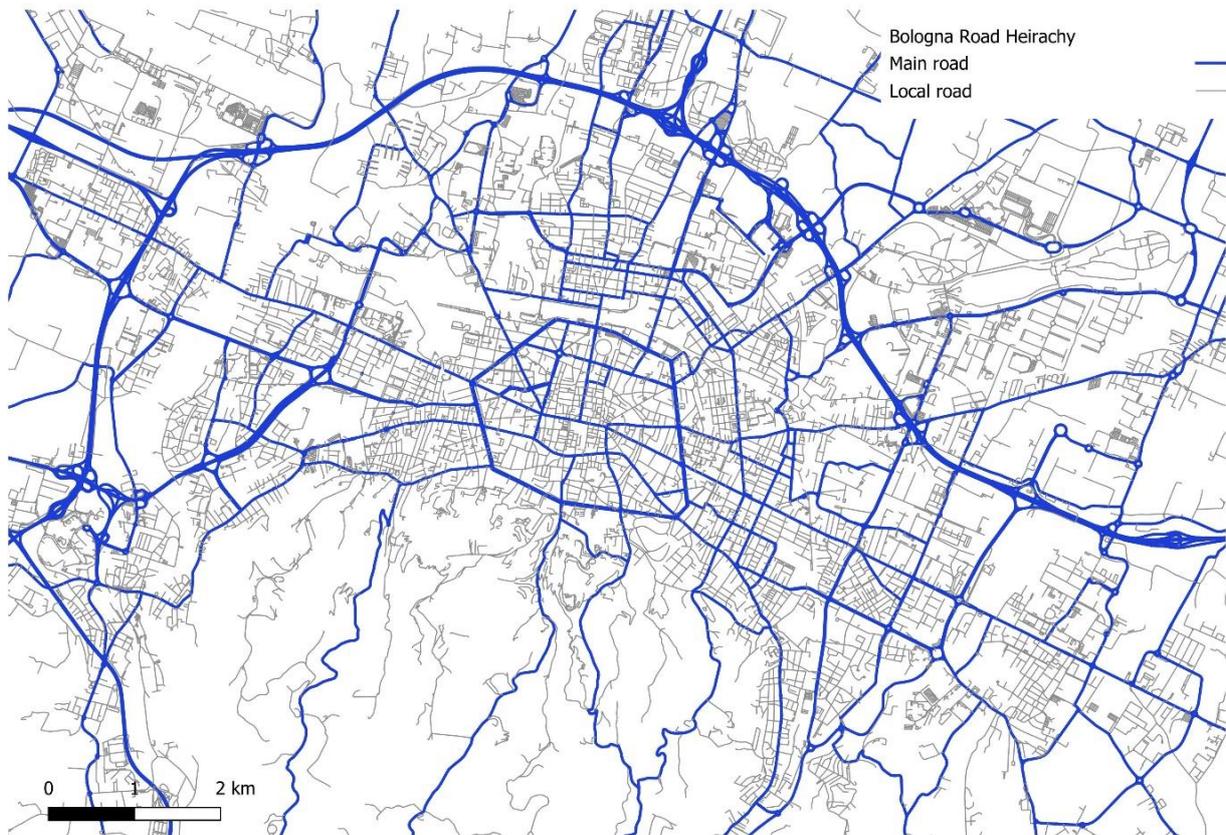


Figura 4.1: Gerarchizzazione della rete stradale di Bologna.

## 4.2 Base Scenario

Come accennato nel paragrafo precedente, lo scenario di base utilizzato nel progetto è stato l'ultimo proposto dal prof J. Schweizer ed altri collaboratori dell'Università di Bologna nel 2021, al quale sono state apportate alcune modifiche.

Una delle prime mansioni a noi affidate è stata quella di contare, arco per arco, tutti i parcheggi presenti nella rete stradale della città di Bologna, sia quelli a pagamento che non, al fine di ottenere un modello ancora più realistico; in SUMOPy è possibile generare in modo automatico i parcheggi lungo gli archi della rete, ma questo avrebbe portato alla creazione da parte del sistema di parcheggi lungo la carreggiata probabilmente inesistenti nella realtà. Successivamente i dati ricavati sono stati implementati nell'apposito script di python relativo allo scenario e aggiunti così nella rete stradale dello scenario.

Un altro compito fondamentale è stato quello riguardante l'aggiornamento di alcune caratteristiche della rete in NETEDIT; in particolare sono state controllate tutte le strutture pedonali, ovvero che nel modello fossero presenti i marciapiedi dove necessario, e sono stati aggiunti degli attraversamenti pedonali agli incroci non segnalati, considerando la distanza minima tra due attraversamenti vicini di circa 50-100 m, in modo tale da non essere troppo vicini per evitare che i veicoli si fermino molte volte.

In seguito, sono state controllate tutte le corsie degli autobus all'interno del centro della città, aggiungendo ad esse la priorità di accesso per i veicoli privati, e tutte le corsie stradali aventi uno sviluppo parallelo alle piste ciclabili presenti in città, per rimuovere all'interno delle prime l'accesso per le biciclette, al fine di far utilizzare solo le piste apposite agli utenti del modello che decidono di utilizzare la bicicletta.

Queste operazioni, lunghe e all'apparenza di bassa importanza, hanno invece permesso di migliorare ulteriormente il modello di base, rendendolo ancora più realistico. Essendo l'obiettivo del progetto quello di valutare gli effetti dell'applicazione dei *superblocks* nella città di Bologna, è solo utilizzando un buon modello che rifletta nel modo più simile possibile la realtà, che si possono ricavare dei risultati significativi.

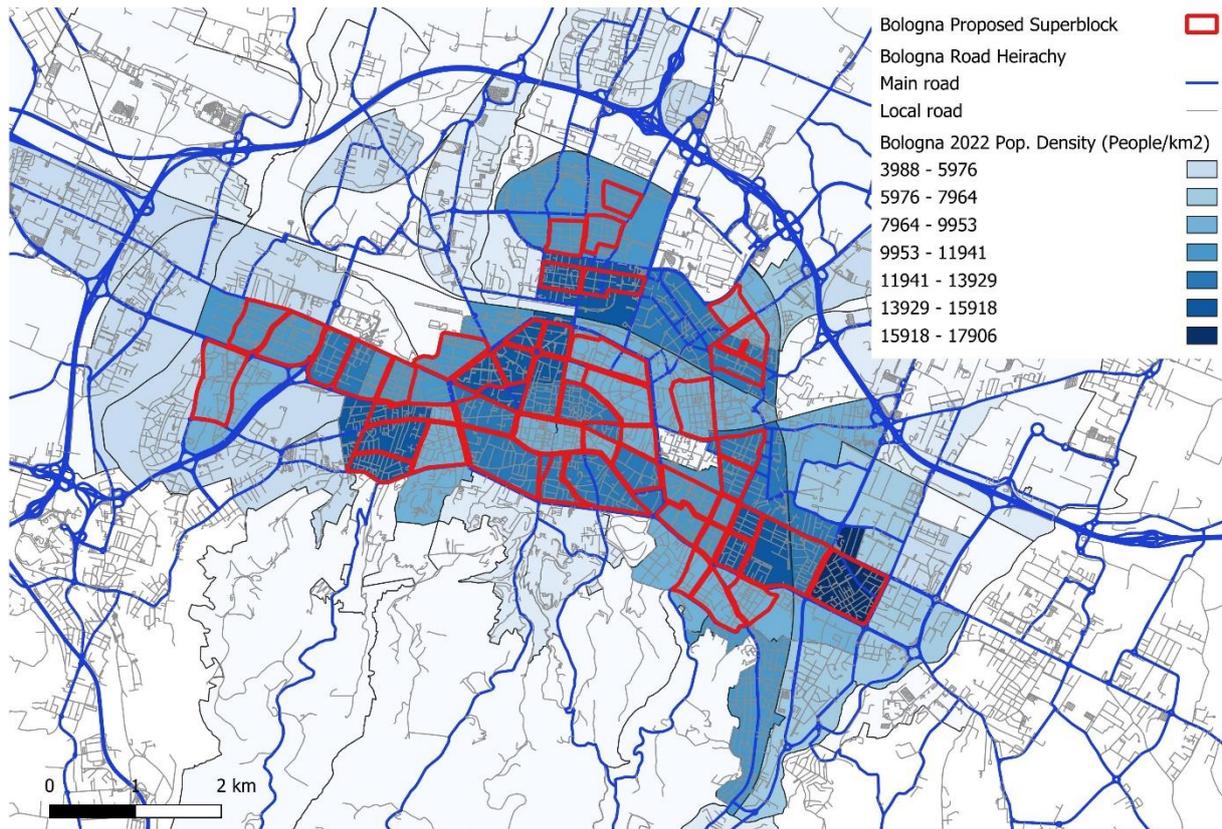
Infine, per completare lo scenario, è stata aggiunta la domanda, sia interna che esterna, per la quale è stato poi utilizzato il metodo di assegnazione *anti-jam routing*, descritto nel paragrafo precedente.

### **4.3 Superblock Scenario**

Questo scenario, il quale utilizza come fondo il *Base Scenario*, prevede l'aggiunta di alcuni *superblocks* alla città di Bologna e le relative restrizioni nei confronti della circolazione dei veicoli.

Il criterio fondamentale che ha permesso l'individuazione dei *superblocks* è stata la densità di popolazione del territorio, ricavata dai dati forniti dall'ISTAT; tramite le informazioni disponibili è stato possibile creare una mappa in cui sono rappresentate le zone con le varie densità di popolazione, e successivamente valutare, grazie anche alla rete stradale gerarchizzata, le aree candidate come potenziali *superblocks*. Nella scelta delle suddette aree, si è inoltre tenuto conto del rapporto tra popolazione e servizi, sia principali che secondari, al fine di cercare di garantire la loro presenza nelle aree interne o limitrofe dei *superblocks* stessi; inoltre, tale criterio, è stato accompagnato da un livello

di accessibilità, per tutti i potenziali *superblocks*, che prevede che, chi vive nella zona centrale del *superblock* stesso, può accedere alle fermate degli autobus più vicine e ai parcheggi centralizzati, di cui si parlerà successivamente, in un massimo di 10 o 15 minuti. Basandosi sulle ipotesi appena enunciate, sono state individuate 49 potenziali aree in cui poter inserire un *superblock*, come illustrato nella seguente *Figura 4.2*, diventate in seguito a tutti gli effetti i *superblocks* utilizzati nello scenario e nelle nostre analisi.



*Figura 4.2: Superblocks proposti e utilizzati nella simulazione in base alla densità demografica e la gerarchizzazione delle strade.*

Queste aree individuate sono state poi riportate, disegnando i vari perimetri, in SUMOPy, in modo tale da predisporre la configurazione del *Superblock Scenario* nel software di micro-simulazione utilizzato.

Come già trattato in precedenza, la presenza dei *superblocks* nel contesto urbano prevede la modifica delle regole della viabilità, negando il transito al loro interno a tutti i veicoli a motore; tale operazione è stata effettuata in modo analogo a quella svolta nel *Base Scenario*, tramite l'apposito pannello (*Figura 2.3*) che consente di gestire l'accessibilità ai veicoli negli archi che compongono la rete.

Il nuovo scenario, che prevede la rimozione dei posti auto in strada all'interno dei *superblocks* stessi, deve garantire al contempo lo spazio apposito per consentire agli utenti di poter parcheggiare il proprio veicolo nelle aree adiacenti alla loro destinazione e al *superblock* in cui risulta situata la propria abitazione. La stima dei parcheggi effettuata per il *Base Scenario* ha reso possibile una valutazione del numero di posti auto effettivamente necessari da dover garantire agli utenti di ciascuna area interessata dall'inserimento di un *superblock*, i quali sono stati forniti, nel modello del secondo scenario, tramite la realizzazione di località di parcheggio centralizzate, dove gli utenti possono parcheggiare le loro auto, definiti secondo i seguenti criteri:

- I parcheggi devono essere vicini ai confini del *superblock*, poiché gli utenti devono raggiungere la loro destinazione finale a piedi impiegando tempi ragionevoli;
- I parcheggi possono essere situati in parcheggi privati esistenti (sia a livello del suolo, sotterranei che sopraelevati) o corrispondere ad ampi spazi vuoti;
- Sono considerate anche le aree in cui è prevista la realizzazione futura di parcheggi sotterranei centralizzati.

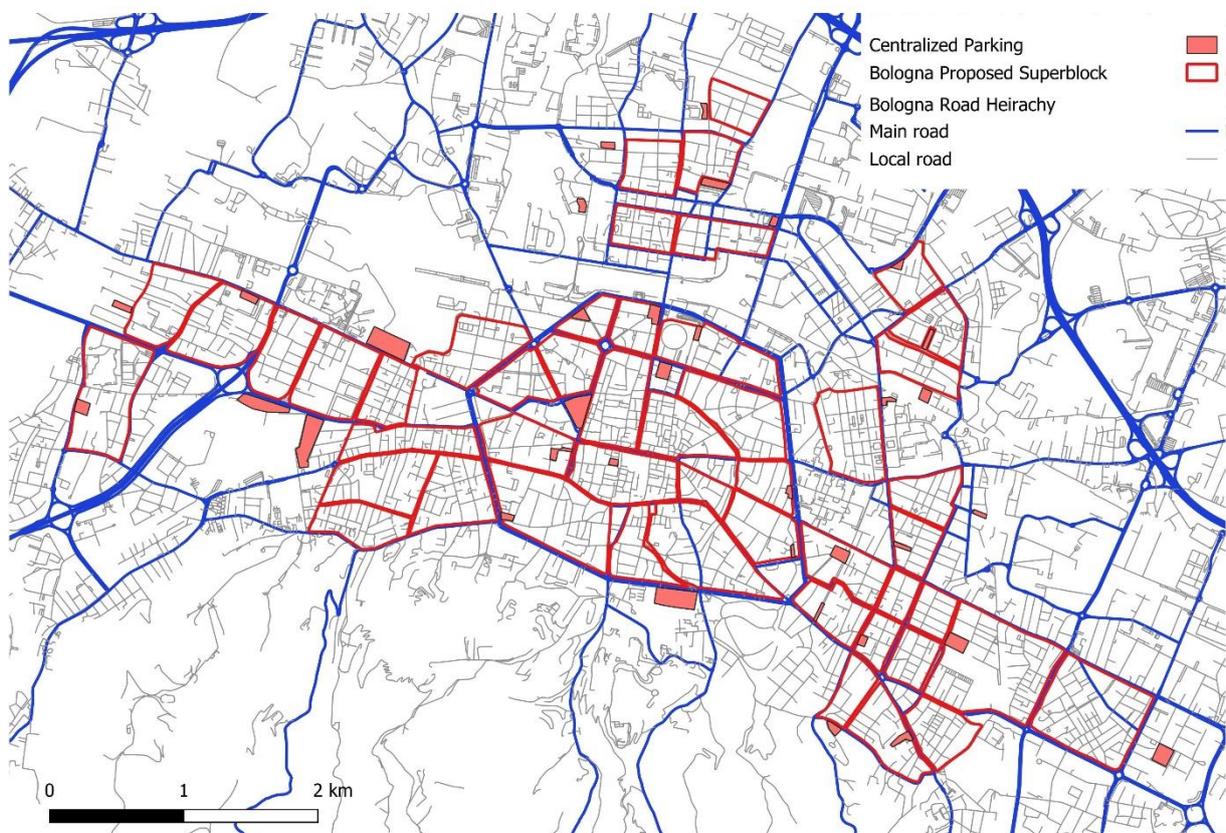
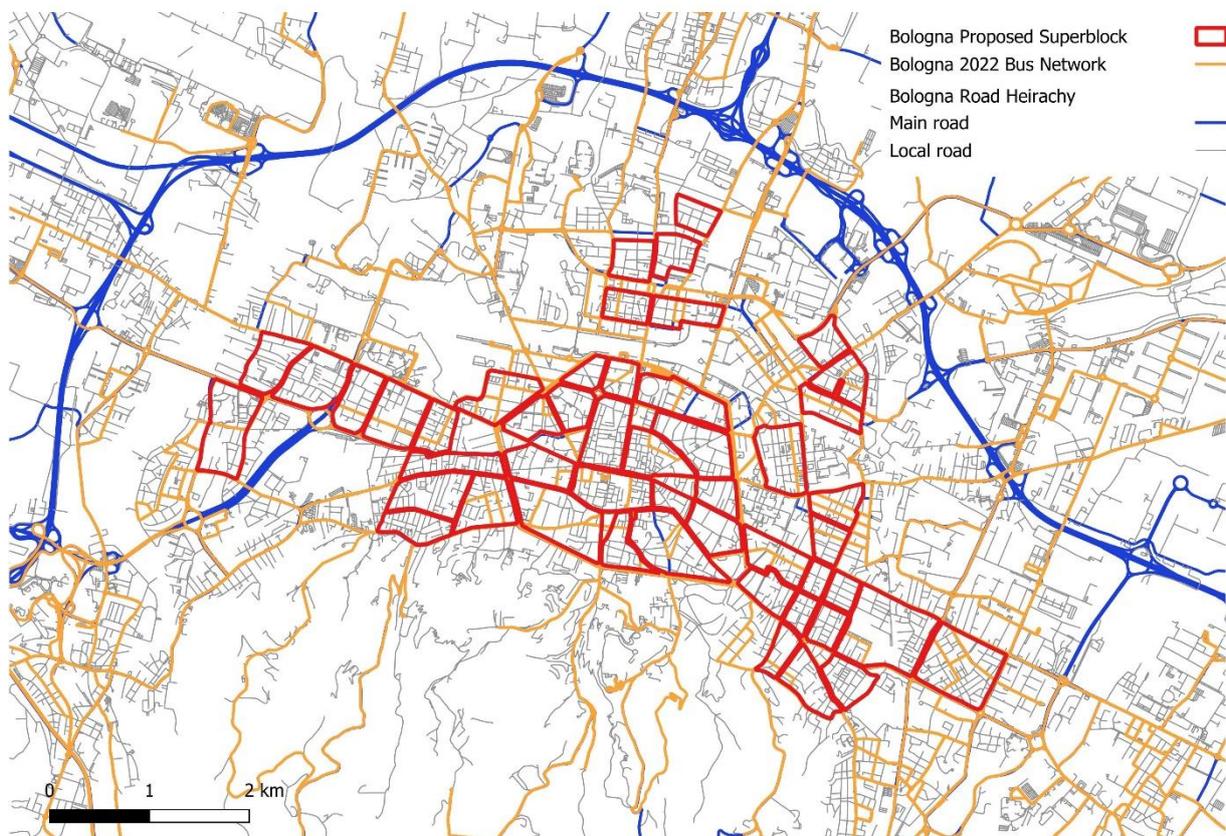


Figura 4.3: Nuove aree di parcheggio centralizzate.

Come si può ben notare dalla *Figura 4.3*, di nuove aree di parcheggio centralizzate ne sono state individuate, dove possibile, una per *superblock*, mentre alcune, come nel centro città o nelle zone dove non vi è un'area adiacente al *superblock* stesso che rispetti nessuno dei tre criteri prima elencati, sono state unite per fornire un'area di sosta per gli utenti di più *superblocks*.

Un'altra operazione necessaria alla realizzazione e al completamento del *Superblock Scenario* è stata la modifica e riqualificazione della rete e del servizio di trasporto pubblico.



*Figura 4.4: Percorsi delle linee di autobus attuali nella città di Bologna.*

Come si può notare dalla *Figura 4.4*, alcune linee di autobus attraversano qualche *superblock*, ma ciò risulta incompatibile con l'idea alla base del modello; dunque, sono state controllate tutte le linee di autobus che passano attraverso ad almeno un *superblock*, e si è proseguito con la deviazione dei loro percorsi, creandone così di nuovi che costeggiano l'area dei *superblocks* e utilizzano le fermate già esistenti nel modello. Successivamente, al fine di aumentare l'efficienza del servizio e renderlo un'alternativa più appetibile per gli utenti, è stata incrementata di un terzo la frequenza di tutte le linee.

Nel modello erano inizialmente presenti 59 linee di autobus, le quali rispecchiavano la situazione attuale (al 2022) del trasporto pubblico di autobus a Bologna; di queste linee 24 sono risultate aventi almeno una fermata all'interno di un *superblock*, per cui le loro traiettorie sono state deviate, seguendo il criterio sopra descritto.

L'ultima modifica effettuata ha previsto l'inserimento di una flotta di taxi, 5 per *superblock* circolanti ogni ora di simulazione, ai quali risulta però possibile attraversare i *superblocks* stessi; tale scelta è stata fatta tenendo in considerazione una futura ipotesi di utilizzo di veicoli elettrici capaci di fornire tale servizio. Questi veicoli inoltre risultano essere utilizzabili da più utenti insieme (taxi condivisi) e sono soggetti a limiti di velocità a passo d'uomo, al fine di poter offrire un servizio alternativo per chi voglia spostarsi all'interno del *superblock*.

Infine, analogamente a quanto svolto nel *Base Scenario*, si è proseguito con l'aggiunta della domanda, interna ed esterna, utilizzando sempre l'*anti-jam routing*, ma utilizzando il metodo *relaxation*, il quale esegue l'assegnazione più volte, iterandola, al fine di utilizzare il miglior piano di mobilità possibile per ogni utente.



Figura 4.5: Illustrazione dei superblocks proposti in una foto satellitare di Bologna.

#### **4.4 Superblock + PRT Scenario**

Il terzo ed ultimo scenario, come accennato precedentemente, prevede l'inserimento dell'innovativo sistema di trasporto del PRT nel *Superblock Scenario*. Al momento però lo sviluppo di questo modello risulta essere solo alle fasi iniziali, in cui sono state fatte le prime ipotesi e proposte, in quanto il suo completamento, compreso di simulazione e risultati, risulta essere previsto nei prossimi mesi.

Il Personal Rapid Transit (PRT), chiamato anche Trasporto Automatizzato Personale (PAT), è una modalità di trasporto pubblico con piccoli veicoli automatizzati che operano su una rete di guide appositamente costruite. I veicoli utilizzati sono dimensionati per viaggi individuali o di piccoli gruppi, in genere di non più di 3-6 passeggeri per veicolo, e le guide sono disposte in una rete in cui tutte le stazioni risultano essere situate sui binari di raccordo e con frequenti punti di unione/divergenza. Questo approccio consente viaggi non-stop, punto a punto, che bypassano tutte le stazioni intermedie, rendendo questa alternativa più efficiente ed attraente.



*Figura 4.6: Esempio di veicolo PRT.*

Un tipico mezzo del PRT è lungo 3,74 m, largo 2,10 m e alto 2,50 m, e può raggiungere velocità medie di 40-70 km/h. Questi veicoli ospitano meno passeggeri rispetto ai treni e agli autobus, e ciò è compensato combinando velocità medie più elevate e percorsi diversi e più brevi.

In letteratura ci sono diverse proposte riguardanti le guide, che possono essere realizzate con travi simili a monorotaie, capriate simili a ponti che sostengono binari interni e cavi incorporati in una carreggiata. La maggior parte dei progetti mette il veicolo in cima ad una pista aerea, sollevata da terra, al fine ridurre l'intrusione visiva ed i costi. I progetti di solito collocano le stazioni su binari laterali, in modo che il traffico possa bypassare i veicoli che raccolgono o lasciano i passeggeri. Ogni stazione, inoltre, è concepita per essere minimalista, senza strutture come i bagni, ma con un diverso numero di posti per poter ospitare i veicoli.

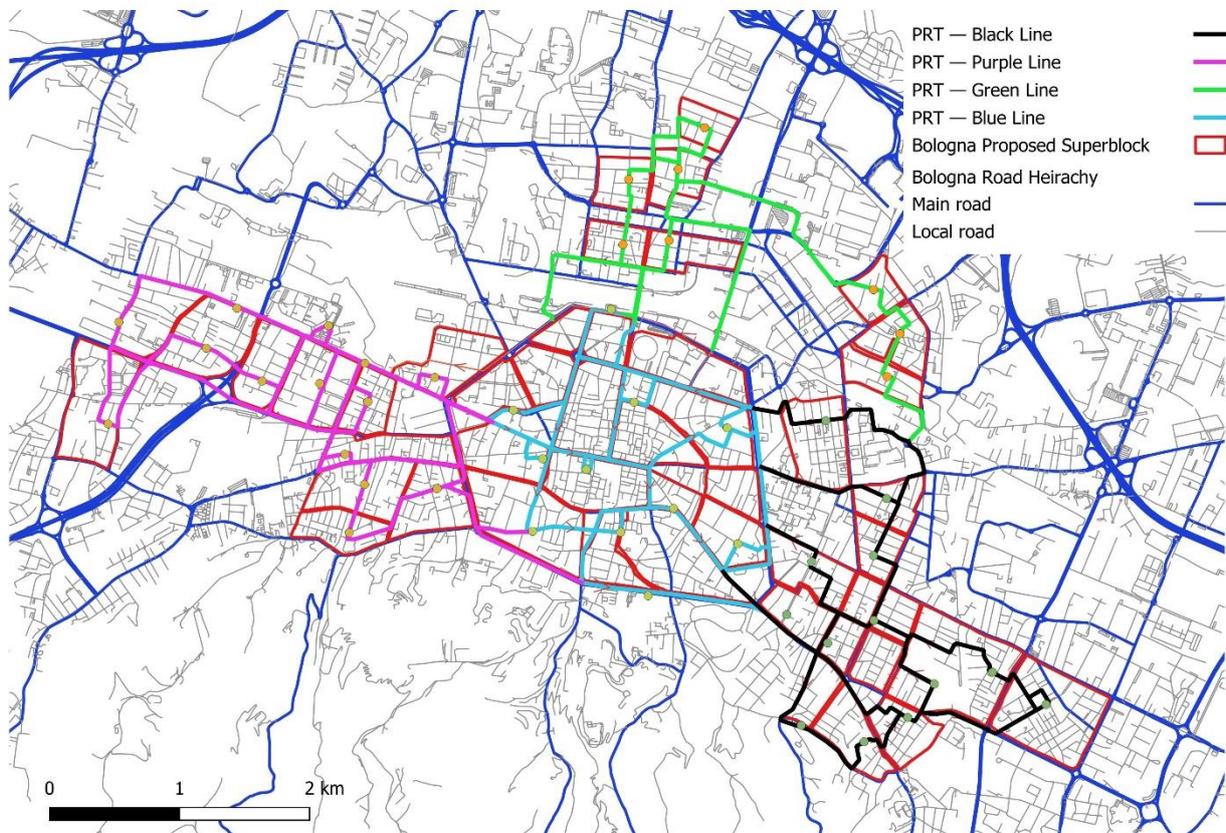


Figura 4.7: Esempio di linea PRT con guida sopraelevata.

Nel nostro progetto il sistema del PRT è stato inserito all'interno dello scenario contenente i *superblocks*, mantenendo le relative modifiche introdotte nel *Superblock Scenario*, come i parcheggi centralizzati e gli incrementi di frequenza del trasporto pubblico. Risulta fondamentale precisare come l'introduzione di tale mezzo di trasporto in un ambito urbano già caratterizzato dalla presenza dei *superblocks*, rappresenti un ulteriore incentivo per gli utenti ad utilizzare sempre meno i veicoli motorizzati privati, al fine di promuovere invece il trasporto pubblico, rendendolo un'alternativa sempre più attraente.

L'idea alla base di tale scenario ha previsto l'inserimento di una rete di guide, divise principalmente in quattro linee, ognuna disposta in una principale zona della città comprendente più quartieri, e di una stazione del PRT presente all'interno o nel perimetro

di ogni *superblock*, come illustrato in *Figura 4.8*, con l'obiettivo di collegare il più possibile le diverse aree della città.



*Figura 4.8: Rete PRT proposta all'interno del modello contenente i Superblocks.*

La costruzione di tale rete di trasporto avviene ovviamente in diverse fasi, ognuna della quali prevede la realizzazione di una parte diversa, come ad esempio l'installazione delle guide e la costruzione delle stazioni, al fine di riuscire a mettere in funzione tutto quanto insieme una volta completati i lavori.

## 5. ANALISI E CONFRONTO DEI RISULTATI

### 5.1 Share modale e utilizzo degli archi

In seguito allo svolgimento delle simulazioni basate sui modelli del *Base Scenario* e del *Superblock Scenario*, sono stati ottenuti dei risultati che hanno permesso un confronto tra i due scenari, in termini di inquinamento, atmosferico e acustico, e in relazione a parametri caratterizzanti le diverse modalità di trasporto.

Una prima analisi può essere effettuata nei confronti della variazione dello share modale nei due scenari, riportato per entrambi nelle seguenti figure.

#### Strategy Shares - Base Scenario

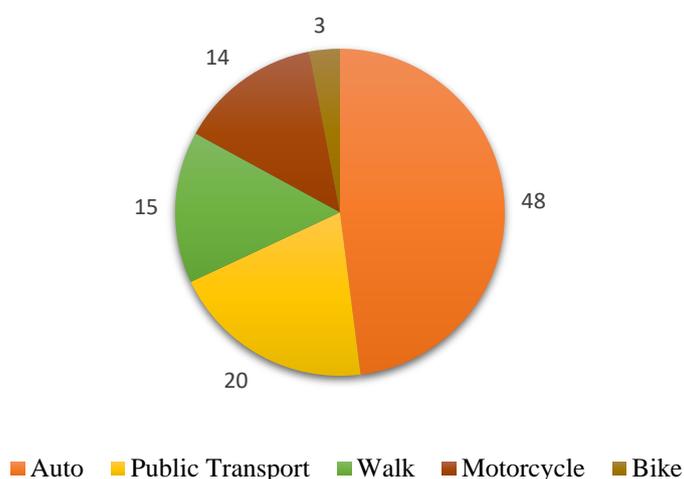


Figura 5.1: Share modale nel Base Scenario.

#### Strategy Shares - Superblock Scenario

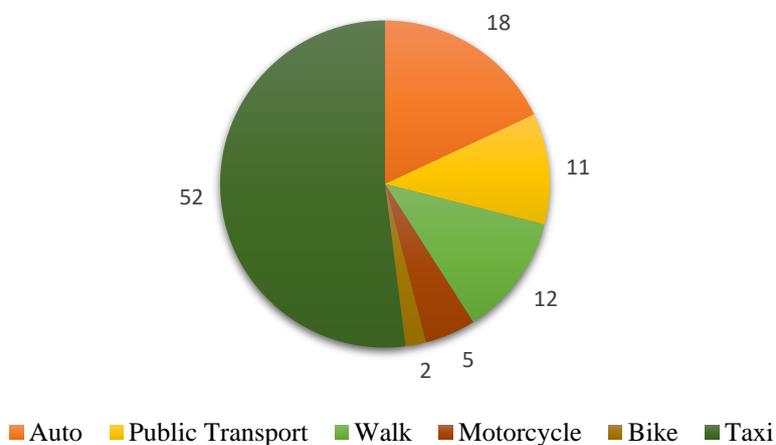


Figura 5.2: Share modale nel Superblock Scenario.

Come si può ben notare, i mezzi di trasporto che risentono di più della presenza dei *superblocks* risultano essere proprio i privati, rappresentati dall'automobile, la quale scende da una percentuale di utilizzo da parte degli utenti dal 48% nel primo scenario al 18% nel secondo, e dalla motocicletta, la cui percentuale passa invece dal 14% al 5%; al contrario, l'introduzione della flotta di taxi nel secondo scenario, unitamente alla loro possibilità di attraversare i *superblocks*, ha reso tale mezzo di trasporto il più utilizzato, con uno share modale pari al 52%, ovvero la metà degli utenti. Per quanto riguarda il trasporto pubblico e la mobilità attiva, anche le loro percentuali di utilizzo risultano essere inferiori nel *Superblock Scenario*, sempre a causa dell'elevato impiego dei taxi, ma rimangono più o meno dello stesso ordine di grandezza; ulteriori analisi, relative ai singoli mezzi di trasporto, saranno approfondite nei successivi paragrafi.

Uno dei primi dati da analizzare, tra i più rappresentativi della variazione di utilizzo in termini quantitativi dei diversi mezzi di trasporto, è quello del flusso di veicoli nei vari archi della rete; confrontando i valori ottenuti nei due scenari, il numero totale dei suddetti veicoli nel *Superblock Scenario* risulta inferiore del 32%, quindi circa un terzo, rispetto al *Base Scenario*, rispecchiando così la nuova distribuzione dello share modale illustrata precedentemente. Nelle seguenti figure è possibile osservare e confrontare, tramite l'utilizzo di una scala colorata, il risultato appena commentato.

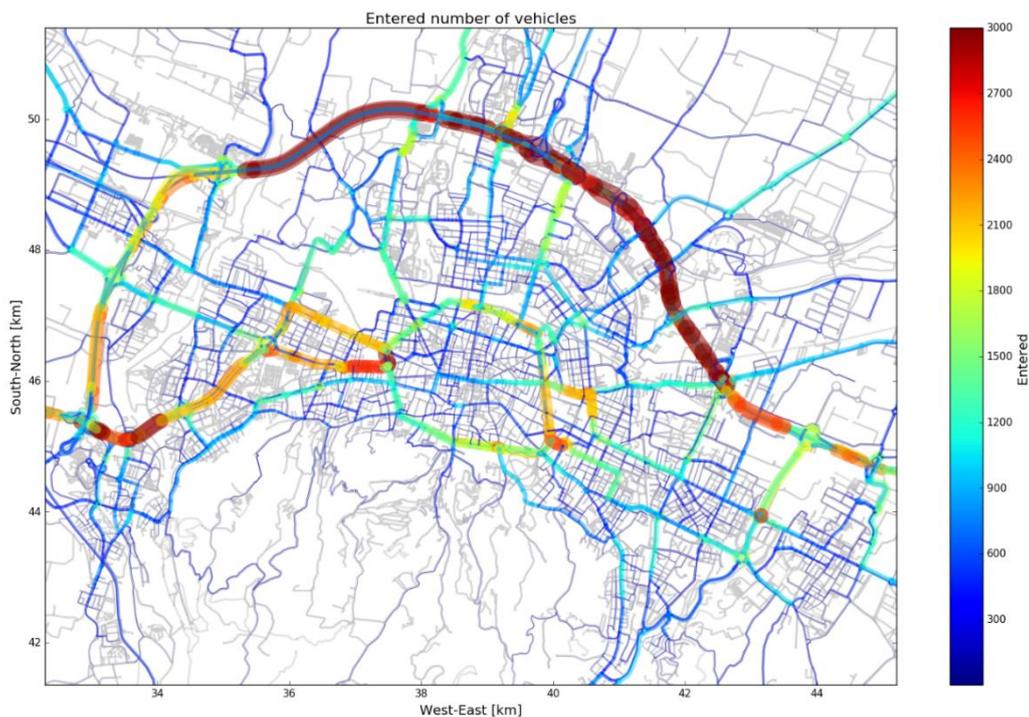


Figura 5.3: Flusso di veicoli sugli archi della rete nel Base Scenario.

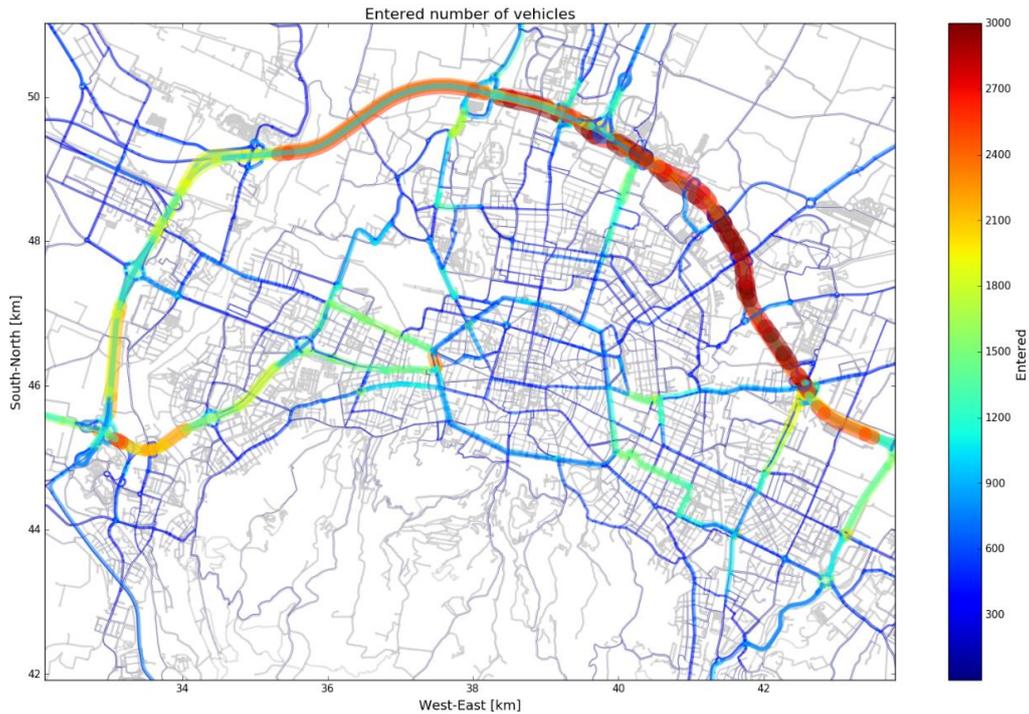


Figura 5.4: Flusso di veicoli sugli archi della rete nel Superblock Scenario.

Nella Figura 5.4 risultano facilmente distinguibili le strade perimetrali dei *superblocks*, mentre le strade locali al loro interno presentano il poco flusso relativo ai taxi.

La riduzione dell'utilizzo dei mezzi di trasporto privati nel *Superblock Scenario*, si riflette inoltre sui valori medi dei parametri caratterizzanti l'utilizzo degli archi della rete stradale; tramite le simulazioni è infatti possibile ottenere diversi dati che permettono di valutare e confrontare in termini di tempi medi di percorrenza, attesa e velocità, l'impatto che l'inserimento dei *superblocks* ha avuto nel modello digitale della città di Bologna.

### Parametri di utilizzo medio degli archi

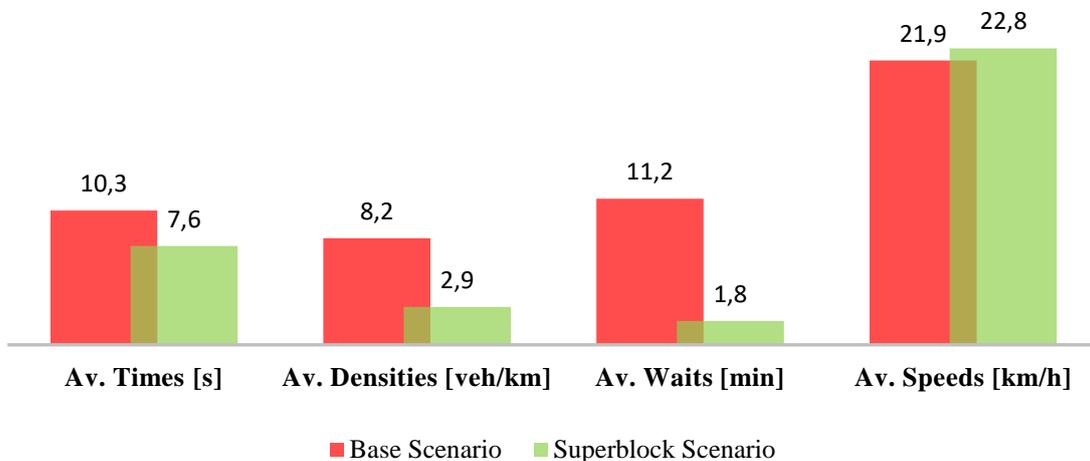
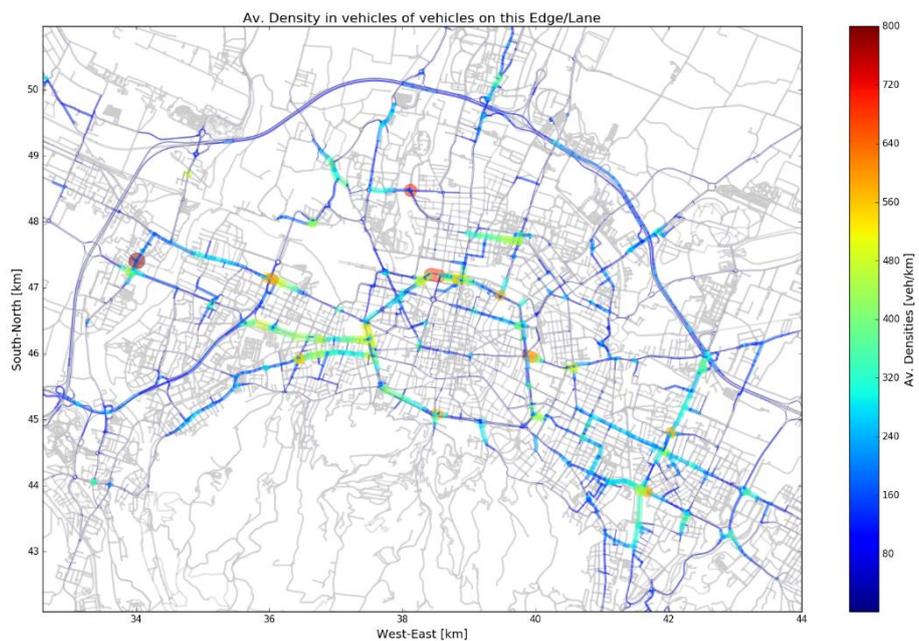
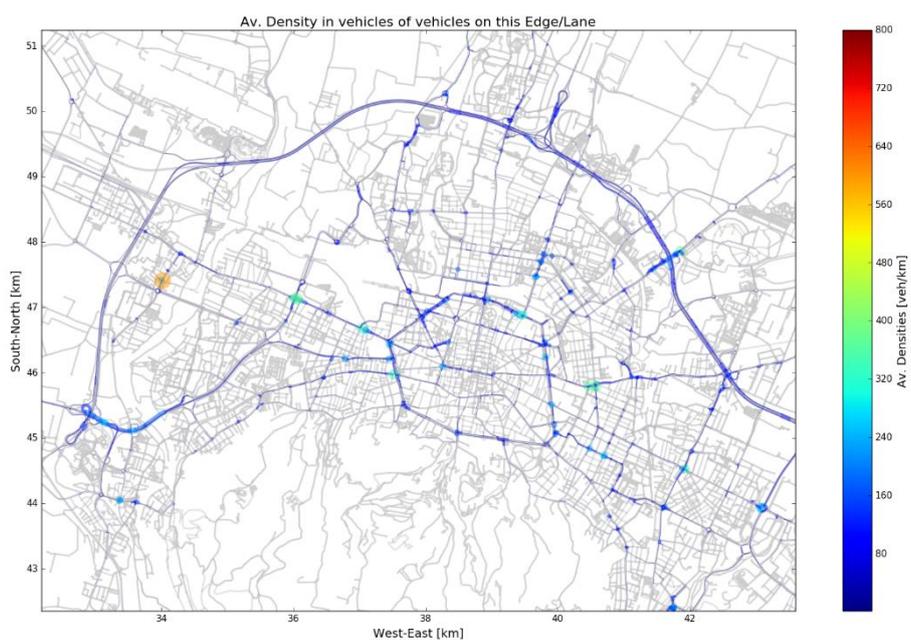


Figura 5.5: Confronto dei parametri medi relativi all'utilizzo degli archi nei due scenari.

Dalla *Figura 5.5* risulta subito evidente come la riduzione dell'utilizzo del trasporto privato nel *Superblock Scenario* riduca notevolmente i parametri relativi alla densità media e al tempo medio di attesa sugli archi, rispettivamente del 64% e dell'84%; inoltre, dato che l'inserimento dei *superblocks* all'interno della rete stradale urbana prevede che al loro interno vi siano solamente delle strade definite come locali, gli utenti tendono ad utilizzare per la maggior parte della durata dei loro viaggi le strade definite invece come principali, incrementando così del 4% la velocità media e diminuendo, all'opposto, il tempo medio di percorrenza degli archi del 26%.



*Figura 5.6: Densità di veicoli sugli archi della rete nel Base Scenario.*



*Figura 5.7: Densità di veicoli sugli archi della rete nel Superblock Scenario.*

In relazione alla riduzione del flusso di traffico sulla rete nel *Superblock Scenario* già illustrata precedentemente, e quindi del numero di veicoli in circolazione, dai risultati si osserva inoltre un'importante diminuzione del consumo di carburante.

### Abs. Fuel [l]

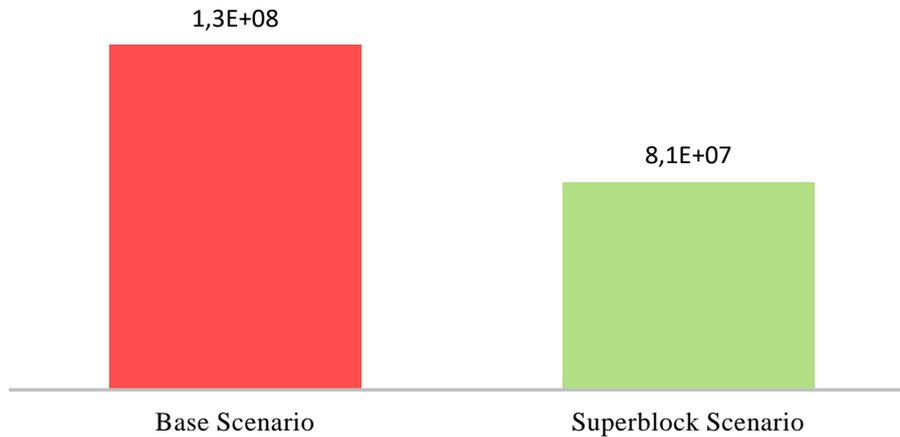


Figura 5.8: Confronto del consumo assoluto di carburante nei due scenari.

### Specific fuel [l/km/h]

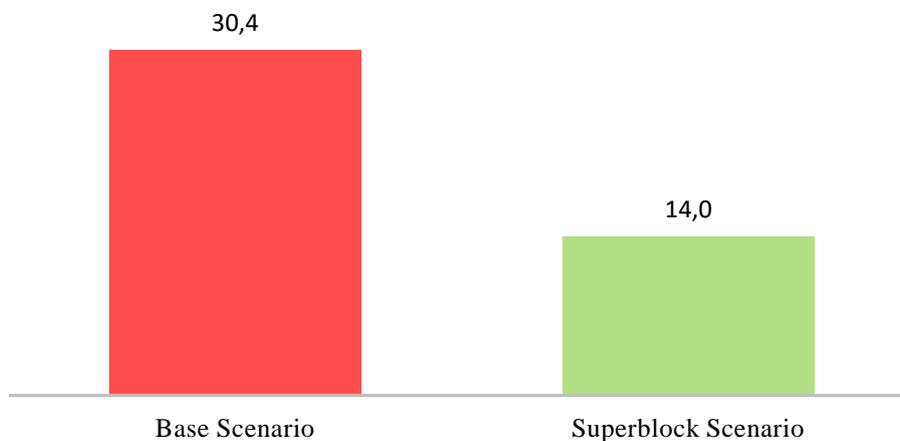


Figura 5.9: Confronto del consumo specifico di carburante nei due scenari.

Facendo riferimento alla *Figura 5.9*, si può notare immediatamente come il consumo specifico di carburante risulta dimezzato nel *Superblock Scenario* rispetto al *Base Scenario*, il quale diminuisce infatti del 54%; per quanto riguarda il consumo assoluto invece, anch'esso cala di una buona percentuale, circa il 40%, anticipando così con buon auspicio i risultati relativi agli inquinanti, che verranno trattati successivamente.

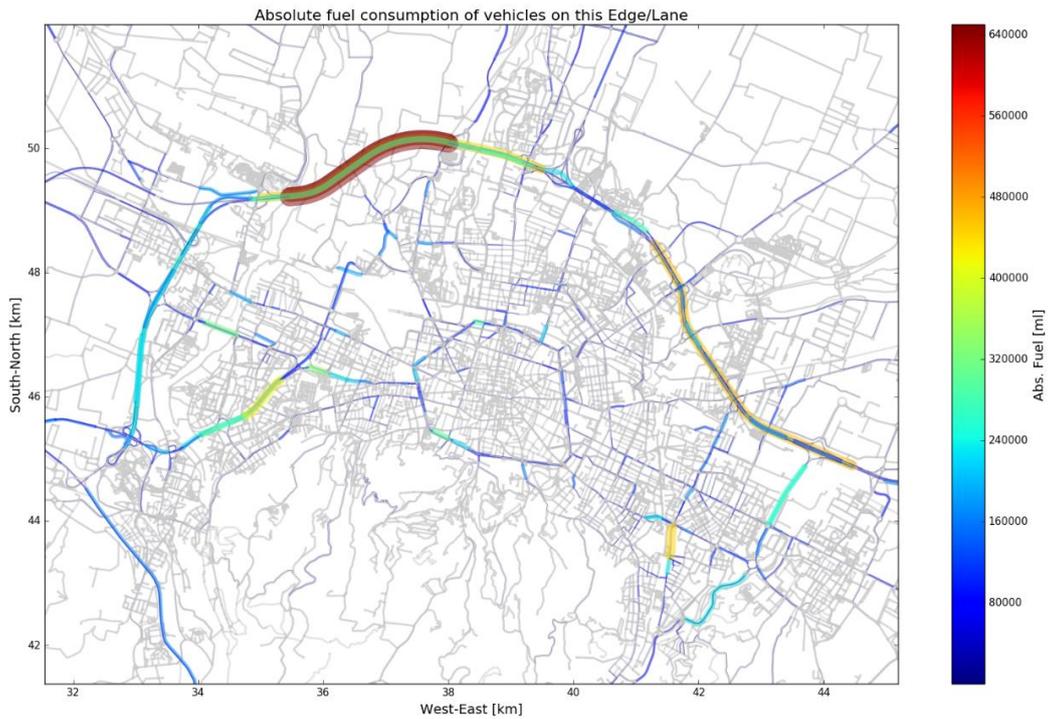


Figura 5.10: Consumo di carburante sugli archi della rete nel Base Scenario.

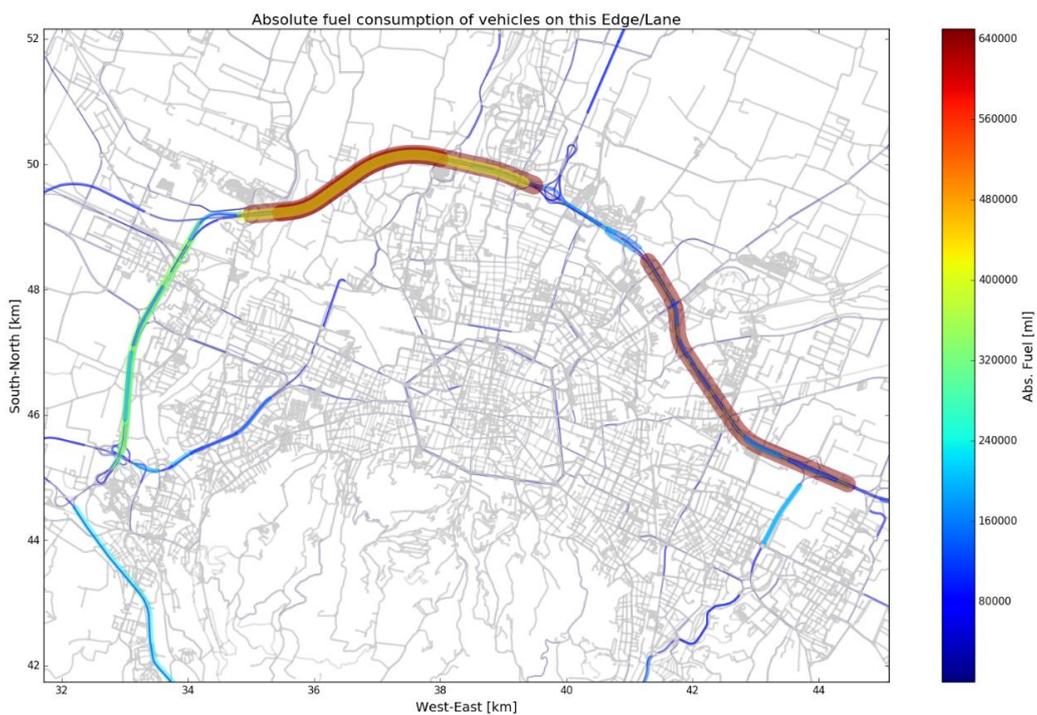


Figura 5.11: Consumo di carburante sugli archi della rete nel Superblock Scenario.

Dal confronto tra le due figure precedenti, si può notare come il consumo di carburante diminuisca maggiormente nella parte centrale della città, dove quasi tutta l'area risulta trasformata in *superblocks*, mentre al contrario aumenta nella tangenziale, la quale risulta essere la strada di tipo principale più utilizzata nel secondo scenario.

## 5.2 Utilizzo dell'automobile

L'automobile, come illustrato all'inizio del paragrafo precedente, è il mezzo di trasporto che più ha risentito, in termini di utilizzo, dell'applicazione dei *superblocks* alla rete urbana della città.

### Somme totali dei parametri di utilizzo dell'auto

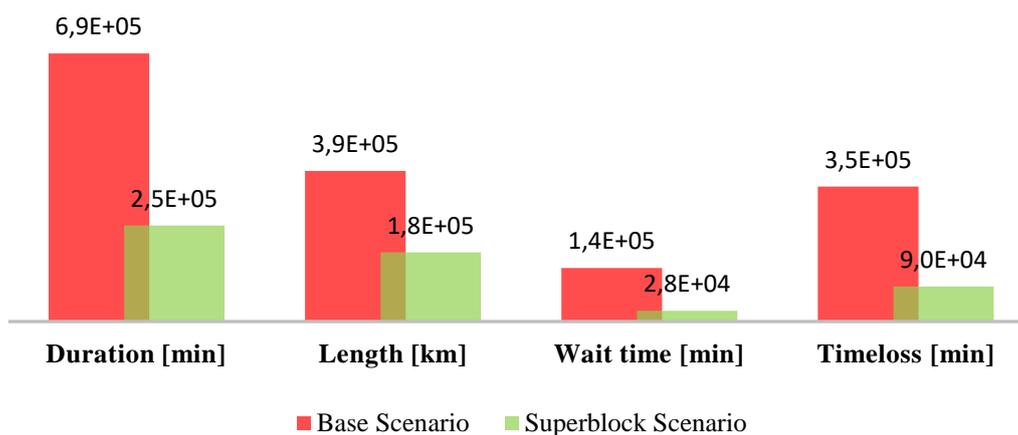


Figura 5.12: Confronto tra le somme totali dei parametri relativi all'utilizzo dell'auto nei due scenari.

### Medie dei parametri di utilizzo dell'auto

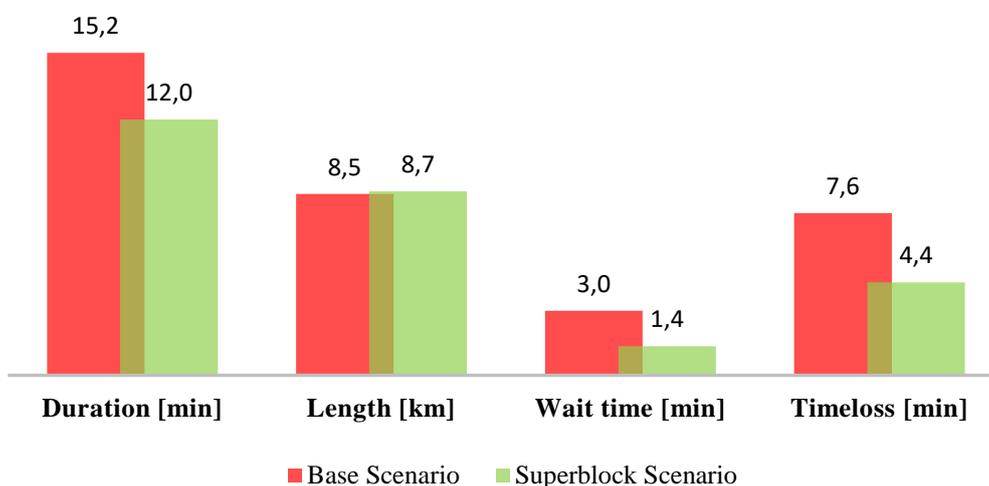


Figura 5.13: Confronto tra le medie dei parametri relativi all'utilizzo dell'auto nei due scenari.

La durata dei viaggi effettuati con l'auto nel *Superblock Scenario* risulta calata in media del 21% rispetto a quelli effettuati nel *Base Scenario*, e, complice il minor utilizzo di tale mezzo di trasporto, il totale di tempo speso nei viaggi è diminuito di circa il 64%. Sempre in termini di tempo, quello medio di attesa lungo il percorso dell'utente e quello

mediamente perso, risultano diminuiti rispettivamente del 55% e del 43%. Per quanto riguarda invece la lunghezza dei viaggi effettuati con l'auto, si ha una riduzione del 54% del totale dei chilometri percorsi con tale mezzo di trasporto nello scenario contenente i *superblocks*, mantenendo però in linea con l'altro scenario la lunghezza media di tali percorsi.

### 5.3 Utilizzo della motocicletta

La diminuzione dell'utilizzo della motocicletta nel *Superblock Scenario* rispetto al *Base Scenario* ha portato a cambiamenti nei valori dei parametri relativi al suo impiego analoghi a quelli ottenuti nel caso dell'automobile.

#### Somme totali dei parametri di utilizzo della moto

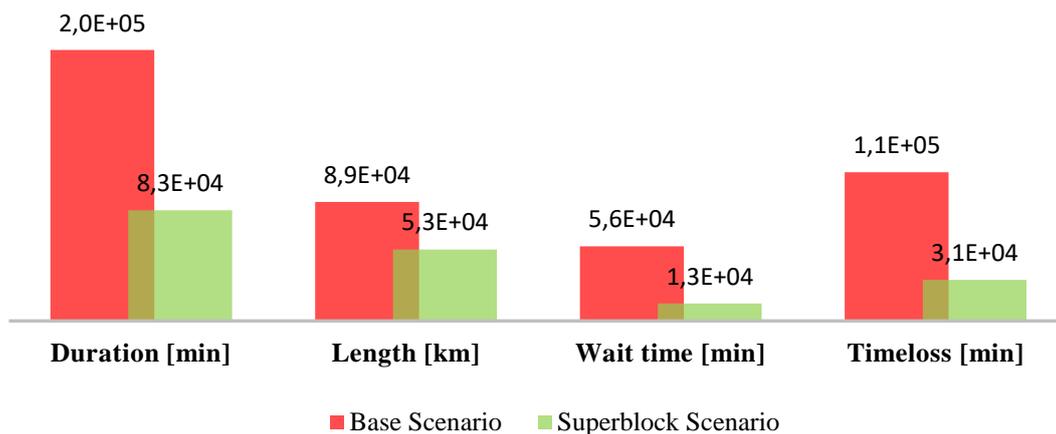


Figura 5.14: Confronto tra le somme totali dei parametri relativi all'utilizzo della moto nei due scenari.

Le variazioni più significative riguardano le somme dei tempi totali di durata degli spostamenti con tale mezzo, in quanto risultano diminuiti del 59%, e, i relativi tempi totali di attesa e persi, che presentano anche loro un netto calo, pari al 77% e al 72%. Per quanto riguarda la lunghezza totale degli spostamenti, in termini totali presenta anch'essa un'elevata diminuzione del numero totale di chilometri percorsi, di circa il 40%, anche se si presenta un aumento della distanza media percorsa del 15%. Sempre in riferimento alla *Figura 5.15*, si può notare come tutte le medie dei vari tempi, ovvero durata, tempo di attesa e tempo perso sono diminuiti, rispettivamente, del 22%, 56% e 47%

## Medie dei parametri di utilizzo della moto

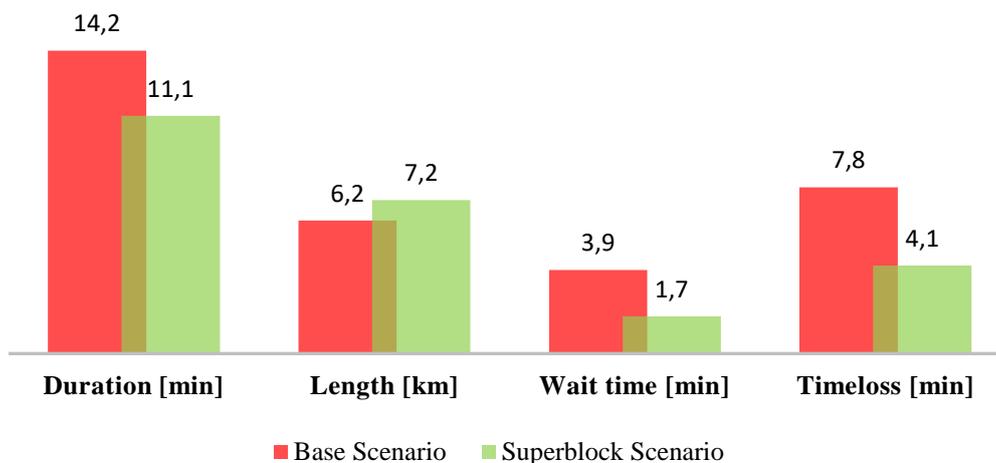


Figura 5.15: Confronto tra le medie dei parametri relativi all'utilizzo della moto nei due scenari.

## 5.4 Confronto sulla mobilità attiva

Nel caso della mobilità attiva, rappresentata dalla bicicletta e dalla camminata, ricordando che il loro utilizzo nei due scenari presenta più o meno la stessa percentuale di share modale, si possono effettuare più o meno le stesse valutazioni degli altri mezzi di trasporto.

Iniziando da un'analisi dei parametri di utilizzo della bicicletta, le differenze più rilevanti sono particolarmente evidenti nei confronti delle somme dei totali degli stessi.

## Somme totali dei parametri di utilizzo della bicicletta

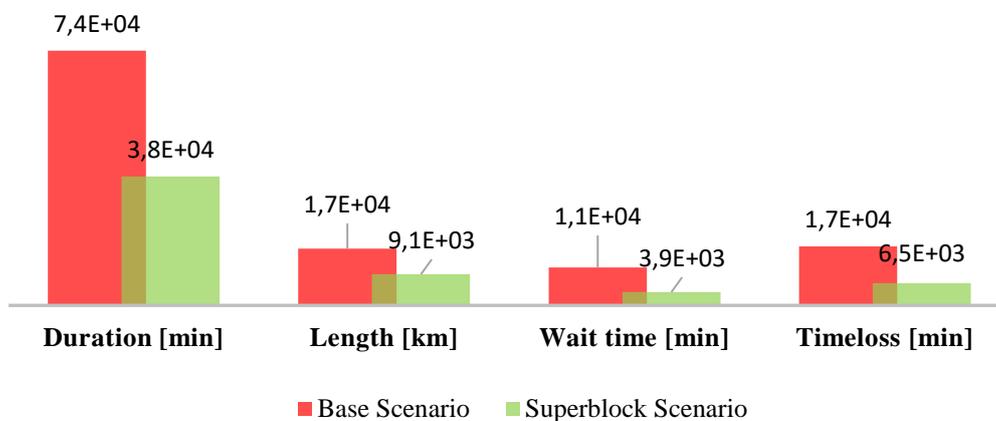


Figura 5.16: Confronto tra le somme totali dei parametri relativi all'utilizzo della bicicletta nei due scenari.

## Medie dei parametri di utilizzo della bicicletta

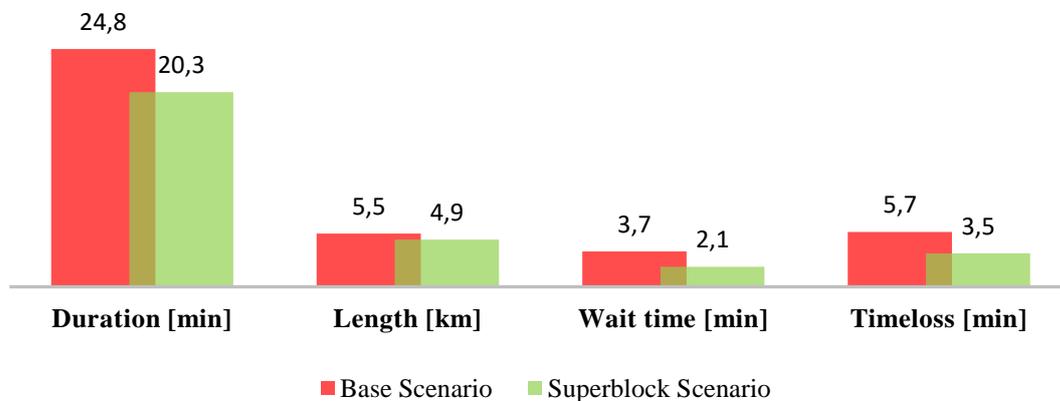


Figura 5.17: Confronto tra le medie dei parametri relativi all'utilizzo della bicicletta nei due scenari.

La lunghezza dei percorsi, diminuita in media dell'11%, risulta al contempo diminuita nel totale del 45%, in quanto la presenza dei *superblocks* favorisce in particolar modo l'utilizzo delle strade da parte dei ciclisti, garantendo la possibilità di utilizzo di quelle strade che prima erano magari destinate solo alle auto. Questo fattore induce inoltre gli utenti ad utilizzare la bicicletta per effettuare quei viaggi medio-brevi, che risulterebbero molto più lunghi se effettuati camminando, in quanto all'interno dei *superblocks* si possono sentire più sicuri e non rischiano di intercettare il traffico, causa principale delle perdite di tempo; confrontando infatti il tempo medio perso e di attesa nei due scenari, nel *Superblock Scenario* si ha una diminuzione relativa pari al 39% e al 43%.

I valori dei parametri relativi alle somme dei tempi totali nel *Superblock Scenario*, rispetto al *Base Scenario*, sono così diminuiti:

- Durata totale dello spostamento: -49%;
- Tempo di attesa: -65%;
- Tempo perso: -62%.

Rimanendo nel tema del tempo, quello speso nell'utilizzare la bicicletta nel *Superblock Scenario*, risulta in media minore del 18% rispetto a quello impiegato nel *Base Scenario*.

Per quanto riguarda gli utenti che effettuano i loro spostamenti a piedi, il simulatore non permette di ottenere come output la distanza totale percorsa, ma, considerando una velocità media di spostamento pari a 1 m/s, essa può essere sostituita dalla durata della camminata stessa; in tal modo i due valori della distanza e della durata, a meno dell'unità

di misura, si vanno ad equivalere, al fine di poter ottenere un confronto tra valori medi e totali per la durata, che risulti uguale a quello dell'ipotetica distanza percorsa. Conviene inoltre precisare che nella simulazione, come già discusso nel paragrafo 4.1, che utilizza modelli di domanda basati sulle attività dei singoli utenti, gli stessi possono a loro volta utilizzare anche più di un mezzo di trasporto per effettuare un singolo viaggio; di conseguenza, dai dati ricavati sono stati estrapolati due gruppi di utenti, successivamente analizzati, ovvero coloro che si muovono esclusivamente a piedi e coloro che invece effettuano una parte del loro viaggio a piedi e poi utilizzano un altro mezzo di trasporto.

Iniziando dai primi, sia il tempo totale che medio di camminata subisce una diminuzione, relativamente del 27% e del 9%; questi risultati sono complici della nuova configurazione delle strade locali interne ai *superblocks*, le quali, analogamente a quanto detto per le biciclette, risultano essere un luogo più sicuro e attraente per lo spostamento a piedi, al fine di effettuare dei viaggi medio-brevi.

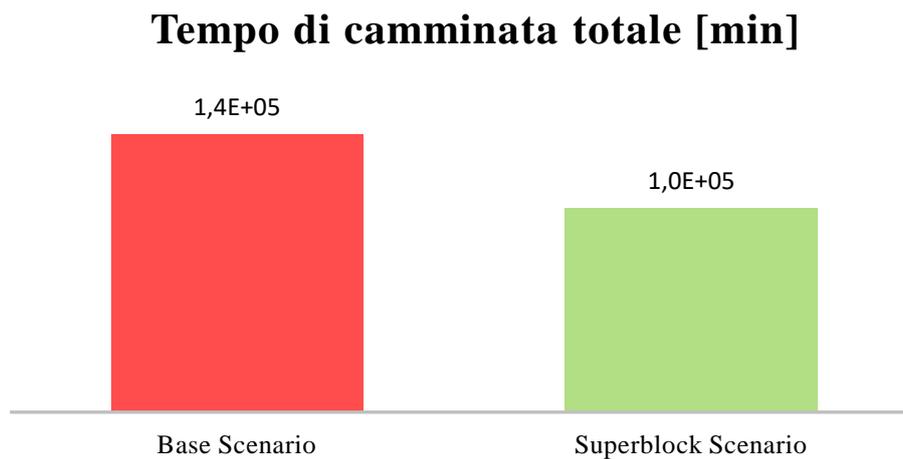


Figura 5.18: Confronto tra i tempi totali di camminata degli utenti che si muovono esclusivamente a piedi nei due scenari.

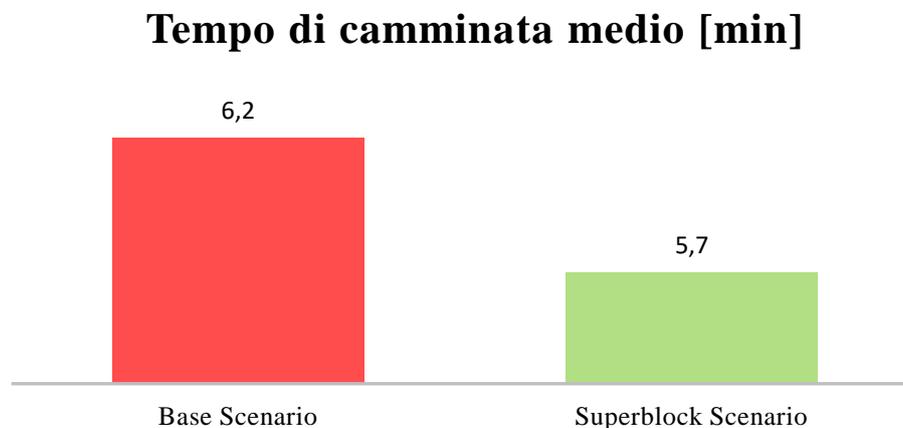


Figura 5.19: Confronto tra i tempi medi di camminata degli utenti che si muovono esclusivamente a piedi nei due scenari.

Analizzando invece le durate dei viaggi degli utenti che effettuano una parte del loro spostamento a piedi, per poi invece utilizzare un altro mezzo di trasporto, queste risultano essersi ridotte del 37% per quanto riguarda il totale del tempo di camminata effettuato, ma al contempo la loro media risulta invece essere aumentata del 15%. Questo risultato è riconducibile alla posizione dei nuovi parcheggi centralizzati introdotti nel *Superblock Scenario*, in quanto questi obbligano l'utente a dover svolgere un nuovo pezzo di strada a piedi per poter utilizzare la propria auto, mentre nel *Base Scenario*, per esempio l'utente può parcheggiare tranquillamente la propria automobile nel parcheggio in strada sotto casa; inoltre, un altro fattore che incide su questi numeri è quello relativo ai nuovi percorsi dei bus, in quanto alcune delle linee che prima circolavano all'interno delle aree poi adibite a *superblocks*, ora vedono la presenza di fermate più distanti rispetto alla configurazione precedente.

### Tempo di camminata totale [min]

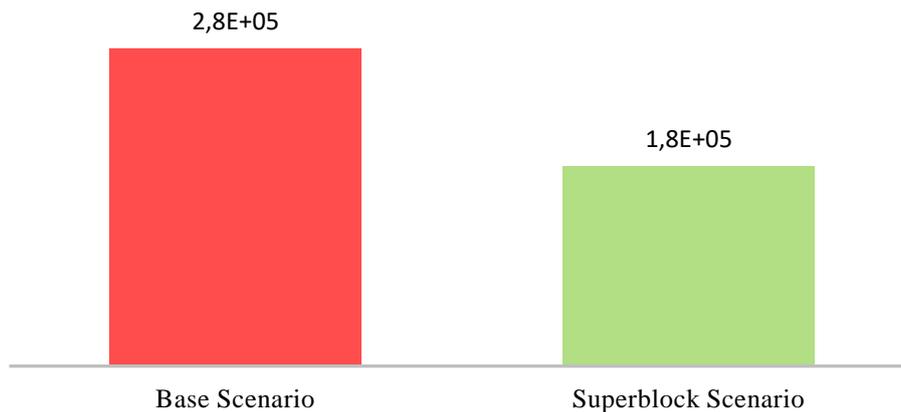


Figura 5.20: Confronto tra i tempi totali di camminata degli utenti che si muovono sia a piedi che con un altro mezzo nei due scenari.

### Tempo di camminata medio [min]

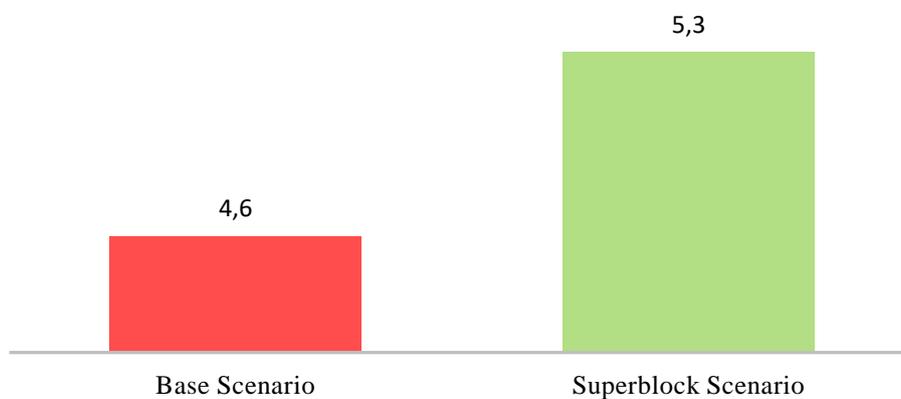


Figura 5.21 Confronto tra i tempi medi di camminata degli utenti che si muovono sia a piedi che con un altro mezzo nei due scenari.

## 5.5 Emissioni degli inquinanti

Come anticipato il simulatore permette di ottenere risultati relativi alle emissioni, sia assolute che specifiche, del rumore generato dai mezzi di trasporto e di alcuni inquinanti, ovvero CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e PM<sub>x</sub>; occorre inoltre precisare che la simulazione non utilizza modelli di distribuzione, ma solamente quelli di emissione, per cui i risultati ottenuti sono principalmente delle emissioni puntuali ottenute in relazione al flusso passante negli archi della rete.

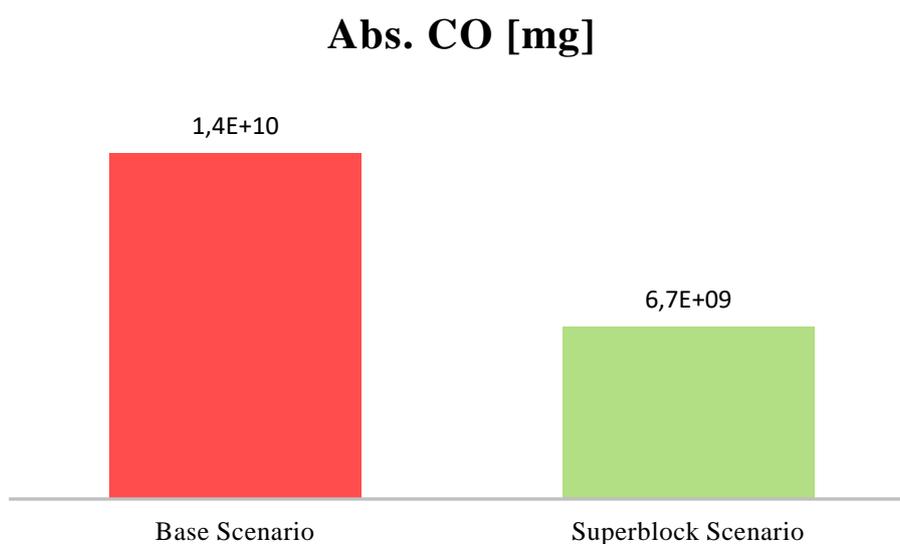


Figura 5.22: Confronto dell'emissione assoluta di CO nei due scenari.

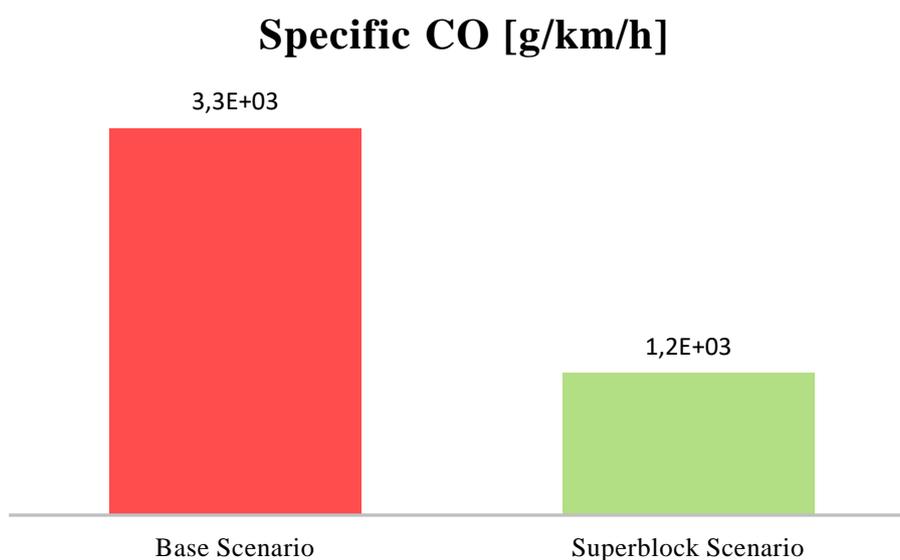


Figura 5.23: Confronto dell'emissione specifica di CO nei due scenari.

Le emissioni di CO, monossido di carbonio, si riducono di una quantità considerevole, sia in termini totali che medi, rispettivamente del 50% e del 60%.

Nelle seguenti figure tale riduzione risulta ancora più evidente effettuando un confronto grafico tra i due scenari.

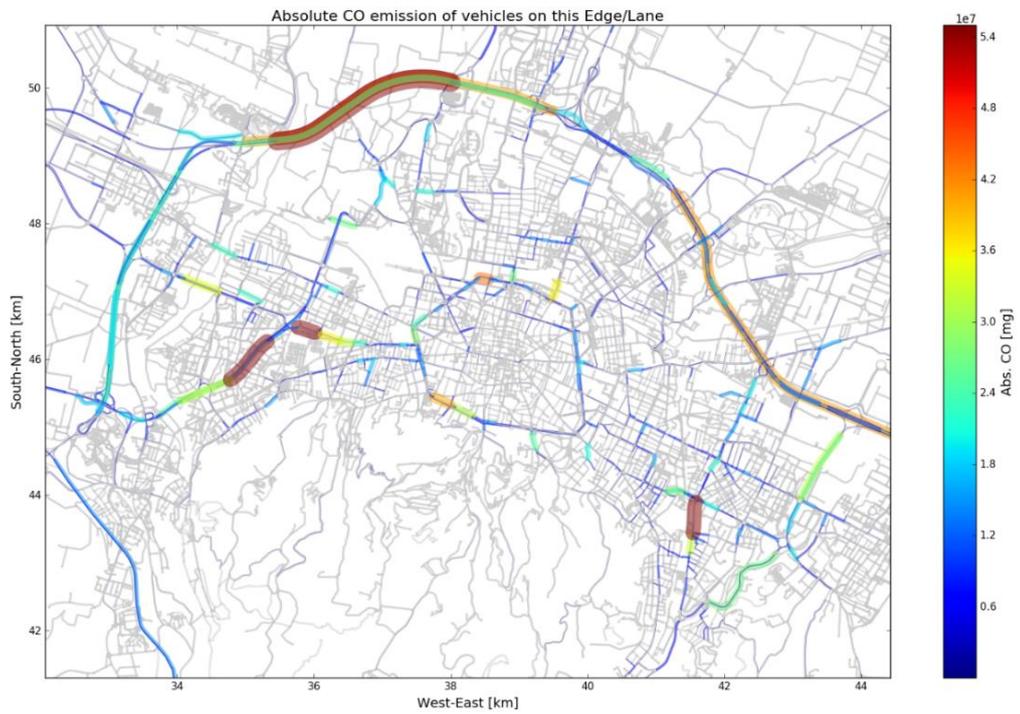


Figura 5.24: Emissione di CO sugli archi della rete nel Base Scenario.

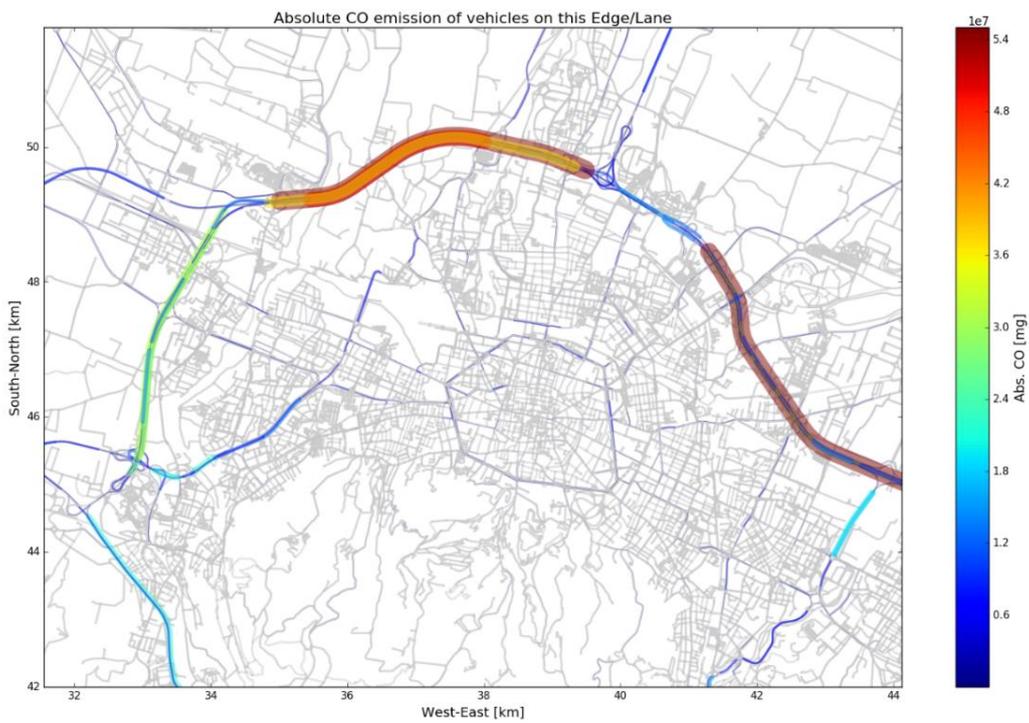


Figura 5.25: Emissione di CO sugli archi della rete nel Superblock Scenario..

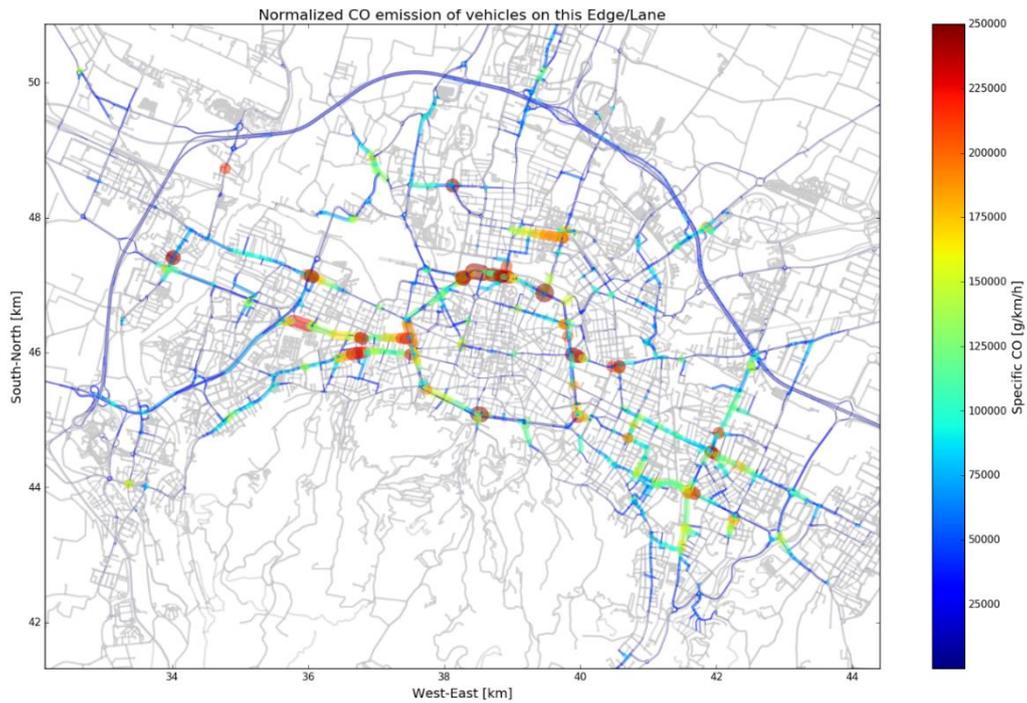


Figura 5.26: Emissione specifica di CO sugli archi della rete nel Base Scenario.

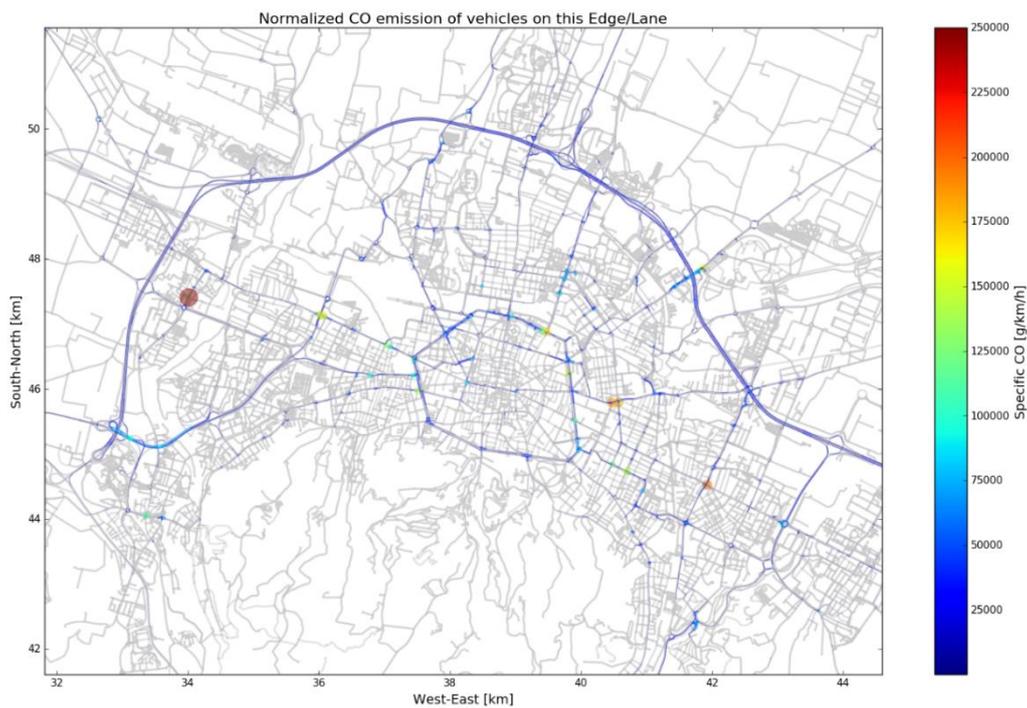


Figura 5.27: Emissione specifica di CO sugli archi della rete nel Superblock Scenario.

Come si può ben notare entrambe le tipologie di consumo diminuiscono fortemente nella parte più centrale della città e lungo le strade principali perimetrali dei *superblocks*.

Anche le emissioni di CO<sub>2</sub> presentano una grande diminuzione, in quanto nel *Superblock Scenario* calano del 40% in termini di emissione totale e del 54% nel caso specifico; questi risultati sono di buon auspicio nei confronti di una diminuzione dell'effetto isola di calore che i gas serra tendono a creare sulle aree interessate dalla loro emissione.

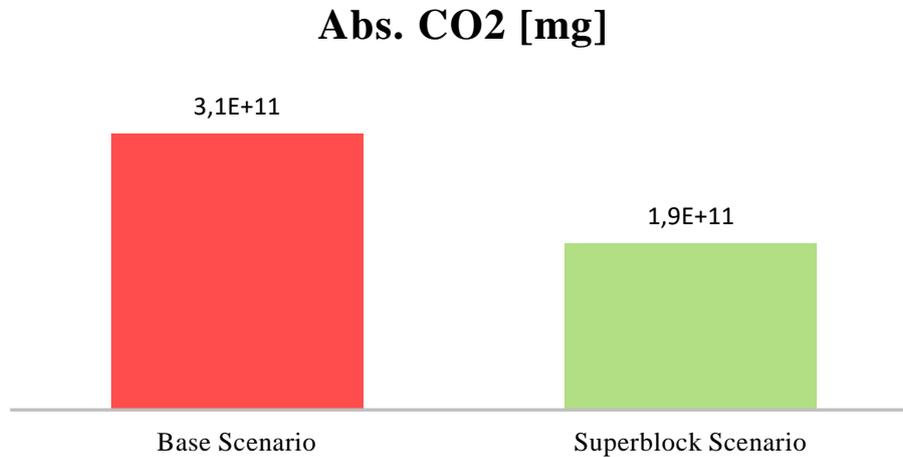


Figura 5.28: Confronto dell'emissione assoluta di CO<sub>2</sub> nei due scenari.

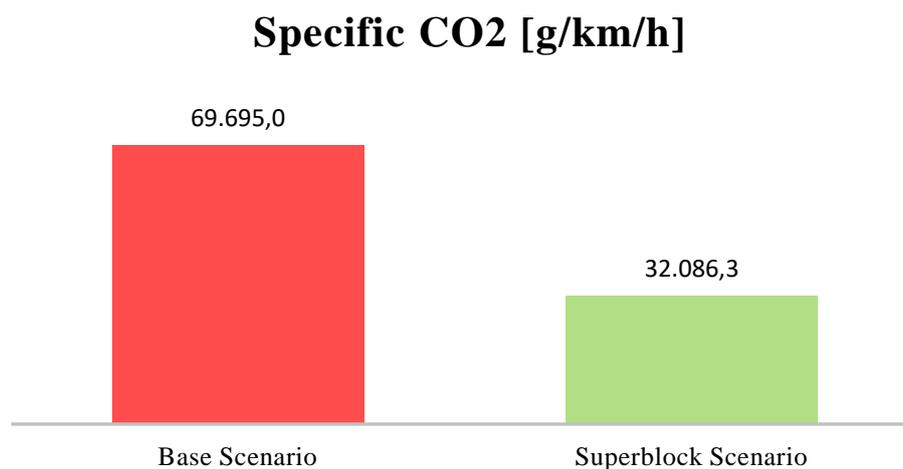


Figura 5.29: Confronto dell'emissione specifica di CO<sub>2</sub> nei due scenari.

Un caso contrario è invece quello relativo alle emissioni di NO<sub>x</sub>, le quali tendono ad aumentare, di un valore comunque contenuto, nel *Superblock Scenario* rispetto al *Base Scenario*; questo incremento di emissione del monossido di azoto può derivare dalla deviazione del traffico, il quale è costretto a muoversi su un numero minore di strade nel *Superblock Scenario*, e genera così delle concentrazioni puntuali maggiori. L'emissione di alcuni inquinanti deriva inoltre dalla costituzione del parco veicolare circolante nella rete, per cui se tale modello tende ad incrementarne l'emanazione, si potrebbe pensare all'unione di più soluzioni, come ad esempio la limitazione della circolazione per i mezzi più inquinanti o riproporre l'analisi in seguito a un rinnovamento del parco veicolare.

### Abs. NOx [mg]

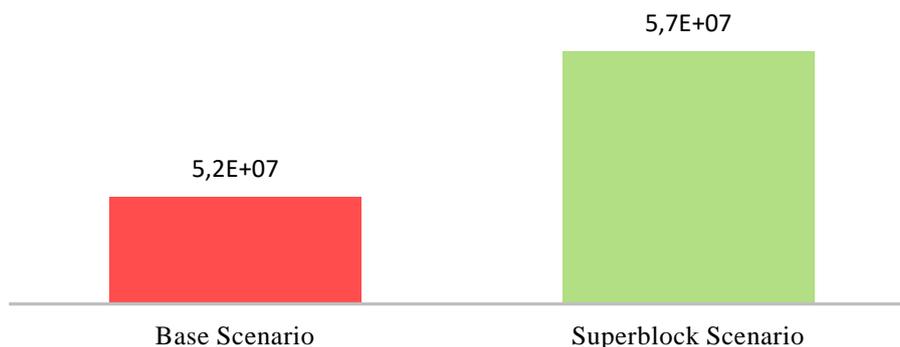


Figura 5.30: Confronto dell'emissione assoluta di NOx nei due scenari.

### Specific NOx [g/km/h]

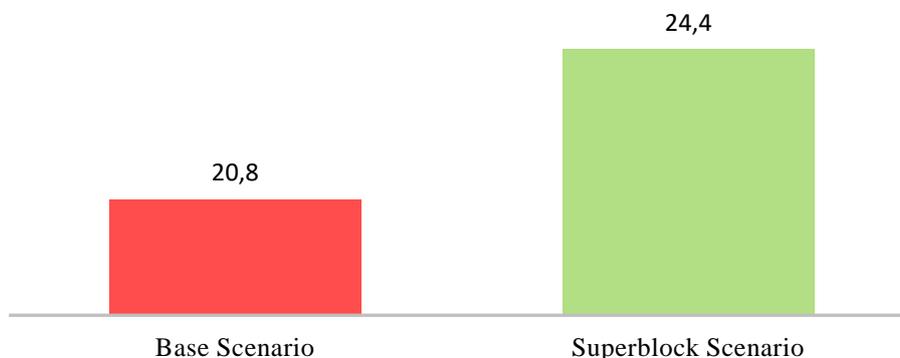


Figura 5.31: Confronto dell'emissione specifica di NOx nei due scenari.

L'incremento di emissione risulta come anticipato discreto, in quanto in termini assoluti aumenta solamente del 10% e nel dato di emissione specifica del 17%.

Passando invece all'analisi delle emissioni dei PMx, queste presentano un forte calo nel *Superblock Scenario*, pari alla metà in termini di emissione specifica e di un terzo invece nelle emissioni totali.

### Abs. PMx [mg]

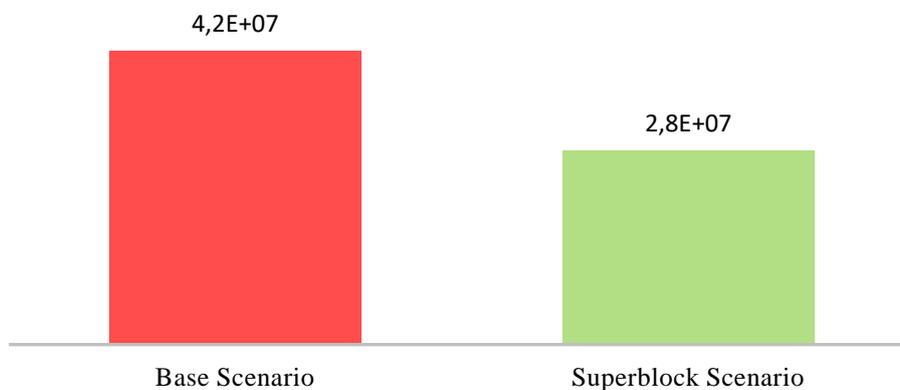


Figura 5.32: Confronto dell'emissione assoluta di PMx nei due scenari.

## Specific PMx [g/km/h]

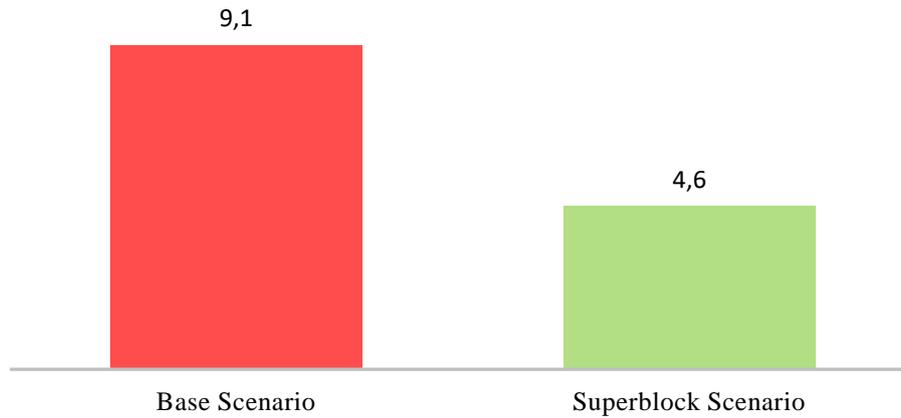


Figura 5.33: Confronto dell'emissione specifica di PMx nei due scenari.

Come di può ben notare dalle seguenti figure anche nel caso di questo inquinante la maggior riduzione delle emissioni si ha nella parte centrale della città; questo è dovuto a un maggior utilizzo della tangenziale, in quanto strada principale per alto scorrimento di traffico.

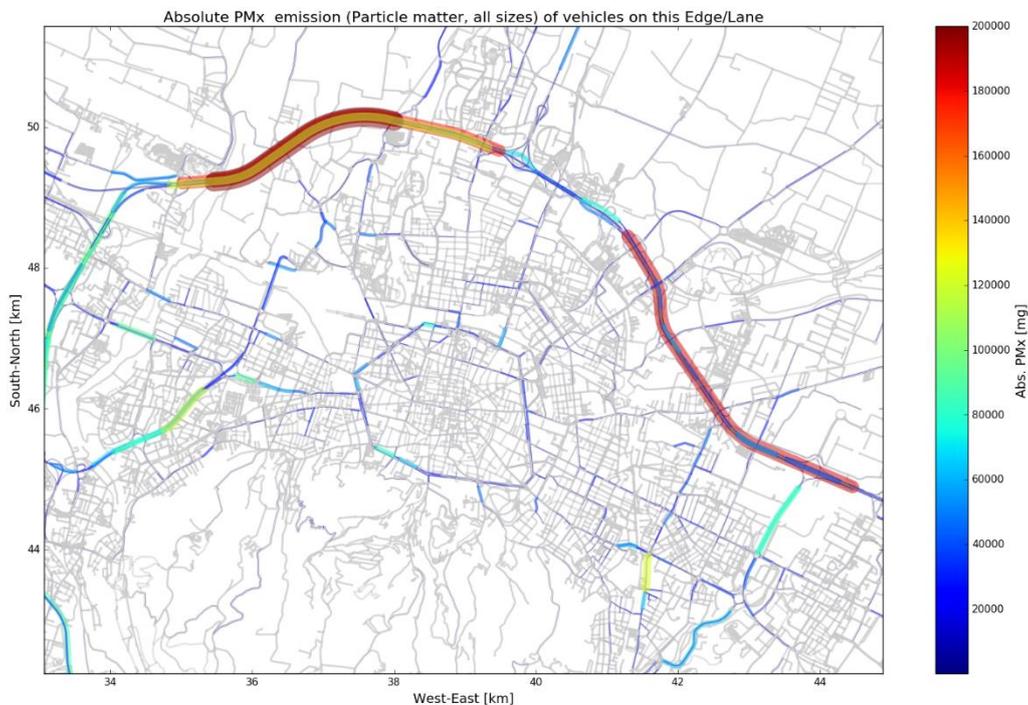


Figura 5.34: Emissione di PMx sugli archi della rete nel Base Scenario.

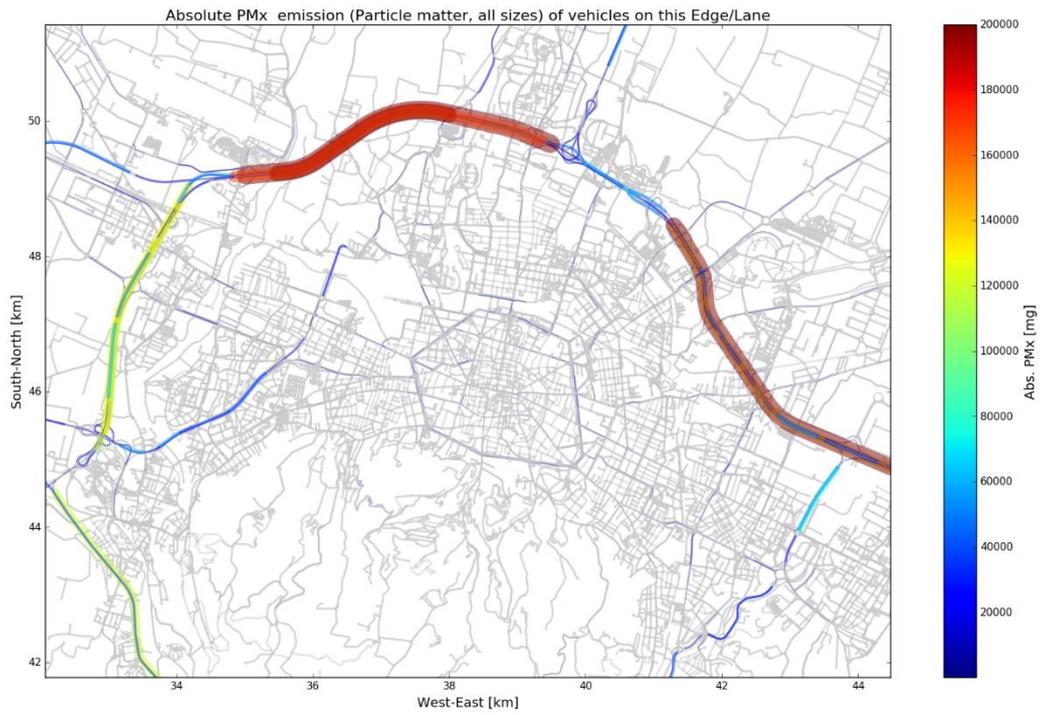


Figura 5.35: Emissione di PM<sub>x</sub> sugli archi della rete nel Superblock Scenario.

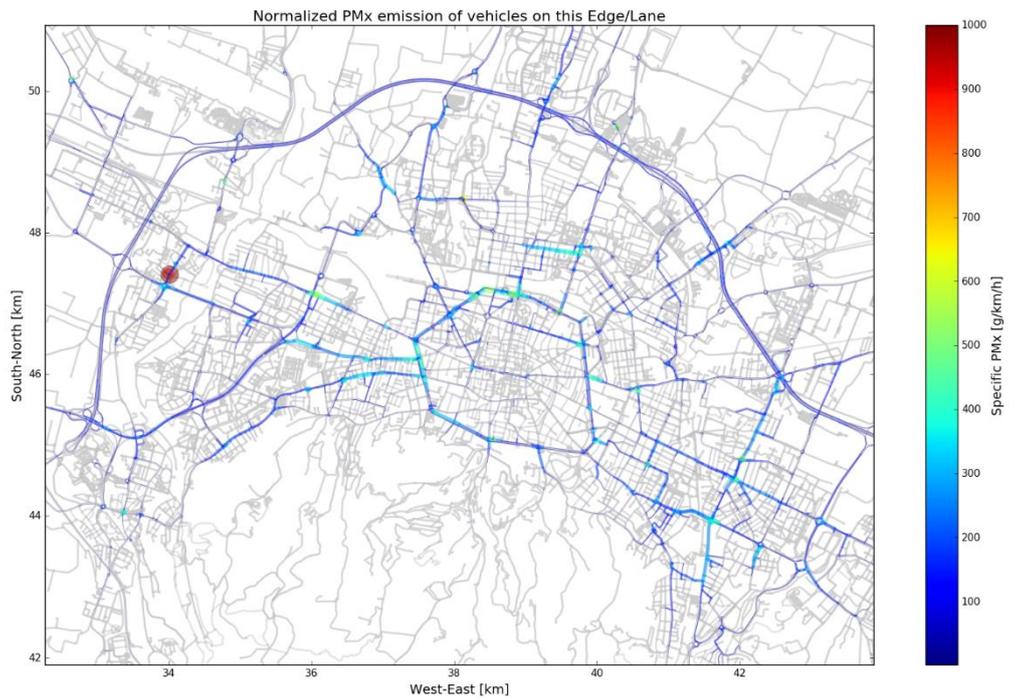


Figura 5.36: Emissione specifica di PM<sub>x</sub> sugli archi della rete nel Base Scenario.

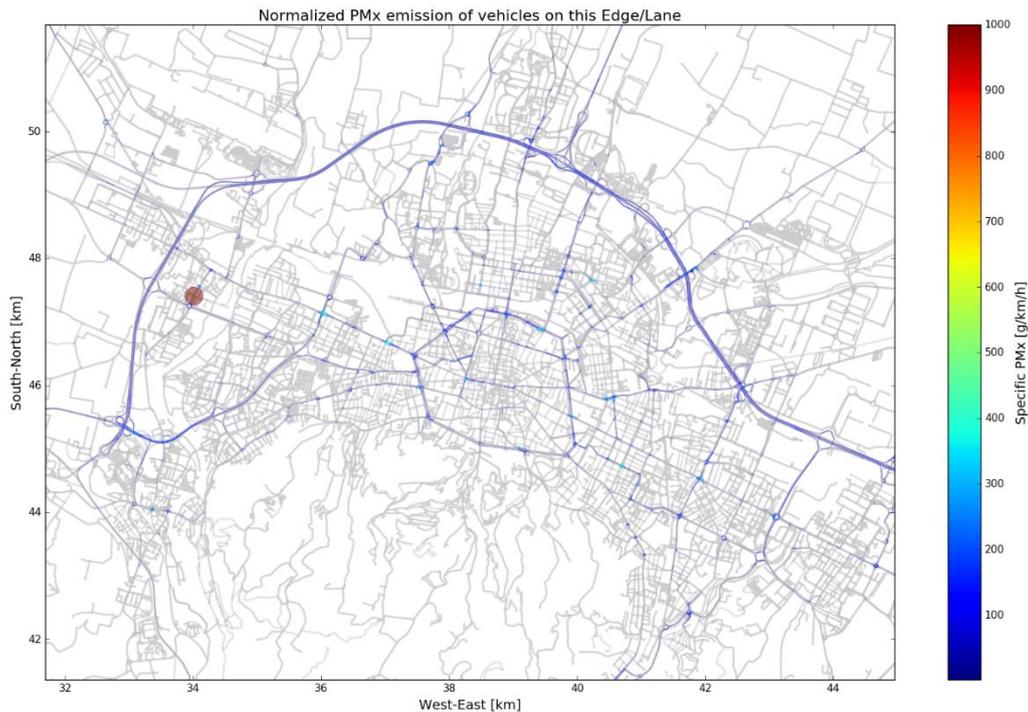


Figura 5.37: Emissione specifica di PMx sugli archi della rete nel Superblock Scenario.

Infine, si può effettuare un confronto per quanto riguarda l'inquinamento acustico, in quanto anch'esso può provocare danni alla salute e al benessere delle persone se troppo elevato. Dai risultati ottenuti si ha che il livello di rumore emesso dai mezzi di trasporto diminuisce del 9% nel *Superblock Scenario*, rispetto a quanto ricavato dal *Base Scenario*.

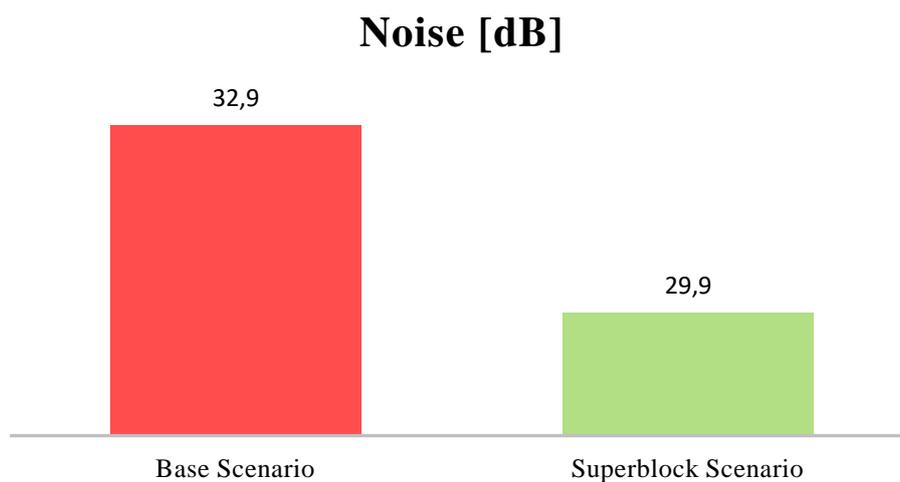


Figura 5.38: Confronto del livello medio di rumore nei due scenari.

La diminuzione del livello di rumore risulta in particolare più apprezzabile nelle aree interne ai *superblocks*, in quanto sono più lontane dalle strade principali e quindi dal flusso veicolare.

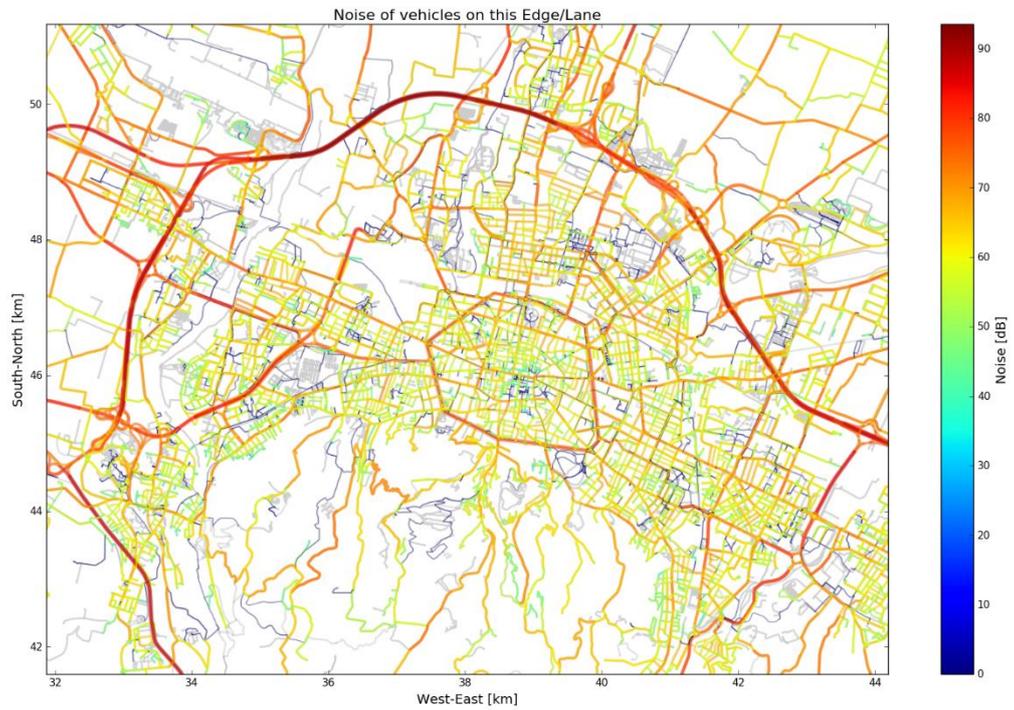


Figura 5.39: Rumore prodotto sugli archi della rete nel Base Scenario.

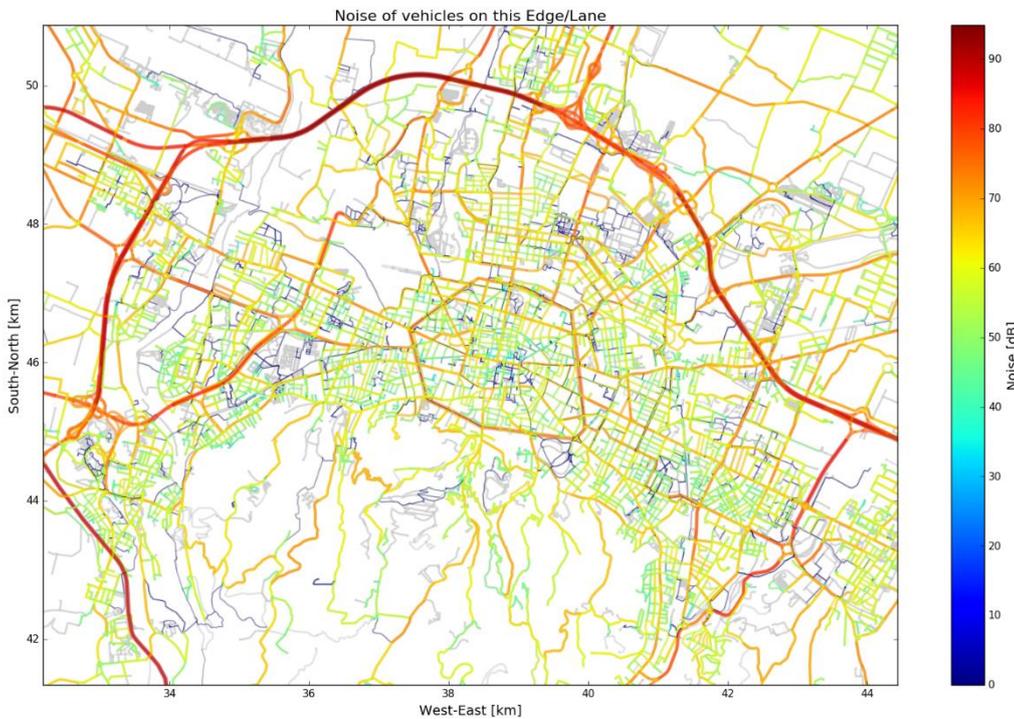


Figura 5.40 Rumore prodotto sugli archi della rete nel Superblock Scenario.

## 5.6 Confronto in dettaglio tra due *superblocks*

In questo paragrafo sono riportate delle figure più dettagliate che permettono un migliore confronto grafico per due particolari aree, adibite successivamente a *superblocks*, al fine di illustrare le differenze sugli archi al loro interno nei due scenari.

- Flusso di veicoli

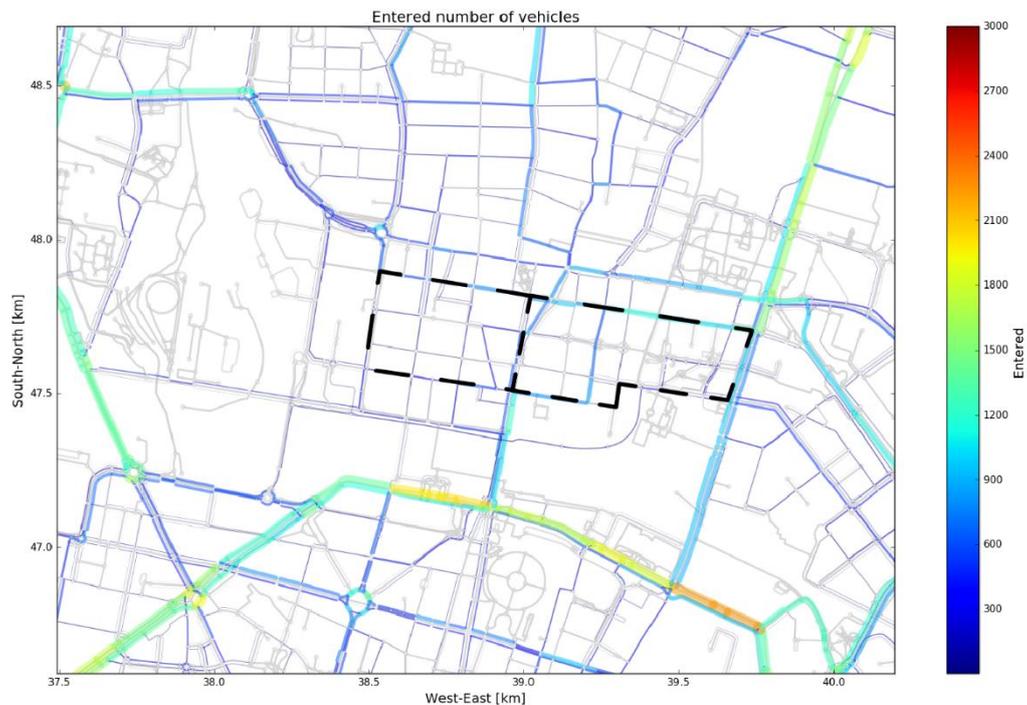


Figura 5.41: Flusso di veicoli sugli archi della rete in due aree di dettaglio nel Base Scenario.

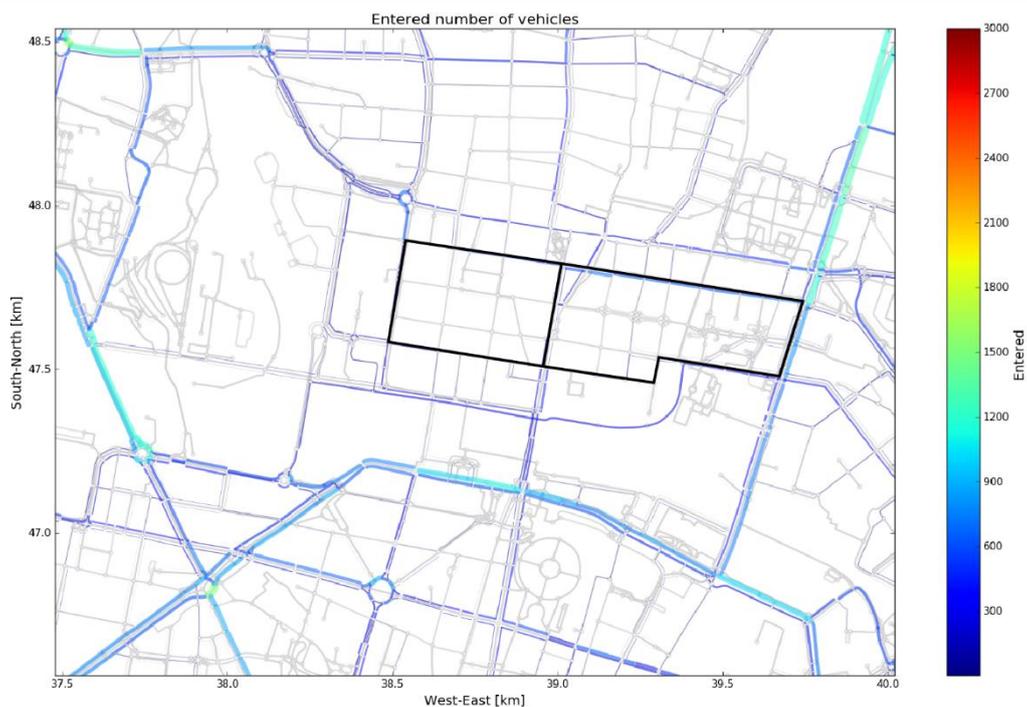


Figura 5.42: Flusso di veicoli sugli archi della rete in due aree di dettaglio nel Superblock Scenario.

- Densità di veicoli

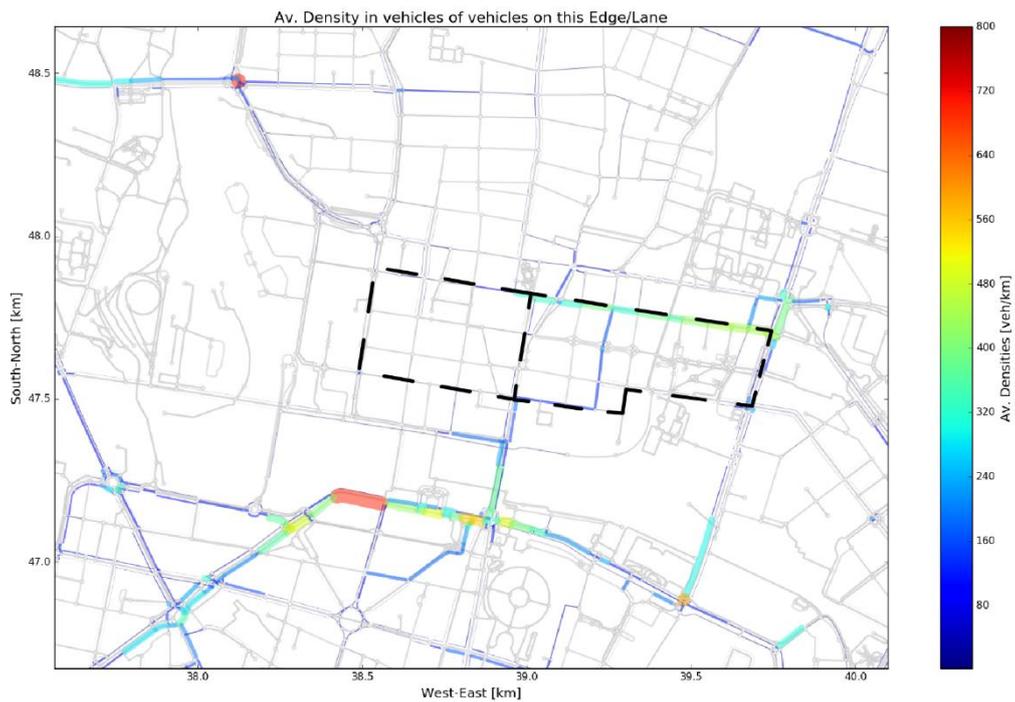


Figura 5.43: Densità di veicoli sugli archi della rete in due aree di dettaglio nel Base Scenario.

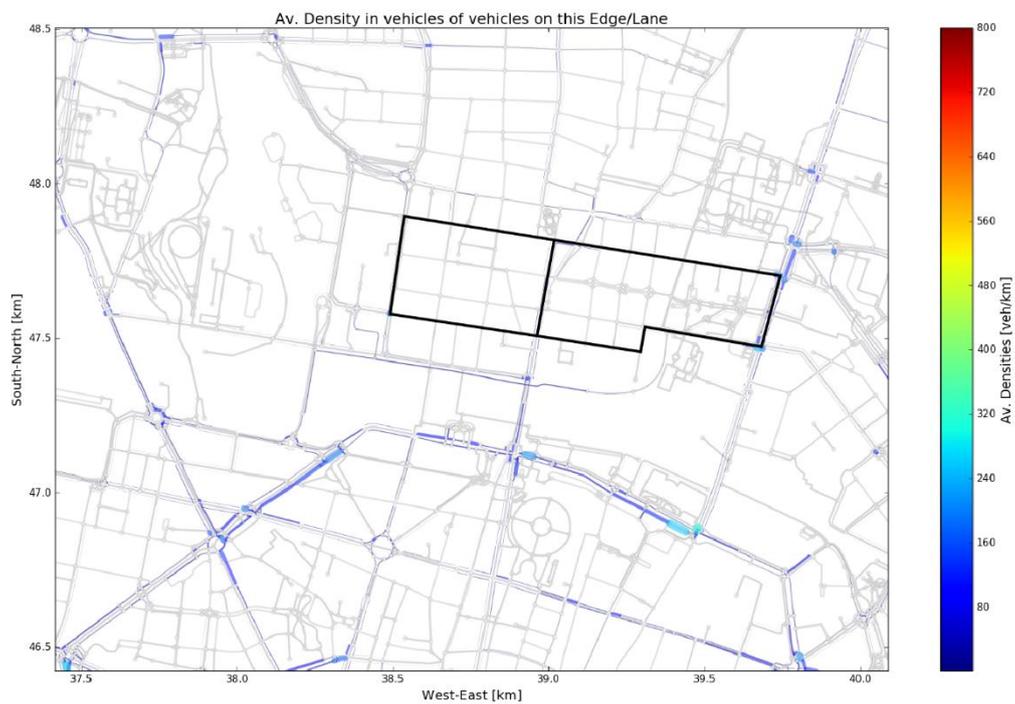


Figura 5.44: Densità di veicoli sugli archi della rete in due aree di dettaglio nel Superblock Scenario.

Dalle precedenti figure relative al flusso veicolare e la relativa densità, si può apprezzare come le strade interne alle aree successivamente adibite a superblocks, non vengano utilizzate nel Superblock Scenario, in contrario a quanto avviene nel Base Scenario.

- Emissione di PMx

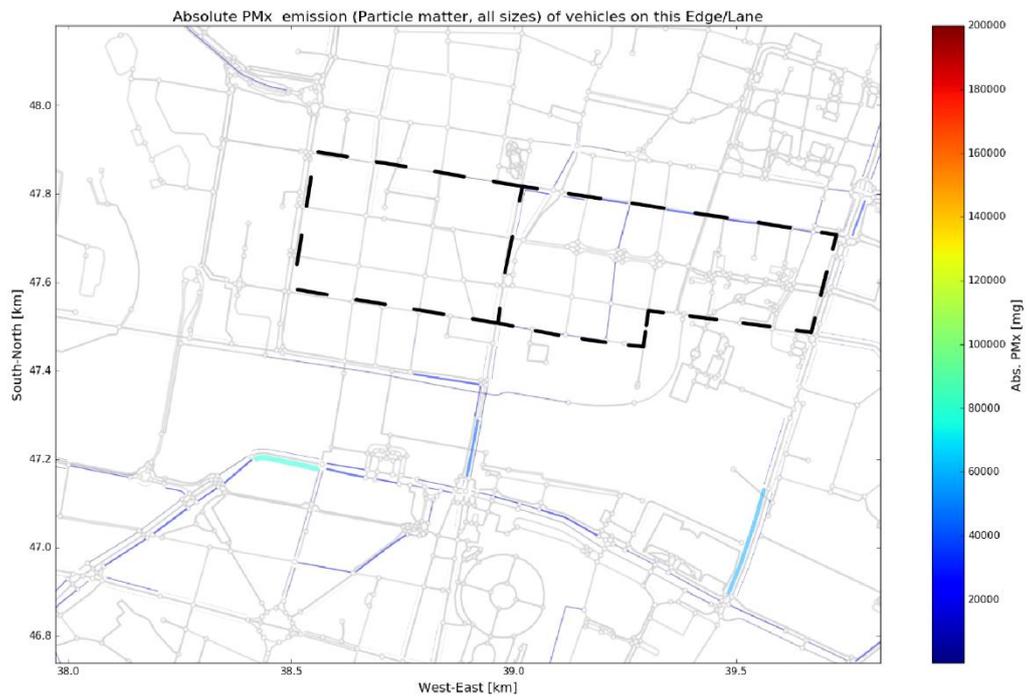


Figura 5.45: Emissione di PMx sugli archi della rete in due aree di dettaglio nel Base Scenario.

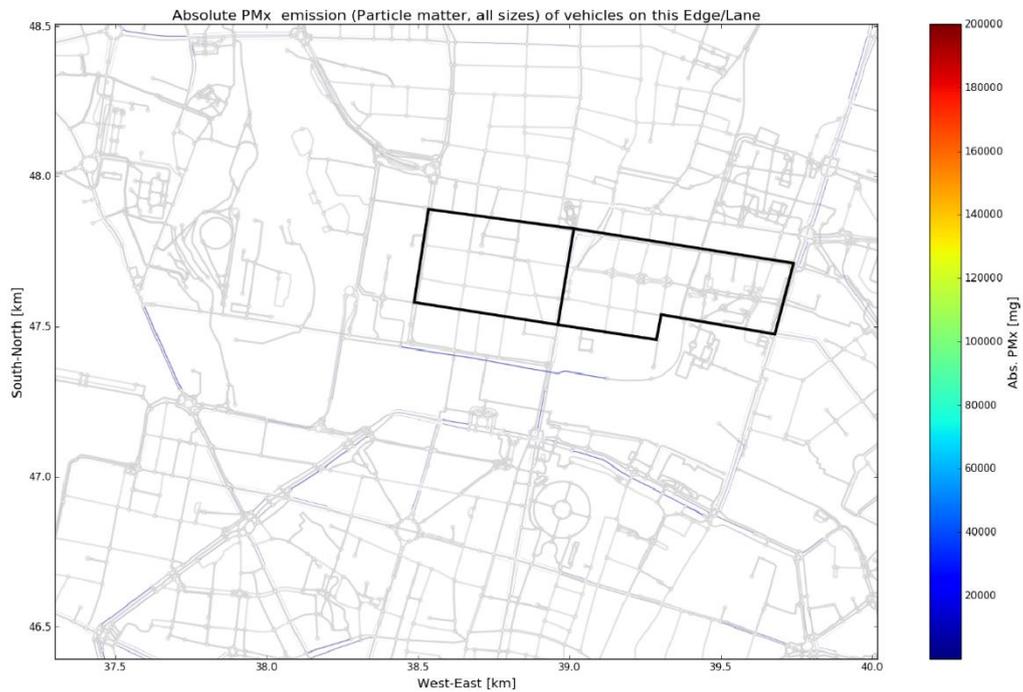


Figura 5.46: Emissione di PMx sugli archi della rete in due aree di dettaglio nel Superblock Scenario.

Per le emissioni di PMx si può notare come nel *Base Scenario* sia presente un arco con una discreta presenza di emanazione di polveri sottili, mentre nel *Superblock Scenario* risulta invece assente.

- Rumore prodotto

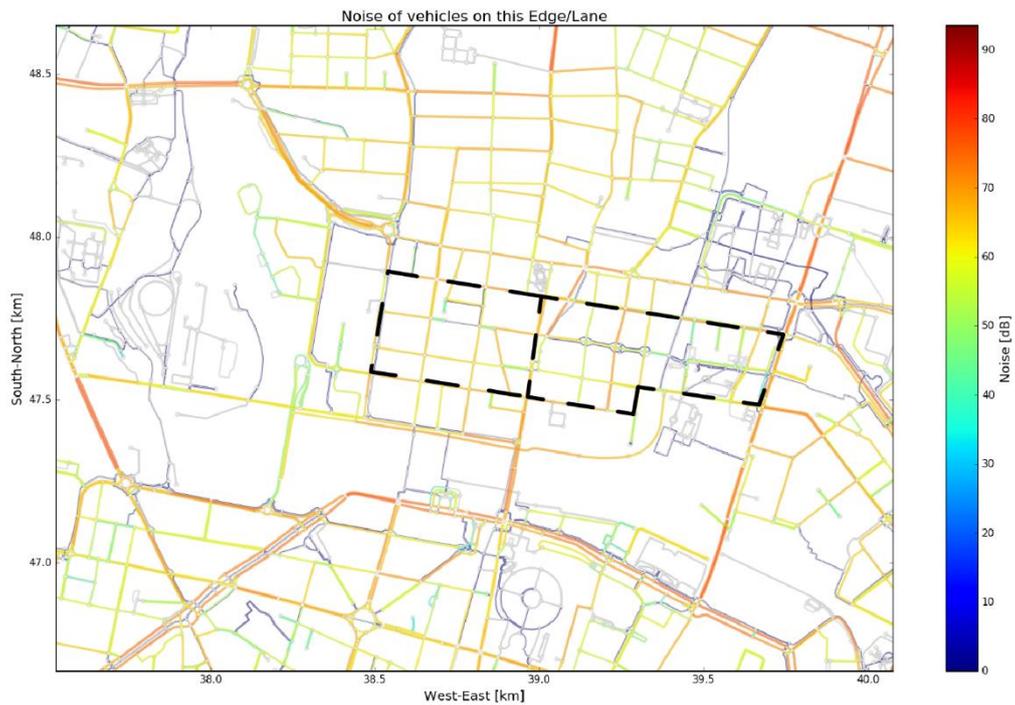


Figura 5.47: Rumore prodotto sugli archi della rete in due aree di dettaglio nel Base Scenario.

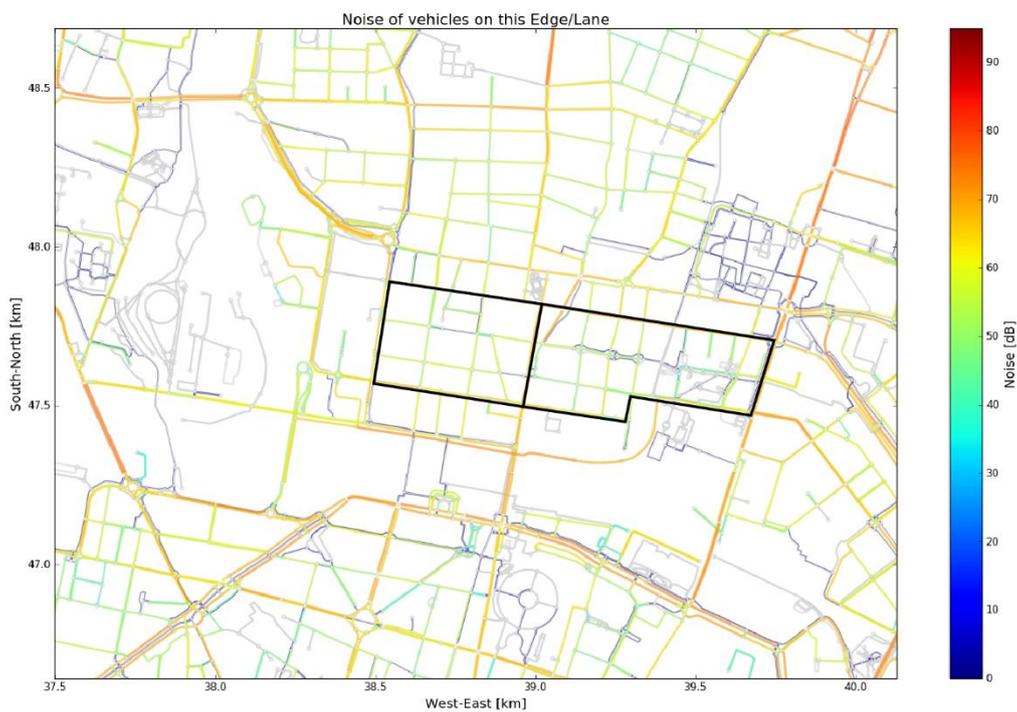


Figura 5.48: Rumore prodotto sugli archi della rete in due aree di dettaglio nel Superblock Scenario.

Infine, la riduzione del rumore risulta apprezzabile effettuando un confronto visivo tra i diversi colori utilizzati nella legenda per esprimerne il livello.

## CONCLUSIONI

Nel presente elaborato è stato illustrato ed analizzato il progetto sviluppato in merito all'applicazione del modello urbano dei *superblocks* alla città di Bologna, al fine di valutarne il relativo impatto in termini di variazione di utilizzo dei mezzi di trasporto privati e dell'inquinamento, sia atmosferico che acustico, ad essi correlato.

L'operazione iniziale di studio della letteratura in merito a tale modello è risultata essenziale per poter applicare al meglio il concetto dei *superblocks*, in quanto le modifiche apportate al contesto urbano nel relativo scenario simulato, come il divieto di circolazione all'interno dei *superblocks* per i mezzi a motore, la deviazione delle linee del trasporto pubblico locale e l'individuazione di nuove aree centralizzate per i parcheggi, hanno permesso di creare un modello digitale che ricalcasse al meglio le idee alla base di questo modello innovativo di pianificazione urbana.

Dato che attualmente l'ambiente e la qualità dell'aria della città di Bologna risentono fortemente dell'elevata densità di traffico presente, la notevole diminuzione dell'utilizzo dei principali mezzi di trasporto privati a motore, come l'automobile e la motocicletta, registrata dai risultati ottenuti in seguito all'inserimento dei *superblocks* nel contesto urbano, rappresenta già un notevole miglioramento di tale situazione, in virtù degli effetti sulle emissioni ad essa correlati.

Il confronto tra i risultati ottenuti dalle simulazioni dei due scenari ha evidenziato innanzitutto una diminuzione del flusso veicolare circolante nella rete stradale della città, dovuto principalmente alla nuova configurazione della rete stessa, portando con sé un netto calo di consumo di carburante; di conseguenza sono stati riscontrati molti aspetti positivi in termini di diminuzione degli inquinanti emessi dai mezzi di trasporto.

In relazione al fatto che la salute delle persone e la sostenibilità ambientale siano strettamente interconnessi tra loro, i risultati conseguiti riguardo ai nuovi livelli di inquinamento possono essere dichiarati più che soddisfacenti; infatti, si è registrato un netto calo delle emissioni di monossido di carbonio (CO), anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), polveri sottili (PM<sub>x</sub>) e di intensità del rumore, a discapito dell'unico dato negativo, rappresentato da un aumento molto discreto nel monossido di azoto (NO<sub>x</sub>).

Un altro importante risultato ottenuto è quello derivante dall'idea di favorire l'utilizzo delle strade da parte della bicicletta e a piedi, la quale infatti tende a far ridurre la distanza

dei percorsi da fare ed incentiva la mobilità attiva, portando con sé tutti i benefici che lo svolgimento dell'esercizio fisico rappresenta.

Una nota di merito deve essere effettuata per i taxi introdotti nello scenario contenente i *superblocks*, dove tale mezzo di trasporto risulta essere utilizzato dalla metà degli utenti; questo risultato ricalca la decisione di consentire a tali veicoli di poter circolare all'interno dei *superblocks*, dove invece gli altri mezzi a motore non possono entrare, in previsione dell'utilizzo di vetture condivise tra gli utenti e ad alimentazione elettrica.

Risulterà infine interessante confrontare i dati già conseguiti nei due scenari analizzati con quelli che verranno ricavati dal caso studio contenente anche il PRT, al fine di valutare l'interazione tra questo innovativo sistema di trasporto pubblico e il nuovo modello di pianificazione urbana rappresentato dai *superblocks*.

In conclusione, si può affermare che la pianificazione dei trasporti, unitamente allo sviluppo della tecnologia in tale ambito, può essere vista come il principale motore alla base della creazione di modelli digitali sempre più realistici, che permettono di valutare ed analizzare i diversi problemi derivanti dalle azioni antropiche e le relative conseguenze ambientali; infatti, nella pianificazione dei trasporti si è principalmente interessati alla previsione del comportamento del sistema trasportistico nel suo complesso, al fine di identificare il miglior scenario di trasporto futuro possibile. L'approccio maggiormente utilizzato include un'analisi di tutte le modalità di trasporto alternative presenti e le scelte in merito effettuate dagli utenti, prestando particolare attenzione ai modelli di domanda, come la generazione dei viaggi, la scelta del luogo delle attività e la scelta della modalità, insieme allo studio parallelo di eventuali modifiche da effettuare nel modello di offerta, come appunto è stato per l'inserimento dei *superblocks*.

## BIBLIOGRAFIA

- Agenzia Europea dell'Ambiente: <https://www.eea.europa.eu/en>
- Atlante statistico metropolitano:  
<http://inumeridibolognametropolitana.it/atlantemetropolitano/>
- ACI: <https://www.aci.it/laci/studi-e-ricerche/dati-e-statistiche.html>
- Cities Forum: <https://www.citiesforum.org/news/superblock-superilla-barcelona-a-city-redefined/>
- Consiglio comunale di Barcellona: <https://www.barcelona.cat/pla-superilla-barcelona/en/barcelona-superblock>
- Elisabetta Vitale Brovarone, Jacopo Scudellari, Luca Staricco: *Planning the transition to autonomous driving: A policy pathway towards urban liveability*. Cities, Volume 108, January 2021, 102996.
- Humanitas Salute: <https://www.humanitasalute.it/benessere/92877-i-benefici-della-camminata/>
- Humanitas Research Hospital: <https://www.humanitas.it/news/andare-in-bicicletta-ecco-perche-fa-bene/>
- I numeri di Bologna metropolitana: <http://inumeridibolognametropolitana.it/>
- Iván López, Jordi Ortega and Mercedes Pardo, *Mobility Infrastructures in Cities and Climate Change: An Analysis Through the Superblocks in Barcelona*. Atmosphere 2020, 11, 410.
- Joerg Schweizer, Cristian Poliziani, Federico Rupi, Davide Morgano and Mattia Magi, *Building a Large-Scale Micro-Simulation Transport Scenario Using Big Data*, ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2021, 10, 165.
- J. Schweizer, C. Poliziani: *Dispense del Laboratorio di Infrastrutture Viarie e Trasporti*. Università di Bologna, 2018.

- Mark J. Nieuwenhuijsen, *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, Volume 157, December 2021, 106850
- Natalie Mueller, David Rojas-Rueda , Haneen Khreis, Marta Cirach, David Andrés, Joan Ballester, Xavier Bartoll, Carolyn Daher, Anna Deluca, Cynthia Echave, Carles Milà, Sandra Márquez, Joan Palou, Katherine Pérez, Cathryn Tonne, Mark Stevenson, Salvador Rueda, Mark Nieuwenhuijsen, *Changing the urban design of cities for health: The superblock model*. Environment International, Volume 134, January 2020, 105132.
- PRT: <https://railsystem.net/personal-rapid-transit/>
- Sven Eggimann, *The potential of implementing superblocks for multifunctional street use in cities*. Nature Sustainability, VOL 5, May 2022, 406–414.
- Vox: <https://www.vox.com/energy-and-environment/2019/4/9/18300797/barcelona-spain-superblocks-urban-plan>
- Wikipedia: <https://it.wikipedia.org/wiki/Bologna>