

ALMA MATER STUDIORUM- UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

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

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

in

PIANIFICAZIONE DEI TRASPORTI

**STIMA DA TRACCE GPS DEI TEMPI D'ATTESA DEI
CICLISTI ALLE INTERSEZIONI NELL'AREA
URBANA DI BOLOGNA**

CANDIDATO

Helena Michela Larotonda

RELATORE

Chiar.mo Prof. Federico Rupi

CORRELATORI

Prof. Joerg Schweizer

Ing. Cristiani Poliziani

Anno Accademico 2017/18

Sessione III

SOMMARIO

INTRODUZIONE	4
CAPITOLO 1- UTILIZZO DELLA BICICLETTA NEL PANORAMA DI SCELTA MODALE E DI SCELTA DEL PERCORSO	8
1.1. LA MOBILITÀ SOSTENIBILE.....	8
1.1.1. Bologna e la mobilità ciclabile	13
1.1.2. Piano Urbano della Mobilità Sostenibile (PUMS).....	15
1.1.3. Piano della Mobilità Ciclistica (PMC).....	19
1.2. IL TRASPORTO INTERMODALE.....	21
CAPITOLO 2- TEMPI D’ATTESA ALLE INTERSEZIONI SEMAFORIZZATE	25
2.1. INFLUENZA DEI TEMPI D’ATTESA ALLE INTERSEZIONI NELLA MODALITÀ DI SCELTA DEL PERCORSO DEI CICLISTI	26
2.1.1. Primo studio sui tempi d’attesa medi alle intersezioni semaforizzate	28
2.1.2. Analisi del comportamento dei ciclisti in fase di attraversamento alle intersezioni semaforizzate.....	35
CAPITOLO 3- MAP-MATCHING PER L’IDENTIFICAZIONE DEGLI ITINERARI DEI CICLISTI	39
3.1. MODELLI DI MICROSIMULAZIONE DEL TRAFFICO.....	39
3.2. MAP-MATCHING: DATI DI GEOLOCALIZZAZIONE E MAPPE DIGITALI	43
3.2.1. Sistema GPS.....	46
3.2.2. Mappe digitali.....	49
3.2.3. Procedimento di map-matching.....	54
3.3. SUMO E LA SIMULAZIONE MICROSCOPICA.....	57
3.3.1. SUMOPy	58
3.3.2. Algoritmo di map-matching all’interno di SUMOPy.....	59
3.3.3. Itinerari di minimo costo.....	62
CAPITOLO 4- PARAMETRI DI INPUT IN SUMOPY PER LA RICOSTRUZIONE DEGLI ITINERARI PERCORSI DAGLI UTENTI	65
4.1. DESCRIZIONE DELLE ANALISI SVOLTE.....	65
4.2. DEFINIZIONE E IMPORTAZIONE DELLA RETE	69
4.2.1. Definizione del grafo della rete	69
4.2.2. Importazione del grafo della rete.....	70
4.2.3. Modifiche della rete in SUMOPY.....	71
4.3. DEFINIZIONE E IMPORTAZIONE DELLE TRACCE GPS.....	72
4.3.1. Definizione delle tracce GPS importate.....	73

4.3.2. Importazione delle tracce GPS all'interno di SUMOPy.....	75
4.3.3. Rappresentazione delle tracce GPS all'interno di SUMOPy.....	76
4.3.4. Selezione geometrica dei dati	80
CAPITOLO 5- RICOSTRUZIONE DEGLI ITINERARI PERCORSI DAGLI UTENTI E RISPETTIVI ITINERARI DI MINIMO COSTO.....	83
5.1. PARAMETRI DI MAP- MATCHING.....	84
5.2. ITINERARI DI MINIMO COSTO	86
5.2.1. Parametri di shortest path routing.....	86
5.2.2. Parametri di fastest path routing.....	87
5.3. OUTPUT DEL ROUTING	88
5.4. POST MATCHING FILTER.....	93
CAPITOLO 6- ANALISI DEGLI ITINERARI	96
6.1. PARAMETRI DI INPUT PER L'ANALISI	96
6.2. OUTPUT DELL'ANALISI.....	98
6.2.1. Visualizzazione numerica.....	98
6.2.2. Visualizzazione grafica	101
CAPITOLO 7- VALUTAZIONE DEI TEMPI D'ATTESA ALLE INTERSEZIONI SEMAFORIZZATE	107
7.1. DESCRIZIONE DELLE INTERSEZIONI OGGETTO DI STUDIO.....	108
7.1.1. Intersezione semaforizzata di Porta San Felice.....	108
7.1.2. Intersezione semaforizzata di Porta San Donato.....	109
7.2. ANALISI ESEGUITE ALLE INTERSEZIONI E RELATIVI RISULTATI.....	110
7.2.1. Risultati Porta San Felice	113
7.2.2. Risultati Porta San Donato.....	117
7.3. MODELLO MATEMATICO PER LA DETERMINAZIONE DEI TEMPI D'ATTESA ALLE INTERSEZIONI SEMAFORIZZATE.....	119
7.4. APPLICAZIONE DEL MODELLO ALLE INTERSEZIONI ANALIZZATE	121
CONCLUSIONI	124

INTRODUZIONE

Nell'ambito delle metodologie per la pianificazione dei sistemi di trasporto, i modelli di viaggio basati sull'analisi dei comportamenti degli individui sono ancora attualmente quelli che risultano i più adatti a rappresentare il fenomeno della mobilità ed i più efficaci per la previsione della domanda e la valutazione degli interventi. In particolare, l'analisi degli attributi ed in generale degli aspetti che influenzano e governano il comportamento degli individui nella scelta del percorso, è cruciale per la quantificazione dei flussi di traffico sull'offerta di trasporto disponibile (archi stradali) e di conseguenza per il dimensionamento delle reti di trasporto e per incentivare politiche di trasporto alternative.

L'introduzione di nuove tecnologie di informazione e comunicazione che ha caratterizzato gli ultimi dieci anni, ha fornito un contributo eccezionale al miglioramento della qualità dei dati di attività e viaggio, e in particolare dei percorsi seguiti. Se infatti, tradizionalmente, l'acquisizione di dati spaziali di viaggio accurati è stata sempre estremamente difficile, l'introduzione del Global Positioning System (GPS) nel campo della ricerca sui trasporti, ha consentito l'ottenimento di dati di localizzazione precisi, il tracciamento anche degli spostamenti di breve distanza, e la rilevazione precisa del percorso scelto.

La disponibilità di dati di questo tipo ha consentito non solo l'approfondimento di tematiche classiche delle discipline dei trasporti (i.e. scelta del percorso), ma anche l'apertura ad ambiti diventati di interesse rilevante solo recentemente. In particolare, i dati GPS sono diventati fondamentali per analizzare gli spostamenti effettuati con mezzi diversi dall'auto (a piedi, in bici etc.), per condurre indagini per periodi più lunghi di un giorno, nell'analisi delle emissioni ed infine per valutare l'efficacia di politiche mirate a promuovere la sostenibilità dei trasporti per esempio in termini di riduzione dei chilometri percorsi prima e dopo un determinato intervento.

Un'altra componente importante, che fornisce un grande contributo per la ricostruzione degli itinerari seguiti dagli utenti della rete, è la mappa georeferenziata digitale in quanto le informazioni satellitari devono trovare corrispondenza su un reticolo stradale cartografico esistente: gli errori dovuti a mancanza di informazioni, al processo di digitalizzazione o agli errori di scala possono compromettere la corretta attribuzione del percorso stradale compiuto, alla reale rete stradale.

Il processo di map-matching consiste nell'integrare le due tipologie di dati: quelli di localizzazione e le mappe digitali per poter ricostruire gli itinerari percorsi dagli utenti.

Attraverso l'impiego di modelli di micro - simulazione del traffico che si basano proprio sulla definizione di una rete di trasporto e di una domanda di trasporto è possibile analizzare il comportamento degli utenti, le scelte di percorso, le loro velocità, i tempi d'attesa alle intersezioni etc.

L'obiettivo di questo studio è ottenere un modello per la stima dei tempi medi d'attesa dei ciclisti alle intersezioni semaforizzate; per fare questo inizialmente sono stati analizzati i tempi medi d'attesa dei ciclisti alle intersezioni semaforizzate attraverso l'ausilio di un software di micro - simulazione, SUMO: importando una mappa digitale dell'Area Urbana di Bologna e i dati dell'European Cycling Challenge dell'edizione del 2016, attraverso il procedimento di map-matching è stato possibile ricostruire gli itinerari percorsi dagli utenti e gli itinerari di minimo costo; con la successiva analisi delle velocità, è stato poi possibile determinare i tempi medi d'attesa alle intersezioni semaforizzate sull'intera Area Urbana di Bologna.

Successivamente sono stati confrontati questi valori con i valori dei tempi d'attesa rilevati e forniti dal Dipartimento di Trasporti dell'Università di Bologna.

Infine, il modello implementato dall'ing. Schweizer, per la stima del tempo medio d'attesa all'intersezione, è stato calibrato a partire dalle intersezioni oggetto di studio.

Il lavoro è strutturato come segue: nel capitolo iniziale viene trattato il tema della mobilità sostenibile al fine di promuovere l'uso della bicicletta come alternativa ai

veicoli a motore. In particolare, sono illustrate le varie iniziative organizzate a Bologna per invogliare gli utenti a utilizzare mezzi di trasporto sostenibile.

Vengono descritte le varie iniziative e obiettivi del PUMS (Piano Urbano della Mobilità sostenibile) e del PMC (Piano della Mobilità Ciclistica) al fine di aumentare il numero di utenti che quotidianamente usano la bicicletta per gli spostamenti sistematici.

Infine, viene trattato il tema del *trasporto intermodale* e in particolare l'intermodalità bici- trasporto pubblico.

Successivamente vengono esposti degli studi condotti in Canada sulla valutazione dei tempi d'attesa alle intersezioni semaforizzate e in Cina sul comportamento dei ciclisti in fase di attraversamento alle intersezioni semaforizzate. In particolare, lo studio condotto a Montreal (Canada) rappresenta il primo studio che utilizza i dati di localizzazione GPS per la valutazione dei tempi d'attesa alle intersezioni.

In seguito vengono descritti i modelli di micro - simulazione del traffico e spiegata la loro importanza per l'analisi dei tempi d'attesa degli utenti alle intersezioni.

Vengono descritti i dati di input di un modello di micro- simulazione che permettono di ottenere i percorsi seguiti dagli utenti, attraverso il procedimento di map- matching.

Viene fatta una descrizione del software utilizzato in quest'analisi, SUMO (Simulation Of Urban Mobility) e dell'algoritmo di map-matching implementato all'interno del software per la ricostruzione degli itinerari percorsi dagli utenti e gli itinerari di minimo costo.

Dopodiché vengono descritti i dati di input necessari per l'analisi dei tempi d'attesa all'intersezione: il grafo della rete e le tracce GPS riferite all'European Cycling Challenge.

Successivamente vengono descritti tutti gli attributi relativi al procedimento di map- matching: sono definiti tutti i parametri di input per il map- matching, per il shortest path routing e per il fastest path routing. Sono mostrati i risultati di output

del routing e descritti i parametri necessari per fare un'ulteriore selezione dei trips ottenuti in seguito al procedimento di map- matching.

In seguito vengono descritte le analisi svolte e i risultati ottenuti in seguito all'analisi degli itinerari: in particolare, sono mostrati i risultati riferiti agli archi e ai nodi della rete che permettono di ottenere informazioni in merito ai tempi d'attesa medi alle intersezioni.

Infine vengono mostrati i risultati ottenuti analizzando due intersezioni semaforizzate nell'Area Urbana di Bologna: Porta San Donato e Porta San Felice e la calibrazione del modello.

Sono state analizzate tutte le tracce dell'Europea Cycling Challenge che attraversano gli incroci e valutati i tempi d'attesa alle intersezioni degli utenti, tramite i profili di velocità; sono stati confrontati questi valori con quelli forniti dal DICAM- Trasporti e grazie ad un modello matematico implementato dall'Ing. Schweizer è stata ottenuta una relazione generale che permette di valutare i tempi medi d'attesa alle intersezioni semaforizzate per i ciclisti a partire dal solo ciclo semaforico e tempo di rosso.

CAPITOLO 1- UTILIZZO DELLA BICICLETTA NEL PANORAMA DI SCELTA MODALE E DI SCELTA DEL PERCORSO

1.1. LA MOBILITÀ SOSTENIBILE

Al fine di conservare e valorizzare il patrimonio naturale è importante promuovere lo sviluppo sostenibile, ricercando un equilibrio tra la salvaguardia dell'ambiente e le esigenze di benessere e di equità sociale. Nell'ambito dello sviluppo dei sistemi urbani, sempre più ardua diventa la gestione degli spostamenti che vengono compiuti, anche per brevi percorsi, con mezzi privati.

È importante educare la popolazione ad un sistema di intermodalità, per favorire in ambito urbano l'utilizzo del trasporto pubblico (per ridurre l'uso di mezzi privati motorizzati) e dei mezzi sostenibili dal punto di vista ambientale e tra questi c'è sicuramente la bicicletta.

In ambito legislativo importanti sono stati i decreti del Ministero dell'Ambiente per la promozione della mobilità sostenibile nelle aree urbane e la normativa riguardante l'incentivazione della mobilità ciclistica ma ulteriori passi dovranno essere compiuti in questa direzione.

L'articolo 5 della legge 28 dicembre 2015, n. 221 ha destinato, nel limite di 35 milioni di euro, la quota di risorse di competenza del Ministero dell'ambiente, per la realizzazione di *un programma sperimentale nazionale di mobilità sostenibile casa-scuola e casa-lavoro*.

In attuazione a tale disposizione è stato emanato il *decreto ministeriale n.208 del 20 luglio 2016* con cui è stato approvato il *programma sperimentale nazionale di mobilità sostenibile casa-scuola e casa-lavoro* che prevede degli interventi per incentivare il bike sharing e il car sharing, il bike e car pooling, programmi di educazione alla sicurezza stradale e di riduzione del traffico, dell'inquinamento e della sosta degli autoveicoli in prossimità di istituti scolastici e delle sedi di lavoro. Ai sensi dell'art. 1 del decreto citato, il Programma è finalizzato ad

incentivare scelte di mobilità urbana alternative all'automobile privata, al fine di ridurre le emissioni climalteranti a supporto di altri strumenti per il risanamento e la tutela della qualità dell'aria e la riduzione degli inquinanti atmosferici.

L'articolo 5 ha previsto altresì l'assegnazione, alla regione Emilia-Romagna, di un contributo di 5 milioni di euro per l'anno 2016 per il recupero e la riqualificazione ad uso ciclo-pedonale del tracciato dismesso dell'asse ferroviario Bologna-Verona. Viene inoltre considerato sempre indennizzabile l'infortunio in itinere qualora si sia verificato a seguito dell'utilizzo della bicicletta nel percorso casa-lavoro, nonché prevista l'emanazione di apposite linee guida per favorire l'istituzione nelle scuole della figura del *mobility manager*, il quale ha l'incarico di ottimizzare gli spostamenti sistematici dei dipendenti/studenti.

Il *decreto ministeriale del 4 agosto 2017* ha l'obiettivo di favorire l'applicazione omogenea e coordinata di linee guida per la redazione di Piani Urbani di Mobilità Sostenibile, PUMS su tutto il territorio nazionale, ai sensi dell'articolo 3, comma 7, del decreto legislativo 16 dicembre 2016, n.257.

Nella XVII legislatura sono state adottate varie disposizioni in materia di mobilità sostenibile (tra le quali l'articolo 5 della L. 221/2015, nonché le misure previste nelle tre leggi di bilancio 2016, 2017 e 2018). Una specifica attenzione è stata destinata alla mobilità ciclistica, anche attraverso la destinazione di risorse al sistema nazionale delle ciclovie turistiche e, da ultimo, con l'approvazione della legge n. 2/2018, recante disposizioni per la promozione dell'uso della bicicletta come mezzo di trasporto

L'uso di mezzi motorizzati in città è sicuramente meno efficiente di altri modi di trasporto e la bicicletta è uno dei mezzi più vantaggiosi per le brevi distanze; basti pensare allo spazio urbano che occupa un autobus, alle risorse che consuma e di cui riduce il valore (e questo riguarda anche il patrimonio storico, architettonico, monumentale della città), al peso economico degli ingorghi, alla gravità dei rischi che concorrono a sfavore della nostra salute: per quanto riguarda l'aspetto delle emissioni, si consideri che circa il 23% delle emissioni inquinanti per gas serra sono imputabili al settore dei trasporti e di esse il 70% al trasporto su strada; l'Organizzazione Mondiale della Sanità stima inoltre che l'inquinamento da

traffico sia responsabile di un numero di decessi sei volte maggiore di quelli causati dagli incidenti stradali. Tali esternalità vanno ad incidere sui costi del danno ambientale che gravano sulla popolazione che spesso ignora queste ricadute.

La bicicletta è senz'altro un mezzo che si presta bene all'intermodalità, per i nuclei urbani. Nelle condizioni attuali, è pur vero che si pensa ad esso come un mezzo poco sicuro- pericoloso per l'impatto con il traffico e per l'esposizione ai gas nocivi- ma è altrettanto vero che le esperienze di alcune città italiane e di molte città europee dimostrano che si possono superare tali ostacoli grazie a politiche miste, attraverso la moderazione del traffico, la realizzazione di infrastrutture per i ciclisti e curando la pianificazione dei trasporti al fine di stabilizzare, o perfino ridurre, l'uso individuale dell'automobile. Tutto questo senza deprimere la crescita economica. Occorre creare le condizioni affinché - con uno sforzo di cambiamento nelle abitudini, da parte dei cittadini- un uso più sicuro della bicicletta renda evidenti i benefici per la salute e per la qualità della vita.

La promozione dell'uso della bicicletta come alternativa ai veicoli a motore infatti rappresenta uno dei più significativi impegni per uno sviluppo sostenibile, concorrendo alla riduzione di emissione di gas inquinanti nell'atmosfera e al decongestionamento del traffico urbano. In generale è possibile definire sostenibile qualsiasi forma di sviluppo che risponde alle esigenze del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare le proprie necessità (*Rapporto Brundtland, 1987*). Applicando questo concetto al settore dei trasporti è possibile affermare che un sistema di trasporto è sostenibile se permette ai singoli individui e alle aziende di soddisfare le proprie necessità fondamentali di movimento, di accesso alle attività in completa sicurezza e con modalità compatibili con la salute della popolazione e dell'ambiente e tali da garantire equità tra le differenti generazioni.

Anche se la bici rappresenta ancora una modalità di viaggio minoritaria, l'utilizzo della bici in zone urbane è aumentato notevolmente negli ultimi dieci anni, nella maggior parte dei paesi sviluppati (*Chaurand e Delhomme, 2013*).

Nell'Ottobre del 2014, la DG MOVE (Directorate- General for Mobility and Transport) ha commissionato un sondaggio per raccogliere informazione in merito ai mezzi di trasporto più frequentemente utilizzati giornalmente dai cittadini europei e i risultati delle indagini di Eurobarometro, presentati nelle tabella seguenti, mostrano che l'auto risulta essere il mezzo maggiormente utilizzato con una percentuale del 54% rispetto ad una percentuale di utilizzo della bici dell'8%.

	Car	Urban public transport (bus, metro, tram, ferry, etc.)	Walking	Bicycle	Motorbike or moped	Train
EU28	54%	19%	14%	8%	2%	2%
Gender						
Man	59%	15%	11%	8%	4%	2%
Woman	49%	22%	17%	8%	1%	2%
Age						
15-24	29%	35%	15%	11%	5%	4%
25-39	62%	16%	9%	7%	2%	3%
40-54	65%	14%	9%	7%	2%	2%
55 +	51%	17%	20%	8%	1%	1%
Education (End of)						
15-	45%	18%	26%	7%	2%	1%
16-19	61%	16%	12%	7%	2%	2%
20+	62%	16%	9%	8%	2%	3%
Still studying	22%	39%	15%	13%	6%	5%
Socio-professional category						
Self-employed	76%	8%	6%	6%	3%	2%
Managers	68%	14%	5%	8%	2%	3%
Other white collars	66%	16%	5%	6%	2%	4%
Manual workers	62%	15%	10%	8%	3%	2%
House persons	48%	18%	25%	6%	1%	1%
Unemployed	43%	23%	20%	9%	3%	2%
Retired	47%	18%	23%	8%	1%	1%
Students	22%	39%	15%	13%	6%	5%

Figura 1-Analisi socio-demografica

	Bicycle	Motorbike or moped	Train
EU28	8%	2%	2%
BE	13%	1%	4%
BG	4%	0%	1%
CZ	8%	0%	2%
DK	23%	2%	5%
DE	12%	1%	1%
EE	5%	0%	2%
IE	2%	0%	1%
EL	2%	9%	1%
ES	3%	3%	1%
FR	4%	3%	2%
HR	6%	1%	0%
IT	6%	7%	2%
CY	1%	1%	0%
LV	6%	1%	2%
LT	7%	0%	0%
LU	2%	0%	4%
HU	22%	2%	2%
MT	0%	1%	0%
NL	36%	3%	4%
AT	6%	2%	3%
PL	7%	0%	1%
PT	1%	2%	2%
RO	7%	1%	1%
SI	9%	1%	1%
SK	7%	0%	3%
FI	14%	0%	2%
SE	17%	0%	3%
UK	3%	1%	4%

Figura 2- Confronto fra le percentuali di utilizzo di Bici, mezzi motorizzati a due ruote e treno

Per incoraggiare la riduzione dell'uso di mezzi motorizzati è fondamentale creare una rete di collegamenti ciclabili continua, sicura e ben riconoscibile, nonché integrata con altre forme di mobilità.

La congestione e le esternalità negative legate al trasporto privato su gomma sono ormai note; promuovere la mobilità ciclistica, soprattutto nelle grandi città, porterebbe ad una riduzione dell'impatto ambientale del traffico, sia atmosferico che acustico, un incremento di forme di mobilità eco-sostenibili e l'aumento della sicurezza stradale, un miglioramento dell'efficienza della viabilità e del trasporto pubblico, vista la riduzione dei mezzi privati circolanti, e maggior tutela degli utenti della strada più esposti ai rischi del traffico, come ciclisti e pedoni.

Per i piccoli spostamenti, la bicicletta risulta essere il mezzo più efficiente sia in termini di velocità nel raggiungere la destinazione, sia perché non è vincolata a problemi di parcheggio o di passaggio in aree chiuse al traffico; inoltre, è sicuramente il mezzo in assoluto più economico ed ecologico.

Investire sulla mobilità ciclabile significa quindi promuovere un sistema di viabilità capace di ridurre pesantemente l'impatto del traffico motorizzato e di incrementare notevolmente la sicurezza stradale; ciò nonostante è comunque un mezzo rischioso. Sul fronte della sicurezza va rilevato che, a Bologna, negli ultimi 10 anni è aumentato il numero di incidenti che hanno coinvolto bici, +40% circa (475 incidenti con coinvolgimento di bici e 425 feriti nel 2011). Tale dato è in parte ascrivibile all'aumento dell'uso della bici ed in parte al fatto che gli interventi per migliorare la sicurezza stradale si sono concentrati soprattutto sulle autovetture.

Contrariamente a quanto taluni si attardano a pensare, non vi è conflitto di interessi tra automobilisti e ciclisti: dare strada alla bici, nella situazione attuale delle nostre città, altro non rappresenta che un opportuno contributo ad un uso più razionale dei mezzi di trasporto. Non vi è dubbio infatti che, sulle brevi distanze, la bicicletta costituisce il mezzo di trasporto più confacente e conveniente. Se si pensa che il 40% degli spostamenti in ambito urbano sono al di sotto dei 4 o 5 chilometri, si capisce quale possa essere il campo di espansione dell'uso della

bicicletta. Campo ulteriormente dilatabile se si opera per favorire l'integrazione della bicicletta con i mezzi pubblici di trasporto.

Per il sostegno della mobilità ciclistica urbana occorrono interventi sia dal lato dell'offerta, sia dal lato della domanda. C'è bisogno di politiche del trasporto, sviluppo e uso del territorio che riducano il rischio di incidenti e, allo stesso tempo, aumentino la mobilità ciclistica.

1.1.1 Bologna e la mobilità ciclabile

Nonostante i numerosi vantaggi offerti dall'uso della bicicletta, in ambito urbano, in Italia, le iniziative a favore della mobilità ciclabile risultano ancora insufficienti.

Per quanto riguarda l'Emilia Romagna, i rilievi mostrano che attualmente in Provincia esistono 680 Km di percorsi ciclabili (di cui 535 in provincia e 145 nel Comune di Bologna) ed inoltre, ne sono stati pianificati oltre 1500km.

La regione Emilia Romagna risulta essere una delle poche regioni italiane a partecipare ad iniziative, anche europee, come l'European Cycling Challenge, proprio per incentivare gli utenti all'uso della bici.

A Bologna, in particolare, sono numerose le iniziative a cui la città partecipa proprio per incrementare il numero di utenti che utilizzano la bici negli spostamenti giornalieri: dal 2013, la città di Bologna partecipa all'European Cycling Challenge, una gara ciclistica in cui diverse città europee si sfidano a vicenda nel percorrere il maggior numero di km per i viaggi urbani.

Dalla classifica delle diverse edizioni (fino al 2017) risulta evidente come, nelle città italiane, la mobilità ciclabile sia meno sviluppata rispetto ad altri paesi europei quali, ad esempio, Olanda e Danimarca.

In particolare, Copenhagen ha una lunga storia quanto a città delle biciclette e queste negli anni '50 hanno dominato l'immagine rappresentativa della città. Sino alla metà degli anni '70 ci fu un aumento del numero dei ciclisti urbani: specialmente nella zona del centro dove lo spazio era limitato e costose le tariffe

per i parcheggi, le biciclette erano diventate molto popolari. Attualmente, nella capitale danese, l'utilizzo della bicicletta come mezzo di trasporto è molto frequente: il 30% della popolazione ne fa uso come mezzo di trasporto per recarsi a lavoro e le strade più importanti sono dotate di piste per i ciclisti. Per quanto riguarda l'Olanda invece, con quasi 16 milioni di abitanti ha circa 17 milioni di biciclette. La maggior parte delle biciclette vengono usate regolarmente da giovani e anziani, ricchi e poveri.

Un'ulteriore iniziativa del comune di Bologna è *Bella Mossa*, un'iniziativa atta a invogliare gli utenti a utilizzare mezzi di trasporto sostenibile. A ogni spostamento effettuato a piedi, in bici, in autobus o in treno, o con il car sharing si possono guadagnare *Punti Mobilità*, e avere accesso a sconti e buoni spesa messi a disposizione dai partner aderenti all'iniziativa. Per partecipare è necessario scaricare l'app *Better Points* e registrare gli spostamenti sostenibili.

Mobike invece, è una piattaforma di bike-sharing più grande e tecnologicamente più avanzata al mondo, che da giugno 2018 è sbarcata anche a Bologna.



Figura 3-MoBike-Servizio di bike-sharing a Bologna

La durata del servizio in città sarà di sei anni con un totale di circa 2200 Mobike e 300 e-bike disponibili h24 con oltre 200 postazioni di parcheggi assegnati. In tutta l'area del centro e nelle zone limitrofe sono state predisposte una serie di spazi riservati alla sosta, i *Mobike Hub*.

È possibile parcheggiare anche esternamente ai Mobike Hub ma gli utenti che parcheggiano le bici negli appositi spazi vengono premiati con degli sconti.

Il limite di questo servizio è che l'utilizzo delle Mobike è consentito solo all'interno dell'Area Urbana di Bologna.

Nella figura che segue è rappresentata l'area operativa del servizio.

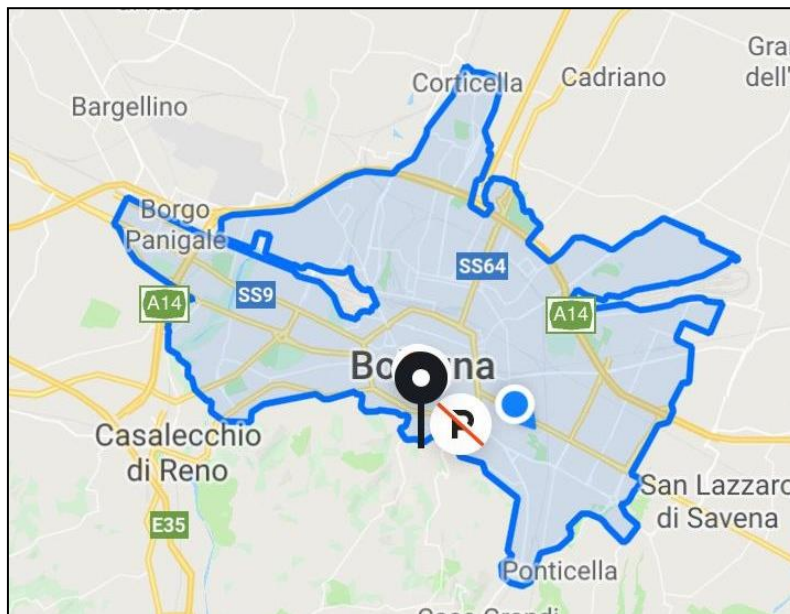


Figura 4-Area Operativa Mobike

1.1.2 Piano Urbano della Mobilità Sostenibile (PUMS)

Il *Piano Urbano della Mobilità Sostenibile (PUMS)* è un piano strategico che orienta la mobilità in senso sostenibile con un orizzonte temporale medio lungo, ma con verifiche e monitoraggi ad intervalli di tempo predefiniti, che sviluppa una visione di sistema della mobilità e si correla e coordina con i piani settoriali ed urbanistici a scala comunale.

Il PUMS della Città metropolitana di Bologna ha come ambito territoriale di riferimento l'intero territorio metropolitano e si occupa delle relazioni tra i Comuni, analizzando con particolare attenzione gli spostamenti da e verso il capoluogo in considerazione del suo elevato potere attrattivo.

Per la mobilità ciclistica il PUMS punta sulla definizione di una rete ciclabile di progetto integrata ed estesa a tutto il territorio metropolitano. Per quanto riguarda Bologna, il documento che il PUMS si propone di prendere come riferimento è il Biciplan di Bologna, sia come schema per la rete dell'ambito comunale, sia per la pianificazione delle connessioni ciclistiche proposte dal Biciplan metropolitano tra l'ambito urbano del capoluogo ed i comuni di prima cintura.

Nonostante il Biciplan non sia ancora stato reso pubblico, il PUMS fornisce alcune informazioni sugli interventi proposti nel piano.

Il quadro prefigura gli interventi prioritari per migliorare ed estendere infrastrutture e servizi per la mobilità ciclistica, realizzando efficienti opportunità di integrazione con le altre modalità di trasporto, aumentando l'offerta di parcheggi bici in prossimità delle stazioni e fermate dei mezzi di trasporto collettivi (ferrovia e futuro tram).

Inoltre, fermo restando che per incrementare gli spostamenti in bicicletta occorrono una serie di realizzazioni infrastrutturali e di servizi al ciclista, il PUMS si preoccupa anche di indicare gli strumenti necessari allo sviluppo di una nuova cultura ed educazione alla mobilità sostenibile ciclistica, l'adozione di politiche mirate alla mobilità dei ciclisti, attraverso azioni di Mobility Management e di messa in campo degli incentivi previsti per legge (bonus mobilità).

I criteri ispiratori adottati dal PUMS per la definizione della rete ciclistica portante metropolitana per la mobilità quotidiana e adottati dal Biciplan di Bologna sono:

- *l'attrattività*, intesa come completezza e rilevanza delle polarità servite, con particolare riferimento agli spostamenti sistematici quotidiani casa-lavoro-scuola e alla valorizzazione del sistema delle qualità;

- *la continuità*, da intendere come elemento che condiziona la scelta progettuale non tanto del tracciato, quanto della soluzione tecnica da adottare per garantire sempre omogenee condizioni di sicurezza e comfort su tutto l'itinerario;
- *la riconoscibilità e leggibilità* non solo da parte dei ciclisti che possono facilmente muoversi in sicurezza ma anche dei conducenti dei veicoli a motore, che devono adeguare il loro comportamento di guida con particolare attenzione ai ciclisti;
- *la brevità*, intesa come razionalità ed efficienza dei tracciati, che devono evitare per quanto possibile l'utilizzo di percorsi indiretti e tortuosi solo perché di più facile realizzazione.

La creazione della rete si fonda sulle seguenti linee di intervento:

- *interventi infrastrutturali*, più consistenti e articolati da realizzare, solo se strettamente necessari, là dove sia opportuno diminuire il rischio percepito dal ciclista o si debbano collegare tratti esistenti;
- *ridisegno dello spazio della strada* lungo i principali assi dei centri abitati, creando corridoi ciclistici e attrezzandoli prevalentemente con la segnaletica e ogni strumento necessario a migliorare le indicazioni per percorrerli in sicurezza;
- *azioni per la promozione della ciclabilità diffusa* per la convivenza tra ciclisti ed autovetture (zone 30, ZTLetc.). Il modello di riferimento è costituito dalla preferenziazione dei percorsi e degli spazi ciclabili che si contrappone a quello della separazione.

L'orientamento del PUMS è quello di agevolare quanto più è possibile le componenti di mobilità più sostenibili (pedonale, ciclistica, TPL), favorendo la condivisione dello spazio e, ove ciò non è possibile, riequilibrando le porzioni di sezione stradale dedicate a tutte le componenti, anche attraverso misure di riduzione dell'offerta di sosta su strada e dello spazio carrabile.

La rete per la mobilità quotidiana è costituita da percorsi mirati ad offrire una concreta opportunità ciclistica per la mobilità pendolare o comunque ordinaria (casa-lavoro, casa-scuola, pratiche e servizi).

La rete mira a coprire gli assi principali dei comuni maggiori e le principali direttrici di collegamento intercomunale, in continuità rispetto al Piano della Mobilità Ciclistica - PMC.

A differenza di questo, tuttavia, al fine di proiettare la bicicletta in una nuova dimensione della mobilità efficacemente competitiva e alternativa all'auto, non limita il raggio di azione delle due ruote a 4-5 Km, misura che aveva come effetto la creazione di molti percorsi radiali rispetto ai centri abitati, che non sempre risultavano tra loro connessi.

La rete per la Mobilità Quotidiana del PUMS supera quindi tale limite e mira a costruire una vera e propria rete ciclabile sulle principali direttrici di collegamento intercomunali. Il superamento del limite di 4- 5 Km è anche legato all'affermarsi dello sviluppo dell'e-bike, mezzo realmente competitivo all'auto anche su percorsi più lunghi non pianeggianti, favorendo, tra l'altro, i ciclisti meno esperti o anziani.



Figura 5-II Bicipan metropolitano- la rete ciclabile strategica e integrativa

1.1.3 Piano della Mobilità Ciclistica (PMC)

Il *Piano della Mobilità Ciclistica (PMC)*, che si configura come una vera e propria variante al PTCP (Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale) sul sistema della mobilità ciclistica, aggiorna e sviluppa quanto già contenuto negli indirizzi del PTCP, che riconosce tra le principali politiche da perseguire per migliorare e rendere sostenibile il sistema della mobilità provinciale, le azioni per favorire la mobilità non motorizzata ed in particolar modo la mobilità ciclistica.

Per rispondere ad una sempre più crescente domanda di mobilità ciclistica, e per poter contribuire a far sì che tale domanda aumenti ancora, la Provincia di Bologna si dota quindi di un “*Piano della Mobilità Ciclistica Provinciale*” con il quale definire un disegno che indirizzi e supporti nel futuro lo sviluppo dell’uso della bicicletta e della sua cultura nel territorio bolognese, cogliendo le potenzialità già presenti e mirando a svilupparlo in modo integrato ed efficiente.

Il primo passo verso la costruzione del PMC è stato la ricostruzione del Quadro Conoscitivo nel quale si è proceduto ad approfondire le principali tematiche inerenti la mobilità ciclistica, a raccogliere ed aggiornare i dati preesistenti sulla rete ciclabile, esistente e pianificata, di ambito provinciale, anche attraverso il coinvolgimento dei Comuni per quanto di loro competenza. Ad integrazione di tale attività sono stati svolti numerosi sopralluoghi nel territorio provinciale, mirati alla ricognizione della rete. Durante tali sopralluoghi sono stati rilevati complessivamente oltre 500 Km di rete.

L’*obiettivo del Piano* è quindi aumentare il numero di ciclisti prevedendo in particolare di:

- incrementare l’estensione delle piste e degli itinerari ciclabili;
- aumentare l’uso della bici per gli spostamenti di tutti i giorni;
- realizzare itinerari cicloturistici per attrarre più visitatori e fornire ai cittadini metropolitani luoghi e occasioni per il tempo libero;
- ridurre l’incidentalità e aumentare la sicurezza percepita dai ciclisti;

- diffondere l'informazione, la comunicazione e la formazione, per favorire una reale cultura della bicicletta.

Per quanto riguarda l'uso della bicicletta per gli spostamenti quotidiani dei cittadini il Piano propone:

- un incremento delle piste/percorsi ciclabili di 350 Km pari al circa il 50% dell'esistente;
- la diffusione e omogeneizzazione delle zone 30 Km/h per garantire la massima integrazione dei percorsi e la massima permeabilità urbana per i ciclisti;
- la realizzazione degli assi principali di valenza metropolitana: via Bazzanese, via Galliera e via Emilia;
- il completamento/rafforzamento degli assi di accesso della "Grande Bologna" per consentire un collegamento diretto e sicuro tra il centro di Bologna e i Comuni di prima cintura;
- il rafforzamento/completamento della maglia delle connessioni ciclabili intercomunali selezionando i percorsi esistenti da valorizzare, i percorsi già pianificati, i percorsi da pianificare e le discontinuità della rete, tenendo presente che le distanze effettivamente percorribili per un uso quotidiano si attestano su circa 4 Km. Il Piano inoltre propone una metodologia per definire le priorità realizzative;
- l'individuazione delle azioni necessarie per garantire lo sviluppo della mobilità ciclistica: Abaco interventi, Progettazione integrata, Intermodalità, Mobility manager, Bici a pedalata assistita, Educazione alla mobilità sostenibile, Parcheggi biciclette, Ufficio metropolitano biciclette, Lotta ai furti, Trasporto merci in bicicletta, Protocollo con i Comuni per aggiornamento dati.

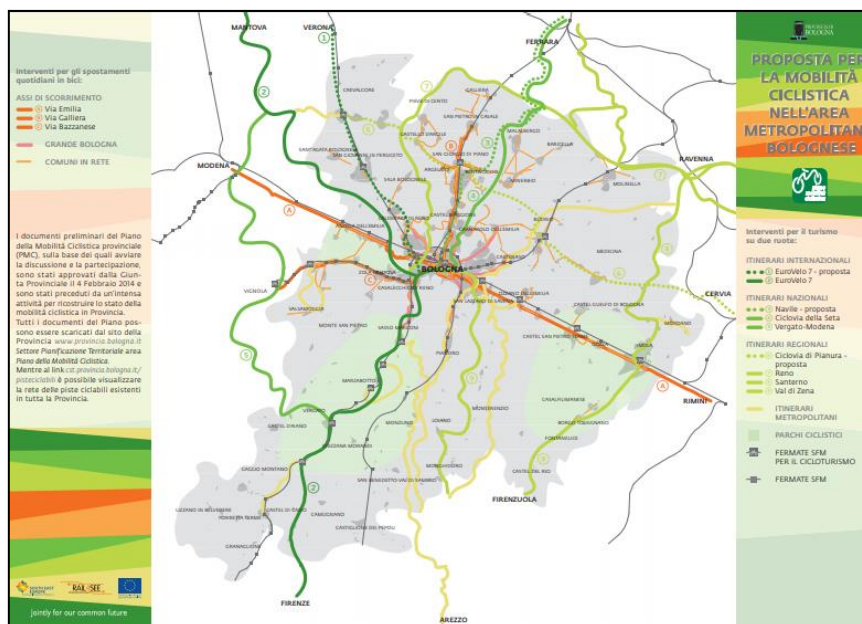


Figura 6-Piano Mappa Piste Ciclabili Esistenti

1.2 IL TRASPORTO INTERMODALE

Ogni mezzo di trasporto ha un ambito in cui il suo utilizzo si rivela ottimale. Per opporre una valida alternativa in termini di mobilità sostenibile, all'uso dell'auto, che comporta tanti costi in termini di inquinamento, congestione, incidentalità e consumo del territorio, è necessario che l'uso della bici si integri con quello dei vettori di trasporto pubblico. Questo vale soprattutto per i mezzi a guida vincolata: treni, metropolitane, tram che, potendo contare su una sede propria indipendente dalla viabilità ordinaria, possono offrire prestazioni attraenti in termini di percorrenza, ma spesso non permettono di coprire comodamente l'intero tragitto, quando l'origine e la destinazione finale sono alquanto distanziati dalla stazione o dalle fermate.

La bici può, tuttavia, colmare efficacemente l'anello mancante nella catena dei trasferimenti, specie per quanto riguarda le distanze comprese tra i 500 metri ed i 5 chilometri, ambito nel quale costituisce la risorsa migliore in fatto di velocità e facilità di attraversamento. Meno interessante è la comunque possibile sinergia con gli autobus, sia per le caratteristiche del veicolo, che non si presta facilmente al trasporto di molte bici, sia per le velocità commerciali del medesimo che, almeno in ambito urbano, sono talvolta inferiori a quelle del ciclista.

L'uso della bicicletta ha i suoi principali vantaggi urbani, per tempistiche, risparmio sul carburante ed economizzazione delle risorse, nella percorrenza di distanze fino a 5–6 km. Su distanze superiori, la bicicletta riesce ad essere competitiva con auto e motocicli attraverso il cosiddetto *trasporto intermodale*: la possibilità di carico della bicicletta su treni, metrò e tram e in alcuni casi anche con altri tipi di trasporto pubblico.



Figura 7-Trasporto Intermodale- possibilità di trasportare la bici sul treno

L'intermodalità bici-transporto pubblico rafforza anche quest'ultimo, rendendolo "porta a porta", senza gli svantaggi e le ricadute negative degli spostamenti con mezzo motorizzato privato (congestione, parcheggio, inquinamento ecc.): si esce di casa in bici, la si carica sul mezzo di trasporto pubblico attrezzato e alla fermata opportuna si prosegue verso la destinazione voluta.

L'utilizzo combinato di bicicletta ed altri mezzi può essere messa in atto anche in una seconda modalità che facilita lo scambio: la realizzazione di parcheggi bici agli snodi del trasporto pubblico e di ciclo stazioni (coperte, custodite e dotate di alcuni servizi) per esempio in adiacenza alle stazioni ferroviarie.

Lo stesso servizio di biciclette pubbliche condivise (*bike sharing*) è un forma di intermodalità fra bici (pubblica in questo caso) ed ogni altro mezzo.



Figura 8-Trasporto Intermodale-Parcheggio bici in adiacenza alla stazione ferroviaria

Attualmente in Emilia-Romagna sono 630 i treni attrezzati per il trasporto di bici (su un totale di circa 900 treni circolanti), di cui 90% su rete nazionale e 10% su rete FER. A Bologna, il 73% dei treni sono abilitati al trasporto bici.

Negli anni passati inoltre sono stati realizzati nelle stazioni del Servizio Ferroviario Metropolitano 2.500 posteggi bici (ancora spesso insufficienti), 25 sottopassi ciclabili e 38 piste di raccordo con il centro urbano. Nonostante questo però risulta ancora complicato il trasporto bici sui treni italiani a meno del trasporto di bici pieghevoli.

La mobilità ciclabile in Italia è ancora agli inizi, ma ha il vantaggio di potersi orientare a modelli e soluzioni già ampiamente sperimentate in tutta Europa. Se facciamo riferimento all'Olanda, uno dei principali obiettivi del Bicycle Master Plan riguarda proprio l'aumento dell'uso del trasporto pubblico, soprattutto quello sub ed extraurbano, migliorando gli spostamenti in bicicletta e i parcheggi per le biciclette presso le stazioni dei treni e alle fermate dell'autobus, del tram e della metropolitana.

Le aziende per il trasporto pubblico stanno riconoscendo sempre di più il ruolo di supporto che la bicicletta può avere, poiché il suo uso da e per le stazioni o le

fermate ha un effetto favorevole sui tempi totali di viaggio e acquista importanza sui percorsi più lunghi.

Un anello importante nella catena del trasporto pubblico e ciclabile è rappresentato dai servizi per le biciclette nei parcheggi, nelle stazioni e nelle fermate degli autobus.

CAPITOLO 2- TEMPI D'ATTESA ALLE INTERSEZIONI SEMAFORIZZATE

Il numero di ciclisti che giornalmente utilizza la bici, quale mezzo di trasporto, è in forte crescita.

In Italia questo aumento è sicuramente più lento rispetto ad altri paesi europei quali l'Olanda e la Danimarca; ciononostante dallo studio dei dati ottenuti dall'European Cycling Challenge nelle diverse edizioni si è apprezzato un notevole sviluppo della bici come mezzo di trasporto giornaliero. In particolare, in Emilia Romagna, sono molte le iniziative che promuovono l'utilizzo della bici negli spostamenti giornalieri.

Per promuovere l'aumento dei ciclisti in strada, è necessario intervenire opportunamente sul sistema di offerta apportando cambiamenti alla rete al fine di raggiungere una prospettiva multimodale che possa favorire l'interazione tra i mezzi di trasporto motorizzati e i ciclisti, che risultano essere gli utenti vulnerabili del traffico e migliorare le condizioni di sicurezza e circolazione degli utenti.

La modalità di scelta del percorso degli utenti della rete dipende da molte variabili ma, in genere, soprattutto per quanto riguarda gli spostamenti sistematici (casa-lavoro, casa-scuola, etc.), la scelta ricade sul percorso più breve e/o più veloce.

La presenza di intersezioni semaforizzate lungo il tragitto può rappresentare motivo di scelta di un percorso alternativo anche se, dalle analisi svolte, è risultato che non tutti gli utenti aspettano che il semaforo diventi verde: alcuni ciclisti infatti decidono di attraversare l'intersezione anche con segnale luminoso rosso commettendo infrazione; altri invece, attendono qualche secondo per poi ripartire prima che il segnale luminoso diventi verde.

Nonostante le intersezioni analizzate risultano pericolose per l'incolumità degli utenti della rete, i ciclisti che si fermano al semaforo per poi ripartire allo scattare del verde semaforico rappresentano una percentuale molto bassa.

Di seguito vengono mostrati i risultati di alcune indagini condotte per comprendere come, la presenza di intersezioni semaforizzate possa influire sulla

modalità di scelta del percorso degli utenti e viene descritto, in dettaglio, il primo studio condotto in Canada sulla valutazione dei tempi medi d'attesa alle intersezioni semaforizzate; infine, vengono presentati i risultati di un interessante studio condotto in Cina sul comportamento dei ciclisti in approccio alle intersezioni semaforizzate.

2.1. INFLUENZA DEI TEMPI D'ATTESA ALLE INTERSEZIONI NELLA MODALITÀ DI SCELTA DEL PERCORSO DEI CICLISTI

Per poter studiare e pianificare interventi sulla rete stradale esistente bisogna conoscere il comportamento dei ciclisti e i fattori che condizionano la loro scelta del percorso: i loro tempi di percorrenza, le loro velocità medie, i ritardi medi, i motivi dello spostamento (es. casa-lavoro, casa-università, ecc.), i tempi d'attesa alle intersezioni semaforizzate e non e tutta una serie di variabili che permettono di stimare il livello di servizio (LOS) .

Di particolare interesse risulta lo studio delle intersezioni quali punti in cui si registrano la maggioranza dei problemi stradali in termini di circolazione e incidentalità. Secondo studi condotti in Nord America infatti, le intersezioni sono i punti in cui i ciclisti risultano maggiormente vulnerabili e in cui avvengono più del 60% di incidenti stradali che coinvolgono ciclisti.

Per intervenire in modo adeguato sulle intersezioni è necessario quindi analizzare le velocità medie dei ciclisti in prossimità delle stesse e lungo i segmenti stradali che le collegano, per poter andare a determinare i tempi medi d'attesa alle intersezioni ed, eventualmente, intervenire sulla rete per migliorarne il LOS.

Le velocità e i ritardi, e il modo in cui queste grandezze variano nell'arco della giornata, sono informazioni importanti per scopi di pianificazione; i ciclisti infatti, attribuiscono grande importanza alla variabile temporale associata agli spostamenti compiuti: il tempo di viaggio non è legato solamente alla lunghezza dello spostamento ma anche al tempo che l'utente deve attendere durante il tragitto a causa della presenza di intersezioni. Possiamo quindi affermare che il

comportamento di scelta del percorso da parte degli utenti è strettamente legato alla presenza e al funzionamento delle intersezioni.

Ad oggi, sono stati condotti studi incentrati sulla valutazione dei ritardi, dei tempi di viaggio e del LOS dei ciclisti soltanto lungo segmenti stradali. Lo studio dei tempi d'attesa agli incroci, seppure di grande importanza, è una problematica che non è ancora stata largamente affrontata.

Sono stati condotti diversi studi sulla velocità di viaggio dei ciclisti: uno studio condotto dall'Università di Bologna, ha determinato gli effetti di disturbo non stazionari sulle velocità di viaggio dei ciclisti lungo segmenti stradali evidenziando che la velocità dei ciclisti risulta molto influenzata dalla presenza dei pedoni con una riduzione della velocità fino al 30%, dalla presenza di un altro ciclista sulla strada e, per i ciclisti che viaggiano nel traffico misto la presenza di veicoli a motore (in particolar modo veicoli pesanti) porta a ridurre drasticamente la velocità (Bernardi e Rupi, 2015); uno studio condotto nella città di Olomouc, Repubblica Ceca, ha esaminato gli effetti della qualità della pavimentazione, in termini di vibrazioni, sul comfort e sulla velocità del ciclista (Bíl et al., 2015); inoltre è stato studiato l'impatto del tempo di viaggio sulla scelta del percorso del ciclista tramite sondaggi (Hunt e Abraham, 2007; Sener et al., 2009; Stinson and Bhat, 2003).

Per poter conoscere le modalità di scelta del percorso da parte degli utenti e studiare le loro velocità e tempi d'attesa, negli ultimi anni si ricorre alle tracce GPS ottenute mediante alcune applicazioni Smartphone di tracciamento della posizione degli utenti nello spazio e nel tempo. Il vantaggio dei dati GPS provenienti dalle applicazioni Smartphone è che forniscono dati sul percorso effettuato da tutti i ciclisti che utilizzano l'applicazione, fornendo un campione di dati, in alcuni casi molto ampio, da cui poter estrapolare tempi di percorrenza, velocità e ritardi con il vantaggio, da parte del ciclista, di registrare i propri spostamenti e conoscere le distanze percorse e il tempo impiegato a percorrere il viaggio.

2.1.1. Primo studio sui tempi d'attesa medi alle intersezioni semaforizzate

Recentemente, a Montreal in Canada, è stato condotto un interessante studio che ha permesso di indagare sulla natura dei ritardi alle intersezioni semaforizzate grazie ad una applicazione per Smartphone, *Mon Rèsvèlo*. Questo è il primo studio che utilizza i dati GPS, forniti da un'applicazione Smartphone, per studiare i tempi di viaggio, le velocità e i ritardi sia per segmenti stradali che per gli incroci, sull'intera rete stradale urbana.

Lo scopo di questo studio è essenzialmente di quantificare i tempi di viaggio dei ciclisti, le velocità e i ritardi lungo i segmenti stradali e agli incroci e come questi possono variare in base allo scopo del viaggio e nei diversi periodi della giornata. Grazie alla grande quantità di dati è stato possibile analizzare l'intera rete concentrandosi su singole intersezioni. Poiché questi dati sono completamente anonimi, è improbabile che il comportamento del ciclista venga influenzato dal monitoraggio del proprio viaggio.

Questo studio, oltre ad analizzare le grandezze d'interesse, presenta un metodo pratico per correggere i dati GPS forniti dall'applicazione *Mon Rèsvèlo*, al fine di ottenere valori attendibili della velocità media dei ciclisti lungo i segmenti stradali e i ritardi subito in corrispondenza delle intersezioni.

Lo studio si serve dei dati che derivano dall'utilizzo dell'applicazione da parte dei cittadini di Montreal, nel periodo di tempo che va dal 2/07/2013 al 15/11/2013. Si tratta di più di 10,000 tracce, registrate da circa 1,000 ciclisti, per un totale di circa 16 milioni di punti GPS. Questa metodologia segue diversi passaggi, riassunti nella figura seguente:



Figura 9 -Diagramma di flusso del metodo per la valutazione dei tempi d'attesa alle intersezioni semaforizzate.

Ogni percorso, t , registrato da ciascun utente è infatti definito attraverso una sequenza di punti:

$$p_i = (x_i; y_i; r_i), i=1, 2, \dots, n$$

x_i = latitudine del punto i ;

y_i = longitudine del punto i ;

r_i = istante di tempo associato al punto i , *timestamp*;

Passando da un sistema di riferimento geografico ad un sistema di riferimento cartesiano ortogonale, è possibile calcolare la distanza, la velocità e il tempo di percorrenza tra due punti successivi che costituiscono l'itinerario registrato.

1. Calcolo distanza, tempo, velocità

La *distanza euclidea*, d_{ij} , espressa in metri, tra due punti GPS consecutivi viene calcolata come segue:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$$

con i e j punti consecutivi.

Dal timestamp è poi possibile determinare l'*intervallo temporale*, w_{ij} , espresso in secondi, tra ogni coppia di punti consecutivi:

$$w_{ij} = (3600 \times h_j + 60 \times m_j + s_j) - (3600 \times h_i + 60 \times m_i + s_i)$$

Sia per il calcolo della distanza che per il calcolo dell'intervallo temporale tra due punti, al primo punto del trip viene assegnato valore nullo in modo che la distanza e il tempo sono calcolati a partire da quel punto.

A partire dalle distanze e dai tempi calcolati, è possibile determinare le velocità, v_{ij} , espressa in metro al secondo:

$$v_{ij} = \frac{d_{ij}}{w_{ij}}$$

2. Data filtering

Ogni *trip*, t , è però costituito da dati GPS grezzi, affetti da errori che portano ad un grado di accuratezza del posizionamento planimetrico dei punti dell'ordine

della decina di metri; questi errori dipendono dalla poca accuratezza del dispositivo GPS e dalla presenza di edifici alti;

Vengono dunque stabilite una serie di regole che permettono di filtrare i dati in uscita, attraverso il processo di “Data Filtering”, eliminando per quanto possibile, i valori che porterebbero a risultati poco attendibili:

- *HIGH SPEED FILTER*: questo filtro permette di calcolare la velocità media di un intero viaggio, v_t , come la sommatoria del rapporto tra le velocità medie tra due punti e il numero di punti abbinati al segmento s durante il viaggio t .

$$v_t = \sum_i^k \frac{v_{ij}}{k}$$

Quindi se $v_t > 30\text{km/h}$, il viaggio è classificato come *non-bike trip* in quanto è molto probabile che il viaggio sia stato fatto con un veicolo a motore e non in bicicletta.

- *SLOW SPEED FILTER*: in questo caso, più semplicemente, viene impostato un valore minimo di velocità pari a 1km/h in quanto si ipotizza che per velocità molto basse, l'applicazione sia stata lasciata in esecuzione anche dopo aver raggiunto la destinazione.
- *MINIMUM TRIP DURATION*: viene impostata una durata minima del viaggio pari a 60s in quanto, trips di durata inferiore non ci permettono di fare importanti valutazioni.
- *TIME GAP*: il massimo intervallo temporale tra due punti GPS, w_{ij} , successivi è impostato pari a 90s perché, se un ciclista arriva ad un'intersezione semaforizzata quando il segnale diventa rosso, non dovrebbe restare fermo al semaforo per più di un minuto.

E se il *time gap* risulta maggiore del valore impostato può significare che il ciclista si è fermato per qualche commissione lasciando in esecuzione l'applicazione

3. *Speed Smoothing*: le velocità ottenute inizialmente sono sottoposte al processo di “Speed Smoothing”, che consente di eliminare i picchi di velocità che si generano fra punti successivi, a seguito del rumore a cui sono soggetti i dati.

Questo procedimento consiste nel mediare tra loro valori di velocità relativi a punti precedenti e successivi rispetto a quello di interesse. Normalmente la media può essere fatta fra 3, 5 o 7 valori, a seconda del grado di accuratezza che si vuole raggiungere.

In figura 10 è mostrata una parte di un trips con le relative velocità filtrate e non filtrate e i relativi picchi e le relative depressioni derivanti da dati rumorosi; si vede come, andando a filtrare questi dati, si vanno ad attenuare i valori di velocità.

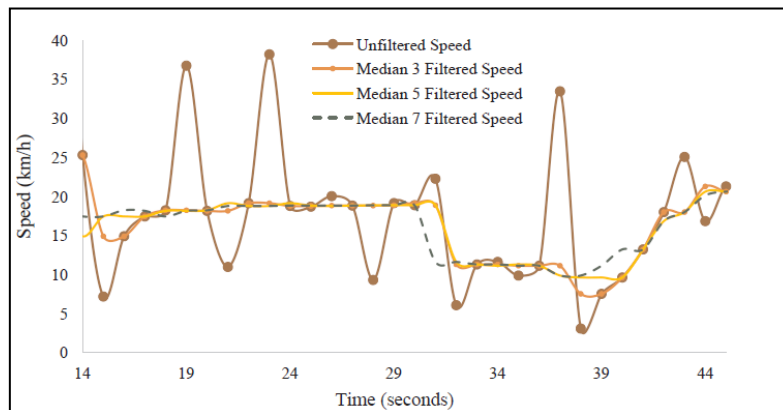


Figura 10-Andamento delle velocità, filtrate e non

4. *Network segmentation*: la rete digitale viene suddivisa in *links* (segmenti) e *nodes* (intersezioni), grazie alla definizione dei *Buffers*. Un segmento è definito come il collegamento tra due intersezioni adiacenti e l'intersezione come il punto d'intersezione di questi segmenti.

I *buffers*, che circoscrivono le intersezioni, sono aree aventi diametro di 20m, posizionate proprio in corrispondenza di punti di attraversamento; la definizione dei buffers è importante in quanto, il comportamento del ciclista all'interno di quest'area, non va ad influenzare la velocità del ciclista sui segmenti.

È possibile quindi distinguere due categorie di punti GPS: quelli che appartengono ai segmenti e quelli che appartengono alle intersezioni.

5. *Directional average speed on segments*: si calcola la velocità media separatamente sulle due direzioni del segmento.

Tutte le direzioni, attraversate da meno di 2 viaggi, vengono escluse dalle analisi in quanto due valori di velocità non sono sufficienti per fornire un valore accurato della velocità media.

6. *Travel time through intersections*: nell'analisi vengono prese in considerazione solo le intersezioni segnalate, tutti i dati di intersezione non segnalati, vengono eliminati dall'analisi.

Ordinando i dati in ordine cronologico e utilizzando il timestamp dei dati GPS, è possibile determinare la direzione del viaggio.

7. *Intersection delay*: Il tempo medio di attesa dei ciclisti alle intersezioni viene infine calcolato mediante la seguente relazione:

$$D_{tr} = \left(\frac{c}{V_{tr}} - \frac{c}{V_{ts}} \right) \times 3.6$$

D_{tr} = ritardo subito durante il percorso t , all'intersezione r (espresso in secondi);

V_{tr} = velocità media lungo l'intersezione [km/h];

V_{ts} = velocità media lungo il segmento stradale [km/h];

c = diametro del buffer che circonda l'intersezione [m];

Quindi, il tempo medio di attesa è nullo se l'utente trova il verde. Infatti, la velocità potrebbe rimanere invariata.

8. *Segment speed model*: tramite un modello di regressione lineare vengono identificate le caratteristiche che influenzano la velocità dei ciclisti sui segmenti.

In figura 11 vengono mostrati i valori di ritardo per ciascun approccio e per ogni intersezione: variano da verde a rosso e rappresentano rispettivamente ritardi da brevi a lunghi. I ritardi calcolati per ciascun approccio possono essere mediati per ottenere un ritardo medio per l'intera intersezione.

Le conclusioni degli studi fatti a Montreal evidenziano i vantaggi che derivano dall'utilizzo di informazioni provenienti dalle applicazioni GPS. Dal momento che tutti gli utenti in possesso di uno Smartphone possono facilmente tracciare i propri percorsi, la varietà di itinerari, da cui estrarre informazioni di interesse analitico per la determinazione dei ritardi alle intersezioni, è molto ampia.

I problemi principali che si riscontrano dall'elaborazione di questo tipo di dati sono legati all'affidabilità del posizionamento planimetrico dei punti, come sottolineato in precedenza, e alla rappresentatività del campione, dal momento che l'applicazione "Mon RésVoVélo" veniva utilizzata da una popolazione quasi esclusivamente giovane e maschile (campione poco rappresentativo della popolazione).

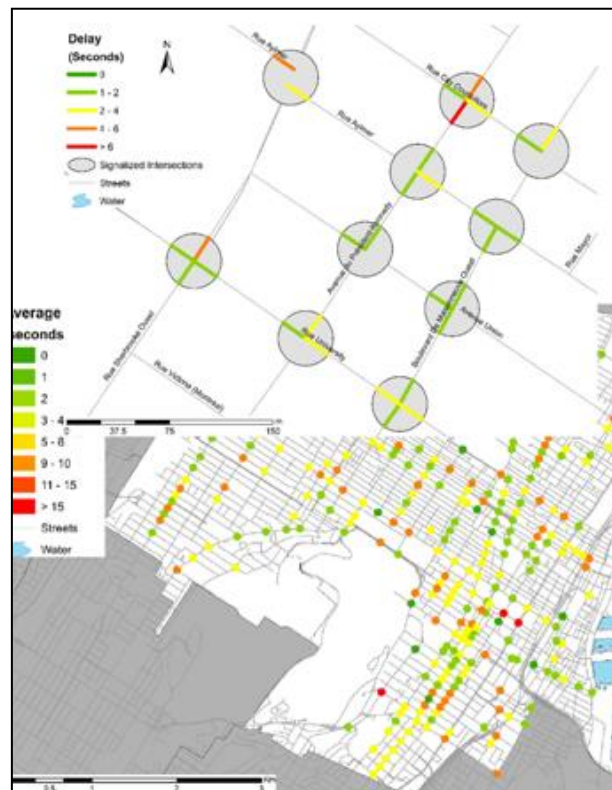


Figura 11- ritardi alle intersezioni semaforizzate di Montreal, che derivano dall'analisi dei punti GPS registrati mediante l'applicazione Mon RésVoVélo

2.1.2. *Analisi del comportamento dei ciclisti in fase di attraversamento alle intersezioni semaforizzate*

La valutazione del tempo medio d'attesa dei ciclisti alle intersezioni è strettamente legato al comportamento degli stessi in fase di attraversamento.

Dal momento che la vulnerabilità dei ciclisti nel traffico rappresenta una delle principali criticità, è bene analizzare i rischi legati alla violazione della segnaletica luminosa, al fine di promuovere modifiche in grado di migliorare la sicurezza degli utenti in circolazione.

Un interessante studio è stato condotto nella città di Pechino, Cina (X. Yang et al. / *Accident Analysis and Prevention*, 2015), dove grazie a rilievi fatti sul campo, mediante videocamera, è stato possibile analizzare il comportamento dei ciclisti in approccio alle intersezioni semaforizzate.

L'obiettivo dello studio era proprio quello di analizzare il comportamento dei ciclisti alle intersezioni distinguendo i ciclisti che utilizzano una bici normale da quelli che utilizzano una bici elettrica.

È stato analizzato il comportamento di un campione di 2322 ciclisti e utenti che utilizzano biciclette elettriche, in attraversamento a sei intersezioni semaforizzate, grazie a rilievi effettuati mediante l'utilizzo di videocamere, posizionate in corrispondenza degli attraversamenti pedonali.

I risultati ottenuti sono stati suddivisi in *censored data* e *uncensored data* per distinguere un attraversamento sicuro (attraversamento con verde semaforico) da un attraversamento con rosso semaforico.

I *censored data* rappresentano gli utenti che attraversano l'intersezione quando il semaforo è verde; questi comprendono sia quelli che arrivano all'intersezione quando il semaforo è verde e sia quelli che, arrivando all'intersezione con il semaforo rosso, attendono fino a quando il segnale consente di attraversare in sicurezza.

Gli *uncensored data* invece rappresentano tutti gli utenti che attraversano con il semaforo rosso; questi comprendono sia gli utenti che arrivano con semaforo

rosso e decidono comunque di proseguire e sia coloro che attendono per un certo intervallo di tempo, prima di attraversare, commettendo infrazione.

I risultati mostrano che il comportamento dei ciclisti in corrispondenza del rosso semaforico dipende dal tempo d'attesa e che circa il 50% dei ciclisti osservati ha un tempo d'attesa inferiore a 49s; il 25% invece attende fino a 97s.

Inoltre i tempi d'attesa alle intersezioni e la violazione del rosso semaforico variano in funzione del tipo di ciclista (l'utente maschio giovane o i ciclisti con poca esperienza tendono a commettere infrazione), del volume di traffico incrociato e dalla posizione di attesa del verde semaforico.

L'obiettivo di questo studio è fornire una metodologia per studiare i tempi d'attesa dei ciclisti, le violazioni alle intersezioni e i fattori di rischio associati e come variano queste grandezze tra i ciclisti e gli e-biker (questo perché in Cina le bici elettriche vengono considerate mezzi di trasporto non motorizzati e in forte crescita).

I risultati potrebbero fornire soluzioni per migliorare la sicurezza dei ciclisti.

Questo modello si basa sulla determinazione dell'intervallo temporale medio d'attesa dei ciclisti all'intersezione calcolato come la differenza tra l'istante in cui il ciclista arriva all'intersezione e quello in cui riparte, distinguendo tra i censored data e uncensored data.

I grafici di seguito rappresentati mostrano i risultati dell'analisi effettuata in termini di grado di sopportazione dell'attesa del ciclista all'intersezione.

A sinistra viene mostrato l'andamento del grado di sopportazione del tempo d'attesa da parte del ciclista, che risulta decrescente all'aumentare del tempo d'attesa; si considerano poi tre casi: nel primo caso si considerano solo gli uncensored data, nel secondo si considerano sia i censored data che gli uncensored data e nel terzo caso si utilizzano ugualmente entrambe le tipologie di dati, facendo però riferimento ad un metodo di analisi non parametrico.

Considerando i primi due casi, si nota che nel caso in cui si prendono in considerazione solo gli uncensored data (caso 1), si ha una generale sottostima

della sopportazione dell'attesa da parte dei ciclisti, rispetto a quanto accade considerando sia i ciclisti che attraversano con il rosso che quelli che attraversano con il verde.

A destra viene mostrato confrontato l'andamento dell'indice di sopportazione dell'attesa da parte di un ciclista che utilizza una bici normale, rispetto ad un e-biker; graficamente è chiaro come la sopportazione dell'attesa risulta inferiore per i ciclisti che utilizzano una bici elettrica rispetto a quelli che utilizzano una normale bicicletta.

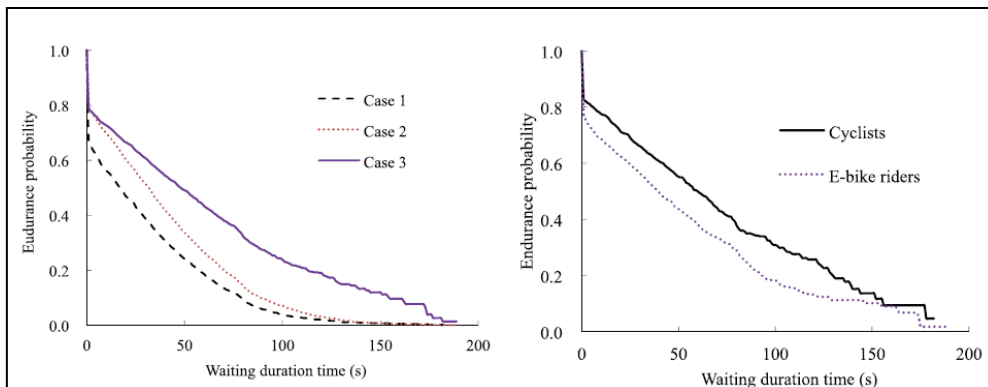


Figura 12- Andamento del grado di sopportazione dell'attesa del ciclista all'intersezione

In generale, i risultati mostrano come il comportamento dei ciclisti sia strettamente legato al tempo di attesa alle intersezioni.

Più della metà degli utenti non aspettano oltre 49s in attesa al semaforo, quando la luce rossa obbliga all'arresto, commettendo l'infrazione.

Solamente il 25% del campione esaminato attende per oltre 97s alla fermata, senza violare la segnaletica luminosa.

Come precedentemente accennato, il comportamento dei ciclisti è fortemente influenzato da determinati fattori quali: genere, età, posizione in cui il ciclista si ferma in attesa del verde.

Red-light infringement rates by each subcategory.			
	Rider type		Overall
	Cyclists	E-bike riders	
Gender			
Male	58% ^a (449/778) ^b	69% (687/998)	64% (1136/1776)
Female	50% (184/366)	55% (99/180)	52% (283/546)
-			
Age group			
Young (<30)	48% (177/371)	68% (222/326)	57% (399/697)
Middle-aged (30-50)	57% (330/582)	68% (523/771)	63% (853/1353)
Old (>50)	66% (126/191)	51% (41/81)	61% (167/272)
-			
Waiting position			
Appropriate	25% (56/223)	37% (69/188)	30% (125/411)
Inappropriate	63% (577/921)	72% (717/990)	68% (1294/1911)
Overall	55% (633/1144)	67% (786/1178)	61% (1419/2322)

^a Red-light running proportion of the observed samples in this subcategory.
^b The numerator is the number of the violation samples, the denominator is the number of the observed samples.

Figura 13-risultati indagine condotta a pechino (Cina) sui fattori che influenzano il comportamento dei ciclisti alle intersezioni

Come mostrato in tabella, gli uomini sono generalmente portati ad attraversare col rosso in percentuali maggiori rispetto alle donne, sia nel caso di utilizzo di bicicletta elettrica, che nel caso di utilizzo di bicicletta normale.

I ciclisti che hanno un'età che supera i 50 anni tendono ad infrangere il segnale di arresto in percentuali maggiori rispetto ai ciclisti più giovani. Questo avviene solo nel caso di utilizzo di bicicletta normale, dal momento che per gli e-bikers il comportamento è opposto rispetto a quanto descritto in precedenza.

Ciò è probabilmente dovuto al fatto che i ciclisti che superano i 50 anni procedono con una bici elettrica a velocità inferiori rispetto ai ciclisti giovani, cosa che riduce le percentuali di rischio di attraversamento col rosso.

Infine, anche la posizione di attesa all'intersezione influisce sul comportamento dell'utente. Sia i ciclisti che gli e-bikers che attendono in un punto dell'intersezione che non coincide con quello appropriato, attraversano in percentuali maggiori col rosso.

CAPITOLO 3- MAP-MATCHING PER *L'IDENTIFICAZIONE DEGLI ITINERARI DEI CICLISTI*

3.1. MODELLI DI MICROSIMULAZIONE DEL TRAFFICO

Nella pianificazione dei trasporti, la simulazione del flusso di traffico svolge un ruolo importante in quanto, avendo come input la domanda e l'offerta di trasporto produce come output quantità derivate come densità di traffico, velocità e tempi di viaggio.

Queste quantità sono a loro volta importanti per analizzare il comportamento del sistema e degli utenti della rete stradale.

I problemi della circolazione e della mobilità rappresentano ai giorni nostri uno dei temi più sentiti dalla collettività.

I tempi impiegati per gli spostamenti e le distanze di percorrenza tendono sempre più a dilatarsi, come conseguenza della sempre maggiore dispersione dei luoghi di lavoro, di residenza e di svago.

Le conseguenze dell'incremento della mobilità sono misurabili direttamente sulle strade: aumentano gli incidenti, peggiorano costantemente le condizioni dell'ambiente in cui viviamo.

Questo perché alla crescita delle esigenze della mobilità non ha risposto un equilibrato miglioramento del sistema di offerta, cioè delle infrastrutture, dei servizi e delle regolazioni per il trasporto pubblico e privato.

Questo squilibrio si è riversato in misura invasiva nelle nostre strade, creando situazioni di congestione del traffico e di enorme dilatazione del tempo impiegato negli spostamenti.

Da queste brevi considerazioni è facile intuire che qualsiasi intervento di pianificazione e trasformazione del territorio deve essere accompagnato da un'accurata analisi del fenomeno della mobilità; ogni previsione deve essere

valutata attentamente, in termini di nuovi carichi indotti sulle reti di comunicazione in funzione degli obiettivi più generali di sostenibilità.

Per poter dunque promuovere e sviluppare la progettazione di sistemi di infrastrutture e servizi di trasporto che siano affidabili e sostenibili, è fondamentale conoscere le modalità di funzionamento e le criticità presenti nel sistema di trasporto esistente e comprendere il comportamento di scelta dei singoli utenti della rete per definire in maniera più efficace possibile quali sono gli attributi della rete di trasporto che lo influenzano ed agire su di essi.

Lo sviluppo del sistema dei trasporti stradali ha da sempre messo in evidenza il problema del mantenimento e miglioramento delle condizioni di guida.

Un vasto filone di ricerca si è quindi concentrato sulla modellazione del deflusso veicolare, con lo scopo di creare strumenti che permettessero di gestire e di progettare adeguatamente il sistema dei trasporti.

Tra gli approcci modellistici sviluppati nel corso degli anni quello della simulazione microscopica del deflusso veicolare riveste un ruolo particolarmente importante.

Tale approccio permette di descrivere il moto dei singoli veicoli e di simulare il traffico nel suo complesso mediante la loro interazione e permette la comprensione e la modellazione delle dinamiche complessive del sistema di trasporto.

La corretta rappresentazione delle dinamiche di evoluzione dei veicoli e di conseguenza del traffico è tuttavia una problematica complessa.

Esistono fondamentalmente due tipi di simulazione del traffico:

- *Macroscopica*: la simulazione macroscopica modella il flusso del traffico utilizzando modelli matematici derivanti dalla fluidodinamica e quindi rappresenta una simulazione continua. Questo tipo di simulazione considera ogni utente allo stesso modo considerando variabili di input e output (quali velocità, flusso e densità) mediate sull'intero campione di utenti. I simulatori macroscopici sono più indicati per la simulazione di sistemi di traffico ad ampio raggio, che non richiedono una modellazione

dettagliata, come le reti autostradali. Questo approccio non è realistico in quanto nella realtà esistono diversi tipi di veicoli guidati da altrettanti utenti diversi tra loro (e quest'approccio non ne tiene conto).

- *Microscopica*: la simulazione microscopica modella le singole entità separatamente e con un elevato livello di dettaglio; è infatti classificata come simulazione discreta. Permette di modellare il flusso di traffico in modo più realistico rispetto alla simulazione macroscopica.

La simulazione del moto dei veicoli è un aspetto cruciale dei modelli microscopici, che forniscono una rappresentazione più concreta del comportamento effettivo dell'utente della rete e delle prestazioni della rete stessa.

Sono stati seguiti molti approcci per sviluppare gli strumenti di micro - simulazione; nel settore dell'ingegneria sono state messe a punto strutture che riproducono alcuni comportamenti propri della coppia veicolo -guidatore e che consentono di lavorare su posizione, velocità e accelerazione di ogni singola unità presente nella rete in un dato istante e appartenente ad un qualsiasi plotone di veicoli.

È possibile definire alcuni comportamenti di base che dovrebbero essere correttamente rappresentati per far sì che il modello sia sufficientemente coerente con la realtà.

Il comportamento reale degli utenti della strada è molto eterogeneo e dipende non solo dall'ambito di guida, per esempio urbano o extra - urbano e dalla quantità di veicoli presenti, ma anche dalle caratteristiche proprie degli utenti. La disomogeneità di comportamento dei guidatori è inoltre alla base dei fenomeni di instabilità del deflusso veicolare verificabili nel sistema reale per valori della portata prossimi alla congestione dell'infrastruttura.

Lo sviluppo di un modello di micro - simulazione è un'attività piuttosto complessa che richiede la disponibilità di notevoli risorse in termini di dati e tempi; in relazione a questa problematica i software disponibili sul mercato non sono sempre in grado di simulare adeguatamente tutti gli aspetti relativi al comportamento del singolo guidatore e del traffico nel suo complesso.

Un aspetto spesso trascurato, a causa delle difficoltà connesse alla raccolta ed elaborazione dei dati, concerne ad esempio la calibrazione e validazione dei modelli microscopici.

Il primo processo, riguarda l'aggiustamento dei parametri che influenzano il modello al fine di migliorare la capacità dello stesso di simulare adeguatamente il fenomeno di traffico reale e di riprodurre le caratteristiche degli utenti e le loro performance.

La fase di validazione, successiva alla calibrazione, consiste nell'utilizzare i parametri adeguatamente modificati al fine di valutare la loro applicabilità ad altre situazioni modellate, in modo tale da riprodurre fedelmente il fenomeno di traffico reale.

Come precedentemente accennato l'assenza di appropriate e consolidate metodologie di calibrazione e validazione dei modelli pone in discussione l'affidabilità dei risultati e le conclusioni degli studi di simulazione, così come lo stesso ventaglio di applicazioni per le quali tali modelli possono essere proficuamente utilizzati.

La micro-simulazione fornisce una visione dinamica del fenomeno in quanto vengono prese in considerazione le caratteristiche del moto dei singoli veicoli (flusso, densità, velocità, ecc..) non più medie, come accade nei macro-simulatori, bensì reali e variabili istante per istante durante tutta la simulazione.

Attraverso l'impiego di questi modelli, in cui si prevede la definizione del moto di ogni singolo veicolo, è possibile studiare l'interazione tra veicoli, l'interazione tra i veicoli e l'infrastruttura, le prestazioni e gli impatti ambientali, sociali ed economici a livello di singolo veicolo, di arco e di rete e l'utilità del percorso seguito per ogni singolo utente.

Sono modelli matematici discreti, stocastici e dinamici che permettono di rappresentare, ad intervalli regolari, il movimento di ogni singola entità, all'interno del sistema di trasporto, in funzione delle caratteristiche fisiche dei veicoli, delle regole di circolazione viaria e delle caratteristiche di comportamento degli utenti.

I processi principali di micro - simulazione sono essenzialmente quattro:

- La definizione di una rete di trasporto;
- La generazione della domanda di trasporto;
- La micro - simulazione;
- La valutazione dei risultati;

3.2. MAP-MATCHING: DATI DI GEOLOCALIZZAZIONE E MAPPE DIGITALI

La geolocalizzazione è il processo tramite il quale è possibile mettere in relazione una certa informazione con un punto specifico della superficie terrestre, individuato tramite metodi di localizzazione (quindi attraverso il reperimento delle coordinate latitudinali e longitudinali) di un apparato elettronico, sfruttandone le caratteristiche fisiche o ricevendo informazioni dettagliate dallo strumento stesso.

Nello specifico il concetto di geolocalizzazione enfatizza l'aspetto dinamico, riferendosi ad informazioni che possono essere aggiornate di frequente come la posizione e la velocità.

La possibilità di rendere dinamico il reperimento di tali informazioni e di poterle rilevare in maniera sempre più dettagliata deriva dalla combinazione di diverse tecnologie che si sono sviluppate nel ventunesimo secolo e che danno ora la possibilità ad ogni dispositivo di poterle comunicare in tempo reale.

Grazie alle caratteristiche sopracitate di correlare con immediatezza le informazioni al singolo dispositivo e alla sua posizione geografica, è considerata tra i più rivoluzionari campi di sviluppo in ambito sociale ed economico, pur avendo potenziali problemi legati alla privacy e libertà individuale di non semplice soluzione.

Le prime tracce di studi di geolocalizzazione e georeferenziazione che ci pervengono risalgono agli antichi greci. È infatti in questo periodo, prima dell'avvento delle mappe, che conoscere la propria posizione inizia ad essere un dato fondamentale per i vari spostamenti marittimi e terrestri. Per riuscire a

compiere tali misurazioni senza gli attuali mezzi tecnologici, si affidavano agli astri.

Una svolta riguardo alla geolocalizzazione si ebbe dopo la seconda guerra mondiale quando i russi, forti delle tecnologie militari sviluppate negli anni precedenti, portarono il primo satellite artificiale nello spazio.

Lo Sputnik 1, che fu lanciato il 4 ottobre 1957, consisteva in una sfera contenente due trasmettenti e quattro lunghe antenne e rimase in orbita per 22 giorni.

Questo primo tentativo riuscito scatenò una vera e propria corsa allo sviluppo di tecnologie di assistenza alla localizzazione di mezzi e persone. Tutte le potenze mondiali parteciparono con vari progetti che si basavano principalmente sulla posizione satellitare.

Il più noto e maggiormente usato è il sistema lanciato nel 1978 dall'aeronautica militare americana: il GPS (Global Positioning System).

Tutti i sistemi di geolocalizzazione producono un grande ammontare di dati che rappresenta la traccia digitale degli spostamenti quotidiani di persone e/o merci.

L'analisi e l'elaborazione di questa grande quantità di dati geo-referenziati riscuotono particolare interesse in molti ambiti scientifici tra cui quello della Pianificazione dei Trasporti: esse risultano fondamentali per comprendere il comportamento dei singoli utenti della rete di trasporto per avere una percezione reale su quello che è lo scenario attuale, ci permettono di disporre di uno strumento di monitoraggio continuo nel tempo della rete per poter prevedere degli idonei interventi sulle infrastrutture e valutare poi l'efficacia degli interventi proposti.

Il GPS, pur essendo il sistema di rilevamento maggiormente usato, è affetto da errori sistematici e casuali, ovvero errori dovuti ai satelliti trasmettenti, alla propagazione dei segnali nell'etere, alle modalità di ricezione delle basi a terra del sistema o allo strumento ricevente; inoltre, le caratteristiche del contesto fisico del territorio (tunnel, effetto canyon, etc.) possono determinare una perdita di qualità e di precisione dei dati.

La continua crescita di disponibilità e fruibilità dei dati di localizzazione di tipo GPS o altri sistemi di posizionamento, la loro sempre maggiore qualità e accuratezza, dovuta alla diffusione e all'evoluzione tecnologica di smartphone e di applicazioni di localizzazione e navigazione, ha reso possibile poter ricostruire in maniera sempre più precisa il percorso seguito dall'utente per effettuare uno spostamento all'interno della rete; questa precisione ha portato all'elaborazione e alla continua implementazione di algoritmi di map-matching, con lo scopo di individuare i percorsi scelti dagli utenti della rete.

Il processo di map-matching consente sostanzialmente di integrare i dati GPS a disposizione con i dati delle mappe digitali delle reti costruite, al fine di identificare in maniera corretta l'arco percorso dall'utente del traffico e l'esatta posizione su di esso, in termini spazio temporali.

L'obiettivo dell'Ingegneria dei Trasporti è identificare o ricostruire il percorso scelto dall'utente per lo spostamento; al termine del procedimento di map-matching è possibile ottenere la miglior stima dell'itinerario realmente scelto dall'utente per compiere lo spostamento.

Sono stati sviluppati una serie di algoritmi, basati su metodi matematici, al fine di eseguire tale operazione.

Gli elementi di input degli algoritmi sono i dati di localizzazione e le mappe digitalizzate.

Le mappe digitali rappresentano uno strumento fondamentale in cui è possibile visualizzare e gestire tutte le informazioni alfanumeriche collegate a ciascun elemento geografico rappresentato, grazie all'impiego di un sistema GIS (Geographic Information System).

Questo sistema informativo computerizzato permette l'acquisizione, l'elaborazione, l'analisi, la gestione e la rappresentazione grafica di dati di tipo georeferenziato che vengono associati ad elementi geografici, mediante le mappe digitali.

Il map-matching si colloca come utile strumento all'interno delle funzioni di monitoraggio e di gestione dei sistemi di trasporto: i dati ottenuti, infatti, possono essere usati per meglio comprendere il comportamento degli utenti sulla rete e le conseguenze di tale comportamento sia sul sistema di trasporto, sia sulle esternalità come l'inquinamento atmosferico.

Una migliore comprensione della condotta dell'utente all'interno della rete di trasporto, in merito alle scelte modali o del percorso, è un passaggio essenziale che consente di migliorare la pianificazione dei sistemi di trasporto, ed in particolare di adottare provvedimenti che promuovano i modi di trasporto sostenibili, come la mobilità ciclabile

3.2.1. Sistema GPS

Il Sistema Satellitare Globale di Navigazione (GNSS: *Global Navigation Satellite System*) è un sistema di geo-radiolocalizzazione e navigazione terrestre, marittima o aerea, che utilizza una rete di satelliti artificiali in orbita. Rappresenta un insieme di satelliti che trasmettono segnali radio ad alta frequenza e determinano la posizione tridimensionale di un punto sulla Terra e intorno ad essa.

Questi sistemi sono dedicati alla fornitura di un servizio di posizionamento geospaziale a copertura globale che permette a piccoli appositi ricevitori elettronici di determinare le loro coordinate geografiche (longitudine, latitudine ed altitudine) su un qualunque punto della superficie terrestre, elaborando i segnali radio trasmessi dai satelliti della costellazione.

Tra i sistemi GNSS si includono il sistema statunitense *NAVigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System* (NAVSTAR GPS, noto come GPS, il sistema GNSS più conosciuto), il sistema russo GLONASS (*GLobal Orbiting NAVigation Satellite System*), il sistema europeo Galileo, in fase di

completamento, il sistema cinese COMPASS, evoluzione del sistema regionale Beidou, ed il sistema regionale indiano IRNSS (*Indian Regional Navigational Satellite System*), in fase di sviluppo.

Il sistema GPS (*Global Positioning System*) è ad oggi il sistema più preciso per la rilevazione della posizione e della velocità di un ricevitore sulla terra in ambiente esterno.

Il GPS è un sistema di posizionamento globale e di navigazione satellitare, basato sulla ricezione di segnali radio, emessi da una costellazione di satelliti artificiali in orbita attorno alla Terra, da parte di appositi ricevitori.

Il GPS è basato su un sistema di posizionamento sferico che permette la determinazione della posizione di un qualsiasi oggetto nello spazio tridimensionale, attraverso il calcolo del tempo impiegato da un segnale radio per percorrere la distanza esistente fra satellite e ricevitore; esso si compone del segmento spaziale, costituito da una costellazione di satelliti NAVSTAR in orbita intorno alla Terra, del segmento di controllo e del segmento utente, il ricevitore GPS, in grado di elaborare i segnali.

A partire dalle informazioni sul timing contenute all'interno del segnale, il calcolo della distanza di propagazione del segnale radio emesso dal satellite viene eseguito, dal ricevitore, attraverso la misura della differenza oraria, solitamente in termini di microsecondi, fra il codice temporale dichiarato e quello del proprio orologio, sincronizzato con l'orologio atomico di bordo del satellite, sulla base della velocità con cui si propaga il segnale nello spazio.

Il sistema è progettato in modo da permettere il posizionamento tridimensionale di oggetti, anche in movimento, in ogni istante ed in ogni luogo del pianeta.

Il sistema GPS è gestito dal governo degli Stati Uniti d'America ed è attualmente liberamente accessibile da chiunque sia dotato di un ricevitore GPS sulla Terra.

Attraverso la rete di satelliti artificiali, esso fornisce ad un ricevitore GPS sulla Terra informazioni sulle sue coordinate geografiche, nel caso lo strumento riesca ad agganciare il segnale di almeno quattro satelliti del sistema.

La localizzazione avviene per mezzo della trasmissione di un segnale radio, inviato da ciascun satellite, contenente informazioni sul timing e sulla posizione, e mediante l'elaborazione dei segnali ricevuti, effettuata dal ricevitore.

Attorno al pianeta Terra, a circa 20.200 km di altitudine, orbitano 31 satelliti dedicati al sistema GPS. Ogni satellite ha al suo interno un precisissimo orologio atomico e invia continuamente un segnale radio contenente la sua posizione, e l'orario di trasmissione del segnale. Il ricevitore GPS confronta questi segnali, e tramite alcune equazioni riesce a stabilire la sua posizione.

Le possibili applicazioni di tali sistemi sono rivolte ai rilevamenti terrestri (topografici, geodetici, posizionamento di veicoli in tempo reale, monitoraggio di deformazioni del suolo, ecc.), a quelli marittimi (studi sulle correnti marine, navigazione marittima, posizionamento di navi in tempo reale, ecc.), ai rilievi spaziali e aerei (posizionamento di veicoli in tempo reale, sistemi di navigazione, rilievi topografici, geometrici, rilevazioni di altri satelliti, ecc.).

Il sistema di posizionamento globale fornisce 2 livelli di servizio GPS: il Precise Positioning Service (PPS) e lo Standard Positioning Service (SPS). Il primo è destinato esclusivamente ad utenti autorizzati dagli Stati Uniti e dalle strutture militari degli alleati americani le cui trasmissioni avvengono mediante un codice criptato P(Y); il secondo meno accurato del precedente, disponibile per la Comunità internazionale.

Le principali caratteristiche del sistema GPS SPS sono la copertura globale sino ad una altitudine di 3000 km e gratuita per tutti i suoi utenti; una precisione del 95% delle informazioni (di 13 metri sul piano orizzontale e 22 metri su quello verticale); la disponibilità continua nel tempo.

Nonostante l'enorme accuratezza degli orologi atomici presenti sui satelliti, il sistema GPS ha una precisione ottima ma non assoluta.

Le misure GPS sono affette da un diverso numero di errori, classificabili come errori strumentali, errori di modello ed errori di osservazione.

I primi sono legati alle modalità di funzionamento dei satelliti e dei ricevitori; gli errori sistematici o di modello sono riconducibili all'indeterminazione dell'orbita, alla sincronizzazione degli orologi o alla perturbazione del segnale durante la propagazione in atmosfera; gli errori di osservazione sono errori accidentali che si verificano in fase di acquisizione del segnale.

L'impiego di smartphone per la raccolta di dati di posizionamento e l'utilizzo di tale sistema in ambito urbano portano ad una riduzione dell'accuratezza delle misure effettuate data dall'effetto di indebolimento della ricezione del segnale dovuto al posizionamento del telefono cellulare, generalmente riposto in borse o zaini e all'interno di cover o altri rivestimenti protettivi, dalle forti differenze qualitative fra marche e modelli diversi di ricevitori GPS e di smartphone, dal possibile disturbo del segnale dovuto alla congestione dell'etere e dall'effetto di oscuramento del segnale dovuto alla presenza degli edifici circostanti.

Questi dati possono però aiutarci a capire i modelli che caratterizzano le traiettorie seguite dalle persone durante la loro attività quotidiana.

3.2.2. Mappe digitali

Di fondamentale importanza rivestono le informazioni relative al territorio su cui si vuole rilevare uno spostamento spaziale e temporale. Infatti le informazioni che vengono acquisite con la rilevazione satellitare devono essere confrontate con quelle che definiscono la topologia e la composizione stradale del percorso di un generico viaggio.

Errori della mappa producono ulteriori errori in tutto il processo di rilevamento di un percorso mediante un dispositivo GPS; è necessario quindi rappresentare correttamente la scala, il livello di generalizzazione, la proiezione, il datum e le coordinate del sistema.

Le mappe digitali rappresentano un fondamentale elemento di input per il processo di map-matching; sono di fondamentale importanza in quanto rappresentano la rete stradale esistente, con la quale vanno confrontati i dati di posizionamento acquisiti dai sistemi satellitari.

La disponibilità di informazioni geografiche digitali ha prodotto una importante trasformazione nell'utilizzo del dato territoriale, con vantaggi importanti sia per gli operatori pubblici, sia privati nei diversi settori dell'economia e dei servizi.

Oggi, i sistemi informativi geografici (GIS), permettono di integrare le tecnologie cartografiche e quelle informatiche, con opportunità sempre crescenti. Il Sistema Informativo Geografico (GIS) si configura come un sistema di informazioni riferibili al territorio, quindi georeferenziato e, insieme al sistema di posizionamento globale (GPS), sono diventati strumenti di uso comune per compiere analisi e prendere decisioni operative.

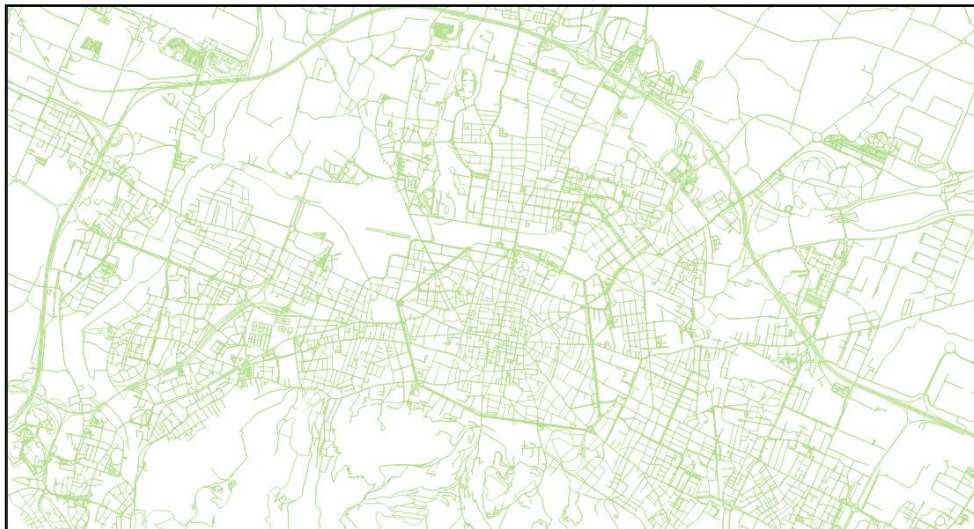


Figura 14-Mappa della Città di Bologna rappresentata con QGIS

Le rappresentazioni geo-cartografiche estendono le già consistenti possibilità dell'elaborazione dei dati ottenuta tramite database o fogli elettronici e possono essere adottate per migliorare analisi, valutazioni e – più in generale – conoscenza in numerosi processi decisionali.

Da qualche anno in Italia – un po' in ritardo rispetto ad altri paesi europei, ma con un buon trend di recupero – l'utilizzo dei GIS ha avuto un incremento notevole. Dal monitoraggio dei caratteri e delle proprietà fisico/ambientali, si passa non solo alla mappatura del patrimonio culturale e museale e della qualità ambientale, ma anche all'utilizzo delle mappe digitali per migliorare l'efficienza e la performance di prodotti e servizi.

Nella figura che segue sono rappresentati i punti GPS, costituenti i percorsi effettuati dagli utenti dell'European Cycling Challenge nell'edizione del 2016, associati alla mappa della città di Bologna, tramite un sistema informatico GIS.

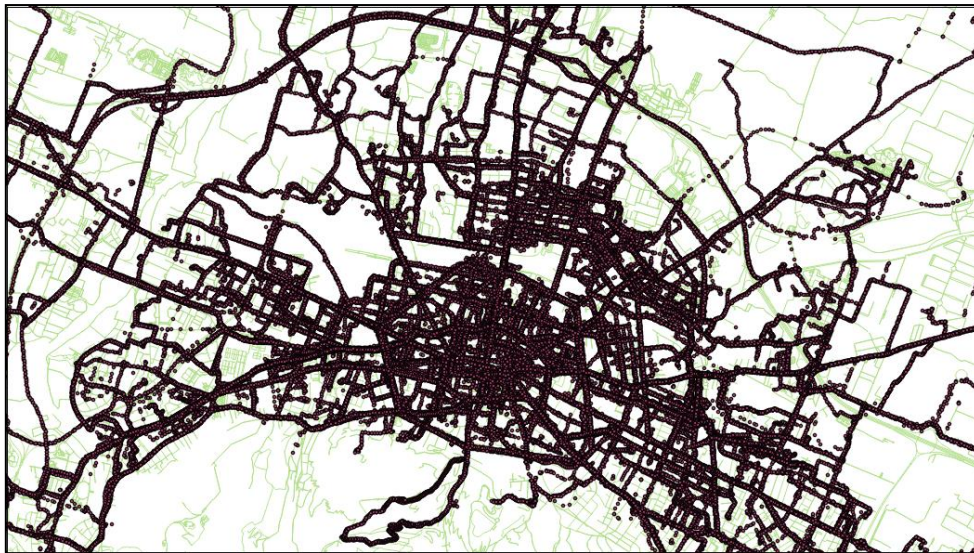


Figura 15-Tracce dei punti GPS visibili sulla mappa, tramite QGIS

L'impiego degli strumenti GIS per l'assegnazione e la modifica di attributi di tipo georeferenziato agli elementi delle mappe stradali disponibili riveste un ruolo fondamentale nell'ambito dell'analisi e dello studio della mobilità ciclabile finalizzato alla modellazione del processo di scelta degli itinerari da parte dei ciclisti e alla valutazione dei tempi medi d'attesa alle intersezioni.

Attraverso questi strumenti è possibile conoscere nel dettaglio le caratteristiche delle intersezioni della rete stradale esistente , gli archi che convergono in esse e capire in che modo questi possano influenzare le modalità di scelta degli utenti.

In particolare è importante capire cosa influisce realmente le scelte degli utenti che si trovano ad un'intersezione; infatti dallo studio condotto sui tempi d'attesa alle intersezioni molti utenti, in corrispondenza del rosso semaforico, preferiscono attraversare ugualmente anziché attendere che il semaforo diventi verde; altri invece attendono per qualche secondo per poi attraversare ugualmente con il rosso; pochi attendono che il semaforo diventi verde prima di attraversare l'incrocio.

Nella figura che segue sono rappresentati gli itinerari, ottenuti a partire dai punti GPS rappresentati nella figura precedente, che con maggior probabilità sono stati realmente percorsi dagli utenti.

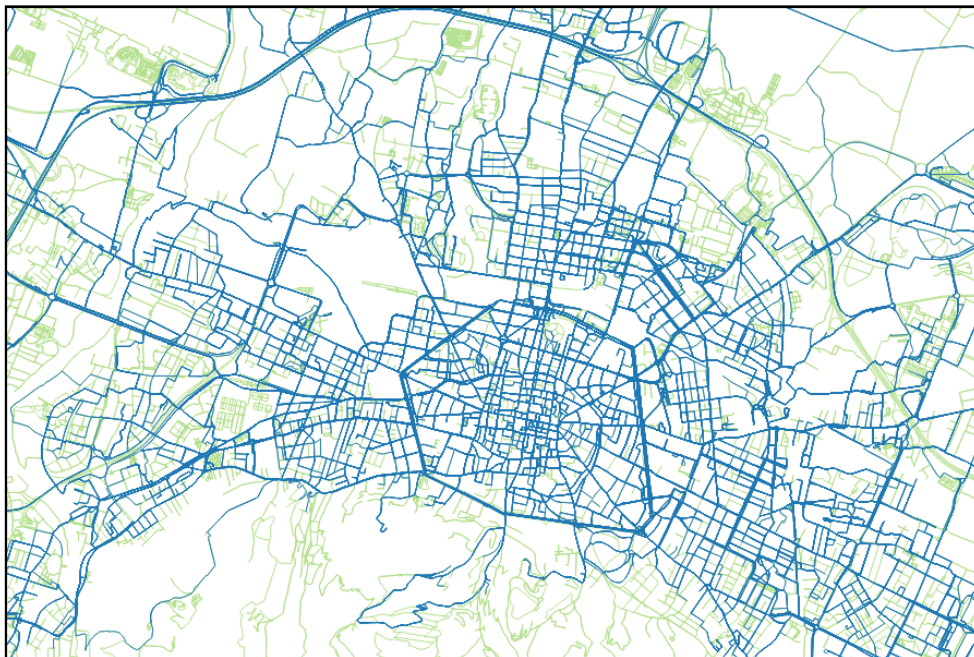


Figura 16- Rappresentazione degli itinerari percorsi dagli utenti a partire dalle tracce GPS, QGIS

Anche le mappe possono essere soggette ad errori, dovuti alla mancanza di informazioni (ad esempio l'assenza di alcuni archi della rete) o al processo di creazione o di digitalizzazione (ad esempio la larghezza di una strada o

l'associazione degli attributi agli elementi della rete), che possono condurre ad un carente o errato processo di map-matching. Infatti, la determinazione della posizione esatta del veicolo sull'arco individuato dal processo di map-matching dipende in larga misura dal grado di accuratezza della mappa costruita.

Una mappa digitale per essere definita di qualità deve possedere informazioni circa le rotatorie, gli incroci, le curve, ovvero le informazioni topologiche, ma anche la precisione di alcune informazioni come ad esempio la capacità di una rotatoria, i suoi elementi geometrici o la loro classificazione.

Molte mappe digitali non forniscono informazioni relative ad esempio al numero di corsie, alla loro larghezza, al senso di marcia, informazioni che normalmente sono presenti su una mappa non digitale.

La mancanza di questi specifici particolari può comportare errori di tipo geometrico che insieme agli errori topologici possono introdurre errori di posizionamento e di navigazione.

Sicuramente con i software oggi a disposizione gli errori geometrici possono essere ridotti se non eliminati, mentre quelli di tipo topologico non sono così facili da correggere.

Per questo, prima di procedere con l'algoritmo di map-matching, la mappa digitale dell'area Urbana di Bologna, scaricata direttamente dal portale *openstreetmap.org* e importata in SUMOPy, è stata confrontata, su Google Maps, con la rete reale.

OpenStreetMap (OSM) è un progetto finalizzato alla creazione di mappe e cartografie a partire da una raccolta mondiale di dati geografici. I dati geografici presenti in OSM possono essere utilizzati liberamente da chiunque con il solo vincolo di citare la fonte.

Tutti possono contribuire arricchendo e correggendo i dati: la pagina in cui la mappa è consultabile espone in evidenza un'etichetta *Modifica* per procedere con

la modifica dei dati ed il progetto è accompagnato da un archivio storico delle modifiche. Gli utenti registrati possono caricare nei database del progetto tracce GPS e modificare i dati vettoriali usando gli editor forniti ma generalmente, i dati per la realizzazione delle mappe sono forniti da volontari che effettuano dei rilievi sul territorio muniti di dispositivi di localizzazione GPS.

3.2.3. *Procedimento di map-matching*

Negli ultimi anni si è assistito ad una notevole crescita della disponibilità di dati GPS e della loro qualità ed accuratezza, dovuta alla diffusione ed all'evoluzione tecnologica di smartphone e di applicazioni di localizzazione e navigazione per dispositivi mobili e ad una forte richiesta e crescente utilizzo dei Sistemi di Trasporto Intelligenti (*ITS-Intelligent Transport System*) .

La localizzazione e il monitoraggio degli spostamenti sia per la gestione di flotte pubbliche che di veicoli privati avviene mediante dispositivi GPS a bordo dei veicoli, che consentono di acquisire informazioni spaziali dei movimenti in tempo reale al fine di compiere delle scelte operative o delle indagini esplorative.

Essenziale risulta essere l'esatta attribuzione della posizione del veicolo rispetto alla mappa digitale, problema che in letteratura è conosciuto come map-matching. L'enorme mole di dati a disposizione degli analisti ha quindi condotto alla necessità di elaborare e di migliorare continuamente gli algoritmi di map-matching, rispetto sia alla loro accuratezza, sia alla loro efficienza computazionale.

Il processo di map-matching consiste nell'integrare due tipologie di dati: quelli di localizzazione – costituiti da una lista ordinata di coordinate geografiche -, ricavati tramite un sistema di localizzazione GNSS (*Global Navigation Satellite System*), tipo GPS, e quelli delle mappe digitali; si tratta quindi di identificare il percorso corretto che il veicolo percorre e determinare la sua posizione sul *network* di riferimento.

I due elementi essenziali per la procedura sono quindi uno strumento che traccia la posizione del veicolo, ed una mappa digitale della rete, che fa da riferimento per la localizzazione.

Lo scopo del procedimento è identificare il corretto arco che un veicolo sta percorrendo - o ha percorso - e determinarne l'esatta posizione sullo stesso. In genere, nell'ambito d'interesse dell'ingegneria dei trasporti, l'obiettivo è identificare o ricostruire il percorso scelto dall'utente per lo spostamento, pertanto il problema del map-matching si traduce nel ricavare il percorso che rappresenti la migliore stima dell'itinerario realmente scelto dall'utente.

La questione è affrontata di solito tramite software dedicati su piattaforma GIS (*Geographic Information System*).



Figura 17-Traccia GPS rappresentata su SUMOPy

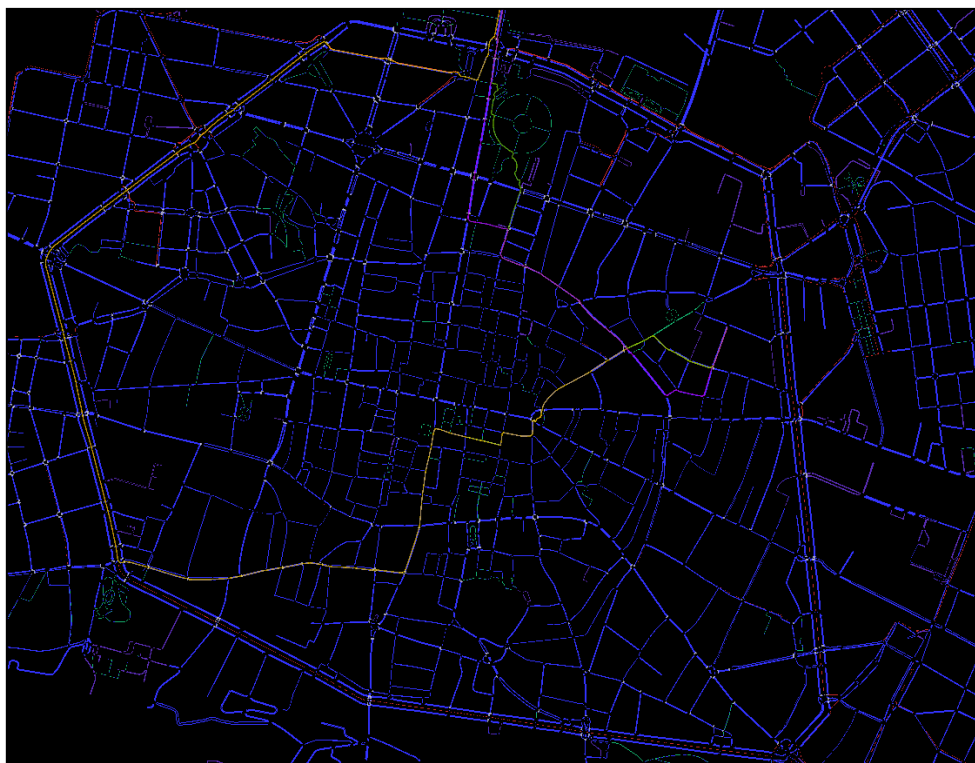


Figura 18- Map-matching di una traccia su SUMOPy

In figura 17 è mostrata una traccia GPS importata e rappresentata con SUMOPy e nella figura successiva, è rappresentata la stessa traccia in seguito al procedimento di map-matching (*matched routes*).

Il procedimento di map-matching è un utile strumento per il monitoraggio e la gestione dei sistemi di trasporto sia per quello che riguarda l'acquisizione dei dati che per l'analisi dei risultati.

Con questo procedimento risulta più semplice comprendere il comportamento dell'utente all'interno della rete di trasporto, sia per quello che concerne le scelte modali che di percorso, per poter promuovere modalità di trasporto sostenibili riducendo la dipendenza dai veicoli privati motorizzati ed incoraggiando all'utilizzo di modi di trasporto alternativi a basso impatto e valutare l'uso della rete ciclabili ed eventualmente, promuovere miglioramenti della rete esistente.

Se i dati GPS non fossero affetti da errori, e le mappe digitali fossero ad alta risoluzione ed esenti da imprecisioni, non ci sarebbe bisogno di applicare gli

algoritmi di map-matching, dato che i punti tracciati sarebbero automaticamente correlati agli archi e ai nodi corrispondenti sulla rete.

Tuttavia, la presenza di tali errori rende necessario lo sviluppo di algoritmi per il map-matching sempre più sofisticati, che filtrano i dati e tengono conto delle situazioni anomale che possono verificarsi sulla rete.

Poiché il rilevamento del posizionamento GPS non è continuo, se ho un intervallo di notevoli dimensioni tra due misurazioni successive, si rischia una rilevante perdita di informazioni e difficilmente la traccia sarà sottoposta al procedimento di map-matching.

3.3. SUMO E LA SIMULAZIONE MICROSCOPICA

Il software utilizzato nell'analisi della mobilità ciclabile e nello studio dei tempi d'attesa medi alle intersezioni, nell'Area Urbana di Bologna, è SUMO.

SUMO, *Simulation of Urban Mobility*, è un simulatore di traffico microscopico e multimodale progettato per gestire grandi reti stradali. Permette di simulare il flusso di traffico, in termini di movimento di ogni singolo veicolo, ad intervalli di tempo regolari e in maniera continua nello spazio. È microscopico in quanto ogni utente è modellato singolarmente con un proprio percorso.

Il software è stato sviluppato nell'Istituto dei Sistemi di Trasporto del Centro Aerospaziale tedesco ed è open source.

La suite SUMOPy serve per gestire l'enorme quantità di dati necessari per eseguire complesse simulazioni multimodali e comprende diversi modelli di generazione della domanda e una vasta gamma di modalità di trasporto. SUMOPy è costituito da un'interfaccia GUI, un editor di rete e un linguaggio di scripting.

I dati di input da inserire all'interno di un programma di micro-simulazione, quale SUMO, sono la rete di trasporto e la domanda di trasporto.

La rete di trasporto, all'interno di SUMO, è costituita da un grafo bidimensionale composto da archi orientati (*edges*) e da nodi (*Node*) che rappresentano le intersezioni o i punti terminali degli archi.

Per ogni *Trip* (spostamento di un utente da una origine ad una destinazione), vengono specificati l'arco di origine, l'arco di destinazione, l'istante di partenza e il modo di trasporto.

Per ogni *Route* (itinerari) invece viene specificata la successione di archi occupati dagli utenti durante i Trip, dal nodo origine al nodo destinazione. La generazione dei Route è possibile grazie alla generazione della domanda all'interno del micro simulatore che può essere ricavata da flussi misurati o, ad esempio, da dati GPS.

Dopo aver inserito la domanda e definiti i Routes, è possibile definire il movimento di ogni singolo utente in termini spazio temporali, con un elevato grado di dettaglio, tenendo conto delle diverse componenti di traffico, delle interazione fra gli utenti e degli utenti con l'infrastruttura, dei diversi comportamenti degli utenti etc.

SUMO è in grado di analizzare reti di grandi dimensioni e di fornire in output un numero elevato di informazioni relative alla posizione, alla velocità e all'accelerazione di ogni singolo veicolo, dati relativa agli archi e ai trips, valori di emissioni di inquinanti dei veicoli, tempi d'attesa per ogni veicolo etc.

Per la determinazione e l'analisi degli itinerari dei ciclisti è stato utilizzato il software SUMOPy su un grafo di rete precedentemente definito utilizzando la funzione NETEDIT.

3.3.1. SUMOPy

Il software SUMOPy rappresenta l'interfaccia grafica di SUMO. È stato sviluppato mediante il linguaggio di programmazione Python e viene utilizzato per facilitare le operazioni di editazione della rete, la rappresentazione della domanda e la visualizzazione e valutazione dei risultati.

SUMOPy rappresenta una piattaforma all'interno della quale è possibile accedere facilmente a tutti gli strumenti applicativi di SUMO e gestire tutti i dati di input e output del processo di micro simulazione.

Tutti i dati sono organizzati all'interno di una struttura denominata *scenario*. Una volta definito uno scenario, esso deve essere salvato in formato *.obj* all'interno della cartella di lavoro.

Il software SUMOPy è stato utilizzato inizialmente per la fase di importazione del grafo della rete di trasporto e successivamente per l'applicazione del procedimento di map-matching.

Il procedimento di map-matching, che permette di associare i dati GPS disponibili alla mappa digitale, attraverso SUMOPy è possibile grazie alla funzione *Match with Birgillito Method* (G. Birgillito, *Metodi di Map – Matching per l'identificazione degli itinerari dei ciclisti*, 2015).

In seguito al procedimento di map-matching, che permette di ottenere una miglior stima degli itinerari realmente percorsi dagli utenti, è possibile ottenere anche gli itinerari di minimo costo ed in particolare gli *shortes path* (itinerari più corti) e i *fastest path* (itinerari più brevi, in termini temporali) attraverso le funzioni *shortest path routing* e *fastest path routing*.

L'interfaccia GUI (che consente di interagire con il programma modificando graficamente degli oggetti senza dover modificare le righe di comando) e tali strumenti matematici sono stati sviluppati e vengono continuamente implementati all'interno del programma dall'Ing. Joerg Schweizer sulla base delle criticità incontrate e delle evoluzioni nelle analisi eseguite.

3.3.2. Algoritmo di map-matching all'interno di SUMOPy

L'algoritmo di map-matching implementato all'interno di SUMOPy per analizzare i dati GPS raccolti è quello sviluppato dall'Ing. Birgillito come

evoluzione dell'algoritmo ideato da Marchal e successivamente modificato dall'Ing. Schweizer.

L'*algoritmo Marchal* è classificabile come un algoritmo di tipo topologico-probabilistico.

Il suo funzionamento è basato sulla tecnica delle ipotesi multiple, ovvero la formulazione di una serie di ipotesi sul percorso in base alla tipologia della rete (connessioni tra gli archi ai nodi) e la conservazione in memoria di un set di possibili alternative per il percorso effettivo, a cui è assegnato un punteggio (*score*): ad ogni passo vengono eliminate le alternative aventi il punteggio peggiore e, tra le rimanenti, è scelta infine quella con il miglior punteggio.

La misura principale presa in considerazione è la distanza *punto-arco*.

Dato che l'algoritmo processa i punti sequenzialmente uno dopo l'altro, secondo il loro ordine cronologico, è essenziale che un punto ed il suo successivo non siano troppo distanti nel tempo o nello spazio: per tale motivo la fase di *clean* dei dati è più lunga e complessa, in quanto le tracce aventi tra un punto ed il precedente una distanza maggiore di 300 metri, o un lasso di tempo intercorrente maggiore di 30 secondi, vengono divise in corrispondenza di tali punti.

L'algoritmo sviluppato dall'Ing. Birgillito sfrutta la stessa metodologia dell'algoritmo Marchal, basata sulla tecnica delle ipotesi multiple, sul mantenimento in memoria di un certo numero di itinerari alternativi e sulla ricerca topologica degli archi che si susseguono in ogni percorso, seppur con delle modifiche al fine di aumentare il numero di match riusciti e migliorare la loro accuratezza.

La prima modifica riguarda il calcolo del punteggio (*score*) di ogni percorso in quanto, oltre alla *distanza punto-arco*, che è stata comunque modificata imponendo una distanza minima, si è considerata anche la similitudine tra la direzione dell'arco e la traiettoria dei punti GPS consecutivi, che è stata individuata mediante spezzate che uniscono i suddetti punti; questo per andare a premiare il parallelismo e penalizzare la perpendicolarità tra il segmento che unisce due punti GPS successivi, in quanto si presume che tali segmenti siano

identificativi della direzione effettiva dell'utente e, quanto più essi sono paralleli ad un arco tanto più è probabile che l'utente abbia attraversato proprio tale arco.

La seconda modifica è stata apportata alle condizioni per le quali si considera raggiunta l'intersezione o il nodo finale di un arco, aggiungendo un'ulteriore verifica sulla posizione relativa del punto rispetto all'arco e attribuendo un punteggio superiore ad archi che rappresentano una corsia ciclabile riservata.

I passi principali dell'algoritmo consistono nell'inizializzazione, nell'avanzamento e nella verifica del termine del processo.

A partire dal primo punto GPS, la fase iniziale consiste nel determinare tutti i possibili archi di partenza dell'itinerario che si vuole ricostruire; per ogni arco si definisce un *buffer*, e si vanno ad individuare tutti gli archi per cui il punto analizzato ricade all'interno del relativo buffer.

Successivamente, dopo aver determinato i potenziali archi iniziali si procede considerando il punto GPS successivo e, per ognuno, se ne determina l'appartenenza o meno, mediante il criterio della proiezione ortogonale e sulla base dell'area del buffer.

Se il punto analizzato viene attribuito all'arco considerato, si definisce un nuovo itinerario composto dall'arco iniziale stesso e se ne calcola il costo; altrimenti, se il punto GPS ricade al di fuori dell'arco iniziale, si procede prendendo in analisi tutti quelli successivi ad esso e per ognuno si calcola il costo dei possibili itinerari di cui, insieme all'arco iniziale, fanno parte.

Questa sequenza viene ripetuta per tutti i potenziali itinerari fino ad un numero massimo di itinerari tenuti in memoria, *follow routes*, pari a quello definito dal programmatore.

Una volta definiti i possibili itinerari, questi vengono ordinati sulla base del loro costo (in ordine crescente); quindi, dopo aver considerato tutti i punti GPS della traccia, l'algoritmo sceglie l'itinerario di minimo costo fra quelli seguiti e quest'operazione viene ripetuta per tutti gli itinerari considerati.

In SUMOPy, il procedimento di map-matching, richiede in input dei dati:

- *Max Buffer Width*: definisce un raggio di ampiezza della regione d'influenza di ciascun *edge* del grafo della rete. I punti GPS che ricadono all'interno di questo buffer sono attribuibili all'arco stesso, gli altri no; questo parametro risulta importante soprattutto per la definizione dei potenziali archi di inizio degli itinerari matchati.
- *Min Point Number*: affinché su una traccia venga applicato il procedimento di map-matching è necessario che essa sia costituita da un numero minimo di punti GPS, pari a questo parametro.
- *Cumlength Weight*: parametro impostato per fare in modo che l'algoritmo cerchi di minimizzare la lunghezza totalmente percorsa dal nodo di origine fino al punto raggiunto a ciascun passo di analisi, per ridurre al minimo la presenza di percorsi ricostruiti molto articolati e inverosimili.
- *Angle Weight*: peso che viene attribuito dall'algoritmo alla componente del costo dell'arco legata alla similitudine tra la direzione dell'arco e la traiettoria di punti GPS successivi, per premiare il parallelismo e penalizzare il perpendicolarismo tra di essi.
- *Access Weight*: peso da moltiplicare per il livello di accesso di ciascun arco in modo da determinare la componente da sottrarre al costo calcolato per lo stesso. Maggiore sarà l'*Access Level* per le biciclette e minori saranno i costi da attribuire all'arco.
- *Followed Routes*: numero totale di itinerari che viene seguito in parallelo nel corso dello svolgimento dell'algoritmo per la determinazione di quello con la maggior probabilità di essere quello percorso dall'utente.

3.3.3. *Itinerari di minimo costo*

Gli itinerari di minimo costo che collegano ciascuna coppia di archi origine e destinazione degli spostamenti eseguiti dagli utenti e individuati mediante il procedimento di map-matching, vengono determinati mediante la funzione *shortest path routing* e *fastest path routing*.

Nel caso dello *shortest path routing*, il percorso di minimi costo è quello più breve in termini spaziali, in quanto il peso assegnato ad ogni arco nelle successive fasi dell'algoritmo, che ne definisce il costo, è pari alla lunghezza dell'arco stesso.

Nel caso del *fastest path routing* invece, il percorso di minimo costo è il più breve in termini temporali, in quanto il peso assegnato ad ogni arco nelle successive fasi dell'algoritmo, è pari al tempo necessario a percorrere l'arco stesso.

Per ogni *trip*, è possibile connettere il primo arco matchato all'ultimo arco matchato attraverso il percorso più breve (percorso più corto o più veloce).

Per la ricostruzione degli itinerari di minimo costo, durante l'analisi effettuata, l'algoritmo tiene conto del fatto che, nonostante il grafo della rete sia un grafo orientato, i ciclisti possano compiere tutte le manovre, comprese quelle non consentite, per passare da un arco a quello successivo della rete.

Per la valutazione gli itinerari di minimo costo in input vengono inseriti i seguenti parametri:

- *Mode Constant*: è una costante moltiplicativa applicata alla lunghezza degli edges della rete ad accesso esclusivo dei ciclisti per ridurre la lunghezza degli archi della rete ad uso esclusivo dei ciclisti.
- *Mode Dist*: è un valore numerico sottratto alla lunghezza dell'arco, in fase di calcolo dei costi, per ridurre il costo degli archi della rete ad uso esclusivo dei ciclisti.
- *Mode Time*: è un valore numerico moltiplicato per l'access-level e sottratto al tempo di percorrenza dell'arco, in fase di calcolo dei costi, per ridurre il costo degli archi della rete ad uso esclusivo dei ciclisti.
- *Mode Dist.Min*: lunghezza minima dell'arco ad accesso esclusivo dei ciclisti.

L'obiettivo dell'inserimento di questi parametri è quello di ridurre il peso degli archi rappresentativi di piste ciclabili in modo che essi possano essere scelti in fase di costruzioni dei cammini minimi senza essere penalizzati a causa della loro maggior lunghezza o tempo di percorrenza.

Ovviamente questi parametri devono essere calibrati per permettere una ricostruzione realistica dell'itinerario di minimo costo altrimenti, se utilizzassimo costanti di valore troppo elevato, la scelta del percorso ricadrebbe su strade ad accesso riservato esclusivo anche qualora queste fossero significativamente più lunghe.

CAPITOLO 4- PARAMETRI DI INPUT IN SUMOPY ***PER LA RICOSTRUZIONE DEGLI ITINERARI*** ***PERCORSI DAGLI UTENTI***

4.1. DESCRIZIONE DELLE ANALISI SVOLTE

Per comprendere il funzionamento della rete e i parametri che influenzano il comportamento degli utenti è stato utile l'utilizzo del software SUMO. SUMO è un software di simulazione microscopica e multimodale progettato per gestire grandi reti stradali: ogni veicolo è modellato in modo esplicito, ha un proprio percorso e si muove individualmente all'interno della rete; permette di simulare 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. Il programma consente di poter gestire ed analizzare enormi quantità di dati utili alla ricostruzione della domanda multimodale di trasporto tramite degli script o un'interfaccia grafica.

SUMOPy rappresenta l'interfaccia grafica di SUMO. È stato sviluppato mediante il linguaggio di programmazione Python e viene utilizzato per facilitare le operazioni di editazione della rete, la rappresentazione della domanda e la visualizzazione e valutazione dei risultati.

Rappresenta una piattaforma all'interno della quale è possibile accedere agevolmente a tutti gli strumenti applicativi di SUMO e gestire tutti i dati di input e output del processo di micro simulazione.

Con l'ausilio di SUMOPy è stato possibile comprendere il comportamento degli utenti (in questo caso i ciclisti) alle intersezioni semaforizzate e fare una stima dei tempi medi d'attesa alle intersezioni.

Il valore del tempo medio d'attesa risulta infatti dipendente da molte variabili quali il genere e l'età degli utenti, il periodo della giornata in cui si valuta questa grandezza e ,in generale, varia in base al comportamento del singolo utente.

Risulta quindi necessaria un'analisi microscopica del traffico ciclabile per poter comprendere come varia il tempo d'attesa alle intersezioni per ogni utente per poter poi mediare il valore ottenuto sull'intero campione analizzato e poter ottenere una relazione generale che mi permetta di stimare il tempo d'attesa alle intersezioni semaforizzate sull'intera Area Urbana di Bologna.

Per fare questo è stato necessario importare il grafo della rete di tutta la città di Bologna; per l'analisi è stata utilizzata una rete già precedentemente modificata in quanto, come già specificato, le mappe digitali presentano sempre degli errori che potrebbero interferire con il processo di map-matching.

Per questo, prima di procedere con l'importazione dei dati GPS, il grafo è stato confrontato con la mappa reale della città per essere certi che non ci fossero incongruenze.

Dopo aver importato il grafo della rete sono stati caricati i dati delle tracce GPS, raccolti dai dispositivi mobili dei ciclisti.

Le tracce utilizzate sono quelle ottenute dall'European Cycling Challenge del 2016, una gara ciclistica a livello Europeo a cui ha partecipato anche il Comune di Bologna quale ente organizzatore e promotore dell'iniziativa.

Questa manifestazione rappresenta una sfida tra varie città europee per il raggiungimento del maggior numero di chilometri percorsi in bicicletta in ambito urbano.

Ogni ciclista, tramite un ricevitore GPS di uno smartphone o altri dispositivi mobili, attraverso l'applicazione *Endomondo*, ha fornito una serie di punti GPS relativi ai percorsi seguiti dall'utente che consentono di fare un'analisi microscopica sul comportamento dei singoli utenti.

L'enorme quantità di dati ottenuti da questa competizione, ha permesso di fare un'analisi dettagliata degli utenti della rete e del comportamento degli stessi; infatti, molti utenti che si sono registrati all'European Cycling Challenge, hanno specificato il loro sesso e la loro età e questo ci ha permesso poi di fare anche

un'analisi, sui tempi medi d'attesa alle intersezioni in base alla categoria degli utenti.

In seguito all'importazione dei dati di input, si è proceduto ad una prima fase di *clean* delle tracce disponibili sulla base di criteri temporali e spaziali.

Definiti tutti i dati di input necessari, e fissati i parametri di analisi, è stato possibile applicare i procedimenti di *map-matching*, *shortest path routing* e *fastest path routing*, per determinare, rispettivamente, la miglior approssimazione degli itinerari realmente percorsi dagli utenti e i corrispondenti percorsi di minimo costo, minima lunghezza e minima durata, congiungenti le relative coppie origine-destinazione.

Al termine di questa elaborazione è stata fatta una prima analisi dei risultati ottenuti sulla base di determinati indici percentuali e della visualizzazione grafica delle tracce determinate, al fine di effettuare una prima valutazione della qualità del procedimento di *map-matching* eseguito e della veridicità dei percorsi ricostruiti.

Tale operazione si è resa necessaria più volte prima di giungere alla calibrazione ottimale dei parametri degli algoritmi applicati.

Ogni modifica delle variabili di settaggio degli algoritmi impiegati ha richiesto la ripetizione di tutto il procedimento di *map-matching*.

In seguito sono state indagate le caratteristiche degli itinerari determinati (*matched routes*, *shortest routes* e *fastest routes*) e degli utenti che li hanno compiuti, attraverso le *route analysis*, *speed analysis* e *person analysis*.

La visualizzazione dei risultati è disponibile sia in forma numerica attraverso tabelle in formato *.csv*, che in forma grafica mediante grafici e immagini esportabili in *.png*.

In particolar modo, attraverso l'analisi delle velocità, è stato possibile capire come varia il profilo di velocità per ogni traccia *matchata* e ottenere i tempi d'attesa alle intersezioni.

Infine è stata eseguita una correlazione fra i tempi d'attesa ottenuti con SUMOPy a partire dai dati dell'European Cycling Challenge e i tempi d'attesa rilevati manualmente mediante analisi effettuate dal Dipartimento di Trasporti dell'Università di Bologna.

Di seguito si riporta il diagramma riassuntivo di tutte le operazioni svolte.

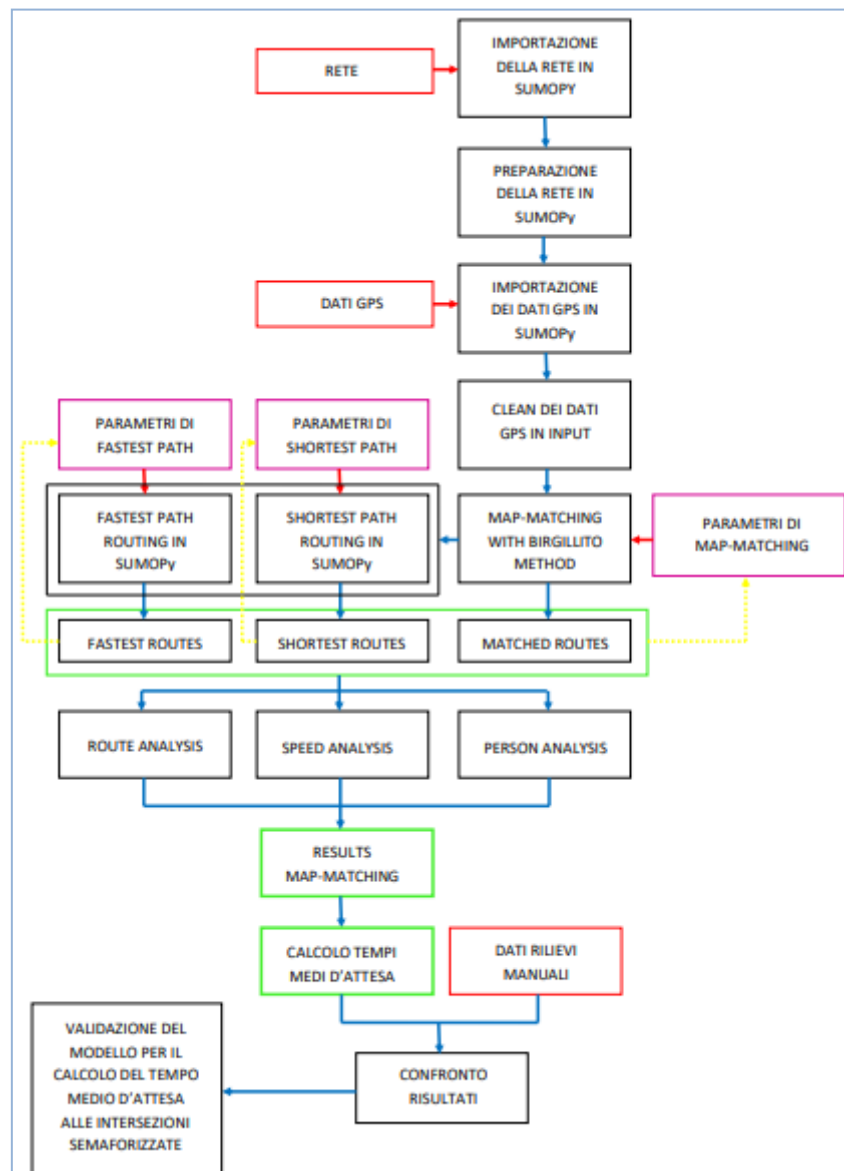


Figura 19-Diagramma di flusso delle attività: in rosso, dati e operazioni di input, in magenta le variabili settate, in verde i dati di output, in blu le operazioni di analisi eseguite, in giallo i procedimenti post-elaborazione di analisi degli errori.

4.2. DEFINIZIONE E IMPORTAZIONE DELLA RETE

4.2.1. Definizione del grafo della rete

La rete rappresentata all'interno di SUMOPy è un grafo G a due dimensioni costituito da un insieme di archi orientati che rappresentano le strade della rete e da un insieme di nodi rappresentanti le intersezioni o le parti terminali degli archi.

I nodi vengono chiamati *junction* e sono definiti da un numero identificativo ID e da una coppia di coordinate (x,y) georeferenziate; gli archi sono denominati *edge* e anch'essi sono definiti da un numero identificativo ID e sono caratterizzati da un nodo origine (*from*) e un nodo destinazione (*to*); con il termine *lane* invece, si identificano le corsie e per ogni corsia sono specificati il numero ID e le connessioni esistenti.

Per ogni nodo è poi possibile individuare i collegamenti, *connections*, che permettono di definire quali manovre sono permesse e quali no.

Tutti gli attributi degli elementi geometrici della rete sono contenuti all'interno di *database*; ad esempio, sono indicati la denominazione degli archi, *type*, e il loro grado di importanza, *priority*, in base alla tipologia di strada che rappresentano (primarie, secondarie, pedonali, percorsi ciclabili, etc.).

Per ogni tipologia di strada è possibile specificare un limite di velocità e un valore di priorità di default, che consente di valutare il peso di quell'arco in presenza di un'intersezione.

Assegnando tutti gli attributi che vengono valutati dall'utente per la scelta del percorso, si passa dalla rete stradale geometrica al grafo della rete.

4.2.2. Importazione del grafo della rete

Prima di procedere con il procedimento di map-matching, la rete disponibile è stata confrontata con la rete reale per essere sicuri d'avere a disposizione una mappa digitale il più possibile conforme alla realtà affinché il procedimento di map-matching potesse ricostruire i percorsi realmente seguiti dagli utenti della rete.

La rete disponibile è stata caricata in SUMOPY mediante l'importazione di un file con estensione *.osm* direttamente dal portale *openstreetmap.org*.

La porzione di rete stradale importata comprende parte dell'area Urbana della Città di Bologna comprensiva di tutti i principali percorsi ciclabili esistenti; sono state comprese anche le zone di San Ruffillo e Casalecchio, San Lazzaro e Corticella.

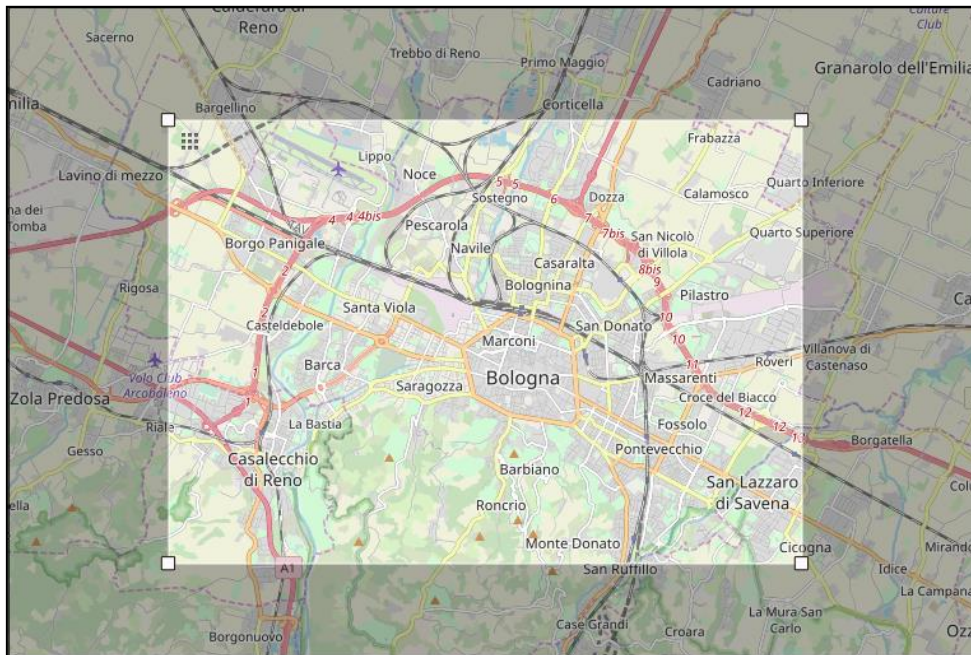


Figura 20-Rete stradale analizzata, OpenSteetMap

4.2.3. Modifiche della rete in SUMOPy

Dopo aver caricato la rete all'interno del software si è proceduto a modificare la mappa digitale direttamente all'interno di SUMOPy.

Per prima cosa, attraverso la funzione *Enlarge nodes*, selezionata dal menu *Network*, si è ottenuta un'espansione dei nodi di intersezione degli archi, dal punto di vista geometrico, per rendere maggiormente visibili le connessioni fra gli archi e le corsie; in seguito, attraverso la funzione *footpath*, si sono connessi tra di loro tutti gli archi pedonali e infine, si è proceduto al completamento della rete ciclabile attraverso il comando *Complete bikenetwork*, che prevede l'aggiunta all'interno del grafo della rete di archi fittizi in corrispondenza di strade a senso unico di circolazione.

L'introduzione di tali archi risulta importante per il procedimento di map-matching, in quanto, affinché si ottenga una buona stima dei percorsi realmente seguiti dagli utenti è bene tener conto che frequentemente i ciclisti percorrono alcuni archi della rete nel senso opposto a quello di circolazione, anche se con velocità ridotta.

Questo comportamento riguarda più frequentemente i ciclisti che circolano in ambito urbano e interessa archi rappresentativi di strade locali o di quartiere caratterizzate da un flusso e una velocità media di circolazione ridotta.

Di seguito si mostrano i parametri, e i rispettivi valori, necessari al completamento della rete ciclabile, in SUMOPy.

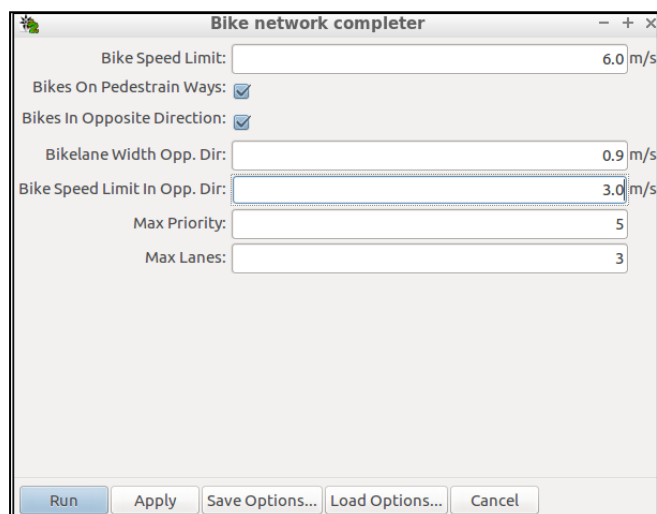


Figura 21-Bike Network completer, SUMOPy

Selezionando l'opzione *Bikes In Opposite Direction* è possibile considerare anche la presenza di ciclisti in direzione opposta al senso di marcia anche se con velocità ridotta (da 6m/s a 3m/s).

Per tener conto del fatto che questo comportamento dei ciclisti vale solo in ambito urbano, è stato fissato un valore di *Max Priority* pari a 5. Questo parametro consente di considerare nell'analisi solo gli archi del grafo rappresentativi delle strade con priorità pari o inferiore al valore indicato.

I parametri di completamento delle piste ciclabili consentono ai ciclisti, in definitiva, di percorrere gli archi ciclabili fittizi creati e gli archi con accesso riservato solo ai pedoni.

Quest'operazione ha portato ad un aumento di archi, corsie e connessioni all'interno del grafo della rete.

4.3. DEFINIZIONE E IMPORTAZIONE DELLE TRACCE GPS

Dopo aver terminato la fase di importazione della rete della città di Bologna e relative modifiche della stessa, si è proceduto ad importare i dati delle tracce GPS da accoppiare alla rete per il successivo processo di map-matching.

I dati importati sono stati raccolti nel mese di maggio nell'ambito dell'edizione 2016 dell'European Cycling Challenge.

I dati GPS generalmente sono forniti in formato *.gpx*, *GPS Exchange Formato*, in formato *.csv* (*Comma Separated Values*) o altri formati; ogni traccia è rappresentata da una successione ordinata di punti identificati dalle coordinate geografiche, dall'altitudine e dall'istante di rilevamento.

4.3.1. Definizione delle tracce GPS importate

Le tracce GPS importate all'interno del software e raccolte durante l'European Cycling Challenge del 2016, sono rese disponibili in formato .csv, un formato di file basato su un file testo utilizzato per l'importazione ed esportazione (ad esempio fogli elettronici o database) di una tabella di dati.

I dati importati infatti sono raccolti in un database suddiviso in due file:

- *File Points*
- *File Workout*

Il *file points* contiene tutti i dati GPS relativi alle posizioni occupate dagli utenti per ogni traccia e informazioni relative ai punti stessi: *TripID*, è il numero di riferimento del Trip a cui appartiene il punto GPS che sto considerando; *Time Stamp* è l'istante di rilevazione del punto GPS; *latitude*, *longitude*, *altitude* sono le coordinate geografiche di latitudine, longitudine e altitudine del punto GPS rilevato; *distance* è la distanza cumulativa di ogni punto rilevato a partire dal punto di partenza del percorso a cui tale punto appartiene; *Type* riguarda il tipo di punto GPS: se è un punto iniziale, intermedio o terminale del trip.

TripID,	TimeStamp,	Latitude,	Longitude,	Altitude,	Distance,	Speed,	Type
574ec13788c537476aa3e122,	1462896840,44.504102159122,	11.340799480677,	0,0,0,	start			
574ec13788c537476aa3e122,	1462896857.4757,44.50409,	11.34081,	0,0,0,	0015876986739800415,	0,	mid	
574ec13788c537476aa3e122,	1462896874.9515,44.50358,	11.34057,	0,0,0,	059785265883107924,	0,	mid	
574ec13788c537476aa3e122,	1462896892.4272,44.50358,	11.34057,	0,0,0,	mid			
574ec13788c537476aa3e122,	1462896909.9029,44.50295,	11.34029,	0,0,0,	07344752117499849,	0,	mid	
574ec13788c537476aa3e122,	1462896927.3786,44.50295,	11.34029,	0,0,0,	mid			
574ec13788c537476aa3e122,	1462896944.8544,44.50273,	11.34019,	0,0,0,	025702300780098334,	0,	mid	
574ec13788c537476aa3e122,	1462896962.3301,44.50248,	11.33985,	0,0,0,	038706392063405155,	0,	mid	
574ec13788c537476aa3e122,	1462896979.8058,44.50248,	11.33983,	0,0,0,	0015876986739800415,	0,	mid	
574ec13788c537476aa3e122,	1462896997.2816,44.50247,	11.33978,	0,0,0,	004116222819246454,	0,	mid	
574ec13788c537476aa3e122,	1462897014.7573,44.50241,	11.33964,	0,0,0,	012945900105182791,	0,	mid	
574ec13788c537476aa3e122,	1462897032.233,44.50232,	11.33954,	0,0,0,	012762400110111347,	0,	mid	
574ec13788c537476aa3e122,	1462897049.7087,44.50221,	11.33949,	0,0,0,	0128513255251352,	0,	mid	
574ec13788c537476aa3e122,	1462897067.1845,44.50207,	11.33951,	0,0,0,	015639321250803292,	0,	mid	
574ec13788c537476aa3e122,	1462897084.6602,44.502,	11.33955,	0,0,0,	008401311696517,	0,	mid	
574ec13788c537476aa3e122,	1462897102.1359,44.50197,	11.33958,	0,0,0,	004094292866629239,	0,	mid	
574ec13788c537476aa3e122,	1462897119.6117,44.50184,	11.33962,	0,0,0,	014791427005748115,	0,	mid	
574ec13788c537476aa3e122,	1462897137.0874,44.50184,	11.33962,	0,0,0,	mid			
574ec13788c537476aa3e122,	1462897154.5631,44.50161,	11.33967,	0,0,0,	0258660569493403,	0,	mid	
574ec13788c537476aa3e122,	1462897172.0388,44.50091,	11.33936,	0,0,0,	08158206987886425,	0,	mid	
574ec13788c537476aa3e122,	1462897189.5146,44.50086,	11.33934,	0,0,0,	005778531473523153,	0,	mid	
574ec13788c537476aa3e122,	1462897206.9903,44.50086,	11.33934,	0,0,0,	mid			
574ec13788c537476aa3e122,	1462897224.466,44.50008,	11.33899,	0,0,0,	09101573774459659,	0,	mid	
574ec13788c537476aa3e122,	1462897241.9418,44.50008,	11.33899,	0,0,0,	mid			

Figura 22- File Points

Il file *Workout* contiene invece i dati relativi ai *trips* effettuati dagli utenti della rete: *TripID* è il numero identificativo della traccia; *Time stamp* è l'istante di inizio dello spostamento; *Distance* è la distanza complessiva percorsa, espressa in km; *Duration* è la durata complessiva dello spostamento espressa in secondi; *Avg Speed/Max Speed* rappresentano la stima della velocità media e massima assunta dall'utente nel percorso, espresse rispettivamente in m/s e in km/h.

Possono essere presenti anche attributi relativi agli utenti che hanno compiuto gli spostamenti.

I file *workout* contengono una riga per ogni traccia caricata, rappresentativa dello spostamento; i file *points* invece sono formati da un numero di righe pari al numero di punti GPS rilevati.

Per ogni trip individuato nel file *Workout*, il file *Points* contiene- in ordine temporale progressivo- le informazioni relative a tutti i punti che lo descrivono; quindi, ai fini della successiva importazione delle tracce degli spostamenti all'interno di SUMOPY sono necessari entrambi i gruppi di dati in quanto i dati contenuti nel file *Points* fanno riferimento ai dati contenuti nel file *Workout*.

UserID	TripID	TimeStamp	Start DT	Distance	ECC	AvgSpeed	TrackType	Sex	Year	Profession	Frequent User	ZIP	Source	TypeOfBike	TypeOfTrip	Max Spd
57249bcd	57515edc88c537	1464945480	2016-06-0 4.75	4.75	10.16	urban bicycle	F	1999	Studente	yes			cy-web-gpx	MyBike	HomeToSchor	25.45
55308008	574ec13788c537	1464797040	2016-06-0 2.93	2.93	5.87	urban bicycle	F	1972	Worker	yes	40136	cy-web-gpx	--	--		0
5535586e	574f3c3688c537	1464796080	2016-06-0 8.95	8.95	7.84	urban bicycle	M	1973	Lavoratore	yes	40133	cy-web-gpx	MyBike	HomeToWork	34.08	
55508008	574ec12b88c537	1464781800	2016-06-0 3.75	3.75	14.99	urban bicycle	F	1972	Worker	yes	40136	cy-web-gpx	--	--		0
55508008	574ec11988c537	1464778980	2016-06-0 2.77	2.77	11.09	urban bicycle	F	1972	Worker	yes	40136	cy-web-gpx	--	--		0
55e5edf6	574e98c988c537	1464765060	2016-06-0 11.09	11.14	15.63	urban bicycle		1982		SI		cy-web-gpx	MyBike	HomeToWork	27.9	
5535586e	574e827688c537	1464762900	2016-06-0 6.05	6.05	-0.04	urban bicycle	M	1973	Lavoratore	yes	40133	cy-web-gpx	--	--		0
55508008	574ec10e88c537	1464761400	2016-06-0 3.6	3.6	8.65	urban bicycle	F	1972	Worker	yes	40136	cy-web-gpx	--	--		0
54eb9374	574e08f888c537	1464731810	2016-05-3 0.04	0.04	1.54	urban bicycle	M	1974	Worker	yes	40033	cy-android	MyBike	Other	2.94	
57234d3a	574e08f688c537	1464731679	2016-05-3 0.12	0.12	2.02	urban bicycle	M	1985	Worker	yes	40128	cy-android	MyBike	Leisure	3.15	
55446318	574e083588c537	1464730979	2016-05-3 3.18	3.18	16.86	urban bicycle	M	1977	postdoc	yes	40133	cy-android	MyBike	Leisure	30.6	
5729e28e	574e08c088c537	1464730971	2016-05-3 5.03	5.03	20.99	urban bicycle	M	#####	Studente	SI	40127	cy-android	MyBike	Other	36.9	
572b05c3	574e03c388c537	1464729692	2016-05-3 2.13	2.13	8.92	urban bicycle	F	1969	Lavoratore	yes	40134	cy-android	MyBike	Leisure	17.68	
5538b20e	574e03f688c537	1464729536	2016-05-3 0.01	0.01	3.15	urban bicycle	M	1958	Worker	yes		cy-windows	--	--		0
57234e3c	574e013f88c537	1464729170	2016-05-3 4.44	4.44	21.75	urban bicycle	M	1991	Studente	yes	40129	cy-android	MyBike	Leisure	32.4	
57234d3a	574e065288c537	1464729164	2016-05-3 9.15	9.15	16.12	urban bicycle	M	1985	Worker	yes	40128	cy-android	MyBike	Leisure	26.33	
5544db85	574e090088c537	1464728562	2016-05-3 2.22	2.22	11.83	urban bicycle		1965	teacher	yes		cy-android	--	--	23.63	
572f1868	574e0ab788c537	1464728522	2016-05-3 3.93	3.93	3536.53	urban bicycle	F	1968	Lavoratore	yes	40050	cy-android	--	--		18
5540e7b4	574e01ed88c537	1464728400	2016-05-3 2.69	2.69	10.76	urban bicycle	F	8/16/1990	Student	yes		cy-web-gpx	--	--		0
54e3ad1c	574e061788c537	1464728352	2016-05-3 3.97	3.97	11.44	urban bicycle	M	1977	Worker	yes	40138	cy-ios	--	--	22.1	
5549ee3e	574e016588c537	1464728290	2016-05-3 5.03	5.03	10.96	urban bicycle	M	1958	Impiegato	yes	40135	cy-ios	MyBike	Leisure	23.4	
5718069e	574e087e88c537	1464728152	2016-05-3 2.43	2.42	8.01	urban bicycle	M	1965		SI		cy-android	MyBike	Leisure	24.77	
5543df68	574e05e088c537	1464727953	2016-05-3 3.19	3.19	15.51	urban bicycle	M		Worker	yes		cy-android	MyBike	Other	22.25	
572657c8	574e07f88c537	1464727620	2016-05-3 7.77	7.77	13.33	urban bicycle	F			yes		cy-web-gpx	--	--		0

Figura 23-File Workout

4.3.2. Importazione delle tracce GPS all'interno di SUMOPy

In seguito all'importazione del grafo della rete è stato possibile importare le tracce GPS degli spostamenti degli utenti registrate durante l'European Cycling Challenge.

In fase di importazione dei dati è stato possibile effettuare una prima selezione dei dati in ingresso: in particolare, è possibile scegliere il modo di trasporto (autobus, auto, bici, etc.), il file workout e il file points da caricare e l'anno a cui fanno riferimento i dati importati; sono state prese in considerazione solo le tracce nei giorni lavorativi (dal lunedì al venerdì) e dalle 5 alle 11 del mattino.

Si è scelto di importare solo gli spostamenti effettuati nei giorni feriali in modo da considerare i viaggi sistematici dei ciclisti che si muovono da casa al lavoro o da casa all'università, ed escludere i viaggi occasionali che si verificano prevalentemente nel weekend in quanto risultano poco significativi al fine dello studio effettuato.

La scelta di considerare soltanto la fascia mattutina deriva dal fatto che si suppone che la mattina gli utenti si dirigano direttamente a lavoro o a scuola senza fare fermate intermedie ed è proprio nella fascia mattutina che i tempi d'attesa alle intersezioni risultano inferiori; nel pomeriggio, in genere, gli utenti tendono a fare delle fermate prima di tornare a casa e, in genere, non avendo fretta di tornare, i tempi d'attesa alle intersezioni risultano maggiori rispetto alla mattina, quando si suppone che gli utenti abbiano maggior premura nel voler raggiungere il posto di lavoro/studio il prima possibile.

Sono stati impostati anche dei valori di distanza massima e minima; il valore massimo, impostato pari a 25000m, è stato specificato perché in genere, oltre una certa distanza è probabile che il ciclista sia salito su un altro mezzo di trasporto dimenticando di disattivare l'applicazione del proprio dispositivo di rilevazione GPS o che abbia fatto attività sportiva non interessante per l'analisi; il valore minimo, impostato pari a 100m, è stato specificato perché spostamenti inferiori alla soglia minima non sono significativi al fine dell'analisi. Per gli stessi motivi

sopra elencati, sono state fissate anche delle sogli minime (30s) e massime (7200s) di durata degli spostamenti.

È stato fissato anche un intervallo di velocità per la necessità di considerare solamente le tracce registrate dagli utenti in bicicletta: in particolare, il limite inferiore ha l'obiettivo di eliminare tutte le tracce compiute a piedi piuttosto che in bicicletta mentre il limite superiore permette di escludere le tracce la cui velocità è troppo elevate per essere riconducibile ad uno spostamento in bicicletta. Di seguito è riportata la finestra di dialogo per l'importazione delle tracce GPS e i relativi filtri applicati.

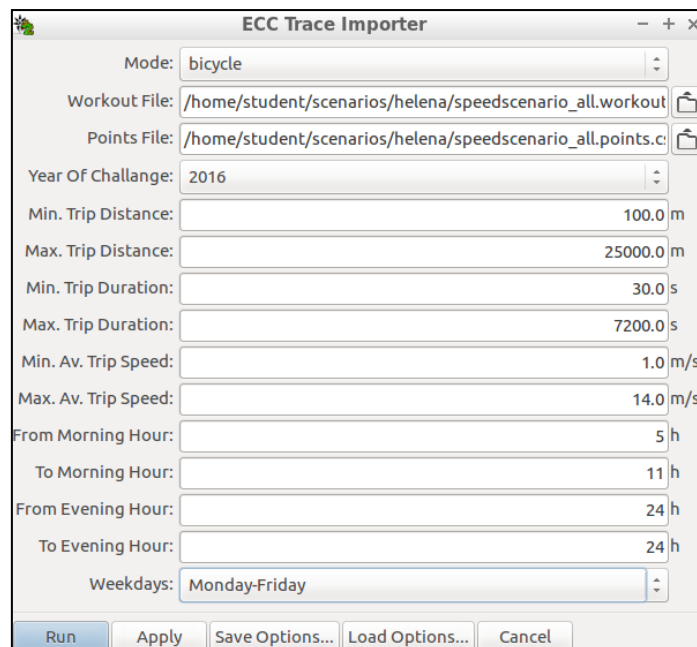


Figura 24-Finestra di dialogo ECC Trace Importer

4.3.3. Rappresentazione delle tracce GPS all'interno di SUMOPy

Tutte le informazioni relative ai trips importati all'interno di SUMOPy sono visualizzabili nello scenario di riferimento in forma *numerica* e in forma *grafica*.

➤ *Rappresentazione numerica*

I dati importati sono suddivisi in tre database, organizzati in tabelle, denominati *points*, *trips*, *persons*.

Il database *points* contiene tutte le informazioni relative ai punti GPS importati (TripId, Latitudine, Longitudine, Altitudine, etc.);

	Lon [deg]	Lat [deg]	Alt [m]	Radius [m]	x,y,z [m]	t [s]	Trip ID
1	11.331500	44.503651	155.000000	10.000000	[6094.4048	015.000000	1
2	11.331720	44.503761	128.000000	10.000000	[6111.5669	031.000000	1
5	11.331400	44.503830	119.000000	10.000000	[6085.8765	063.000000	1
6	11.330650	44.504002	105.000000	10.000000	[6025.7451	073.000000	1
7	11.330190	44.504089	104.000000	10.000000	[5988.8501	078.000000	1
8	11.329480	44.504219	101.000000	10.000000	[5932.0361	089.000000	1
9	11.328040	44.504471	95.000000	10.000000	[5816.7651	103.000000	1
10	11.327460	44.504559	93.000000	10.000000	[5770.3945	108.000000	1
11	11.326990	44.504608	92.000000	10.000000	[5732.8633	113.000000	1
12	11.325720	44.503429	89.000000	10.000000	[5635.6118	139.000000	1
13	11.325600	44.503170	88.000000	10.000000	[5626.8799	146.000000	1
14	11.325490	44.502861	90.000000	10.000000	[5619.1382	151.000000	1
15	11.325050	44.502209	95.000000	10.000000	[5586.251	168.000000	1
16	11.323600	44.502232	95.000000	10.000000	[5470.8667	187.000000	1
17	11.322540	44.502010	96.000000	10.000000	[5387.3369	203.000000	1
18	11.321740	44.501431	92.000000	10.000000	[5325.5596	220.000000	1
19	11.321730	44.501389	92.000000	10.000000	[5324.8584	225.000000	1
24	11.321370	44.500858	89.000000	10.000000	[5297.9497	282.000000	1
25	11.321300	44.500759	90.000000	10.000000	[5292.6523	287.000000	1
26	11.320800	44.500061	90.000000	10.000000	[5255.1279	298.000000	1
27	11.320330	44.499310	93.000000	10.000000	[5220.1216	315.000000	1
28	11.320160	44.499001	92.000000	10.000000	[5207.6006	320.000000	1
29	11.319880	44.498550	93.000000	10.000000	[5186.73	331.000000	1
30	11.319450	44.498051	93.000000	10.000000	[5154.188	344.000000	1
31	11.319320	44.497761	93.000000	10.000000	[5144.7148	349.000000	1
32	11.318890	44.497181	94.000000	10.000000	[5112.3486	363.000000	1
33	11.318090	44.496922	98.000000	10.000000	[5049.6289	384.000000	1
34	11.317530	44.496780	96.000000	10.000000	[5005.4917	393.000000	1
35	11.317270	44.496731	94.000000	10.000000	[4985.0244	398.000000	1
36	11.316480	44.496490	99.000000	10.000000	[4922.9263	411.000000	1
37	11.315550	44.496399	101.000000	10.000000	[4849.2896	427.000000	1
38	11.315300	44.496410	100.000000	10.000000	[4829.3882	432.000000	1
39	11.314300	44.496300	104.000000	10.000000	[4740.5381	448.000000	1

Figura 25-Database Points

Il database *Trips* contiene tutte le informazioni presenti nel file *workout* importato e relative ai viaggi compiuti dagli utenti della rete (TripId, ID GPS Trip, Timestamp, GPS Duration, Gps distance, etc.);

➤ *Rappresentazione grafica*

Graficamente è possibile visualizzare facilmente i punti GPS, evidenziati in giallo, importati nello scenario. Cliccando su un punto GPS, a sinistra del grafo, vengono evidenziate le informazioni relative al punto GPS selezionato, precedentemente descritte nel database *Points*. Sono inoltre evidenziate le informazioni relative al trip cui il punto GPS selezionato appartiene.

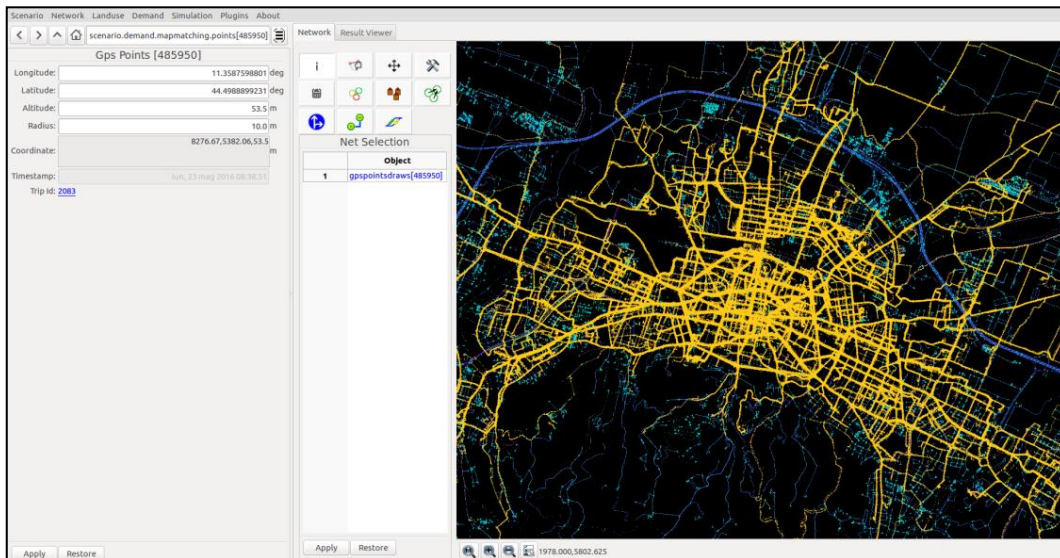


Figura 28-Visualizzazione grafica

4.3.4. Selezione geometrica dei dati

Terminata l'importazione dei dati, è stato necessario eseguire una fase di *clean* delle tracce importate mediante l'applicazione di un filtro geometrico che permette la selezione degli spostamenti significativi tra quelli disponibili.

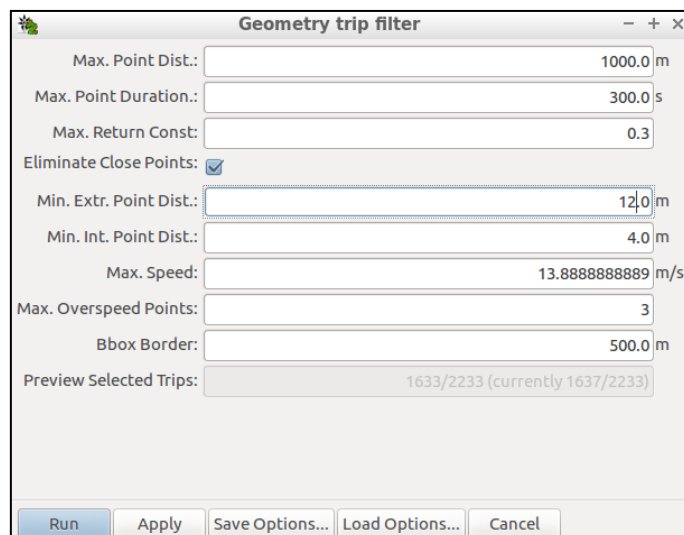


Figura 29-Finestra di dialogo per la selezione geometrica

Per *Max Point Distance* s'intende la distanza massima tra due punti GPS di uno stesso trip superata la quale, la relativa traccia viene esclusa dalle analisi da svolgere. Se non sono presenti punti intermedi all'interno di questo intervallo, l'algoritmo ricostruisce il percorso di minima distanza congiungente i punti estremi dell'intervallo.

Può verificarsi infatti che per un certo intervallo spaziale non siano presenti punti GPS e questo dipende principalmente da un'interruzione del segnale dovuta alla presenza di edifici o al fatto che il ricevitore solitamente è posto in borse o zaini e questo comporta errori di misurazione.

Si assume quindi un valore massimo ammissibile di distanza tra due punti GPS di uno stesso trip pari a 1km in quanto si assume che l'itinerario di minimo costo (*shortest path*) congiungente i due punti estremi dell'intervallo definito, sia coincidente con quello realmente scelto dall'utente; per distanze superiori questa condizione non è garantita.

Max Point Duration rappresenta l'intervallo temporale massimo tra due punti GPS successivi di uno stesso trip; si assume un valore massimo pari a 300 secondi, tempo oltre il quale l'utente potrebbe essersi fermato per motivi che non dipendono dalle condizioni del traffico o dall'attesa al semaforo.

Il parametro *Max Return Const.* permette di elidere le tracce che descrivono spostamenti scomponibili in due o più tratte caratterizzate dal fatto che l'autore dello spostamento, dopo essere giunto alla sua prima destinazione, intesa come il punto più lontano rispetto alla sua origine, ripercorre parte del tragitto già fatto, per giungere alla sua destinazione successiva, ovvero quella finale dello spostamento.

Il suo valore è impostato pari a 0,3 e rappresenta la massima quota parte di distanza di ritorno ammissibile calcolata a partire dal punto più lontano occupato dall'utente rispetto alla posizione di origine, per il raggiungimento della destinazione finale: se l'utente torna indietro per un tratto superiore al 30% della distanza totale percorsa fino a quel momento, la traccia che ne definisce lo spostamento viene eliminata.

In questo caso infatti, il motivo dello spostamento non è deducibile in modo chiaro e il procedimento di calcolo dell'itinerario di minima distanza congiungente l'origine e la destinazione finale non avrebbe più senso.

I valori definiti in *Max Speed e Max Overspeed points* permettono di stabilire il limite massimo della velocità media assunta nel corso dello spostamento eseguito dal ciclista e il numero massimo di punti GPS della traccia per cui tale limite può essere superato senza che la traccia venga eliminata.

I valori impostati sono pari a *14m/s* per la velocità e a 3 posizioni in cui si ammette che tale valore possa essere superato. Il mancato rispetto delle restrizioni indicate comporta l'eliminazione della traccia di spostamento corrispondente.

Attraverso la selezione dell'opzione *Eliminate Close Points*, è stata apportata una selezione geometrica oltre che sui viaggi, *trip*, anche sui singoli punti GPS importati all'interno di SUMOpy.

Il parametro *Min. Int. Point Dist.* indica la distanza minima tra i punti GPS appartenenti ad una stessa traccia. I punti GPS di una stessa traccia aventi distanza inferiore a 4 metri, vengono eliminati.

Il parametro *Min. Extr. Point Dist.* indica il valore minimo di distanza di tutti i punti di localizzazione dal punto GPS di estremità, inteso come il primo o l'ultimo punto GPS contenuto all'interno del buffer dell'arco a cui viene attribuito per l'inizio o la fine del percorso matchato; i punti aventi distanza dal punto GPS di estremità inferiore al valore impostato posto pari a 12m, vengono eliminati.

In questo modo vengono assegnati alla rete solo i punti, qualora presenti, con distanziamento maggiore di questa distanza dagli estremi, per essere certi che essi siano rappresentativi di un reale cambiamento di posizione o direzione dell'utente. L'eliminazione di questi punti GPS troppo ravvicinati è importante perché, nei casi in cui l'utente che sta tracciando lo spostamento si ferma in corrispondenza di un'intersezione o attraversamento, il dispositivo mobile continua a registrare punti di localizzazione GPS relativi ad una posizione che rimane invariata per un certo intervallo temporale ma che, nella pratica assumono valori sempre leggermente diversi a causa degli errori intrinseci del sistema di posizionamento GPS.

Questo comporta la formazione di una nuvola di punti GPS molto ravvicinati che può portare ad errori del procedimento di map-matching dovuti al fatto che, l'algoritmo, in presenza di intersezioni complesse, potrebbe attribuire i punti GPS ad archi non appartenenti al percorso realmente scelto dall'utente.

Il parametro *Bbox Border* consente di mantenere solo le tracce all'interno del riquadro di delimitazione della rete a meno di una distanza dal bordo specificata.

Attraverso l'applicazione del procedimento di map-matching dei dati GPS è possibile procedere alla fase di ricostruzione degli itinerari percorsi dai ciclisti all'interno dell'area urbana di Bologna.

Gli algoritmi di map-matching, shortest path routing e fastest path routing permettono di ricostruire, a partire dai *trips*, gli itinerari, *routes*, intesi come la successione di tutti gli archi progressivamente occupati dagli utenti per andare dall'origine alla destinazione dello spostamento.

CAPITOLO 5- RICOSTRUZIONE DEGLI ITINERARI ***PERCORSI DAGLI UTENTI E RISPETTIVI*** ***ITINERARI DI MINIMO COSTO***

In seguito all'importazione e definizione dei dati di input, quali il grafo della rete e i punti GPS, è stato possibile applicare il procedimento di map-matching per la ricostruzione degli itinerari percorsi dagli utenti a partire dai dati ottenuti dall'Europea Cycling Challenge.

L'algoritmo di map-matching permette di ricostruire, a partire dai *trip*, gli itinerari, *routes*, intesi come la successione di tutti gli archi progressivamente occupati dagli utenti per andare dall'origine dello spostamento alla destinazione.

Affinché gli itinerari ricostruiti attraverso il procedimento di map-matching fossero quanto più rappresentativi dei tracciati realmente percorsi dagli utenti, sono stati assegnati diversi valori ai parametri di input e il procedimento di map-matching è stato ripetuto più volte fino ad ottenere un valore del *length index* quanto più vicino al 100% per la maggior parte delle tracce analizzate.

Una volta terminato il procedimento di map-matching è stato possibile ricostruire anche gli itinerari di minimo costo ed in particolare *shortest path* (percorso più breve) e *fastest path* (percorso più veloce).

A partire dai dati contenuti all'interno del *file workout* e il *file points* è possibile definire la domanda di trasporto ciclabile, in termini di *trips* compiuti dagli utenti della rete e a partire da questi è possibile ricostruire gli itinerari di minimo costo (*shortest path routing, fastest path routing*).

Di seguito vengono definiti i parametri di input dell'algoritmo di map-matching, di *shortest path routing* e *fastest path routing*, i procedimenti applicati per la generazione degli itinerari e i risultati ottenuti .

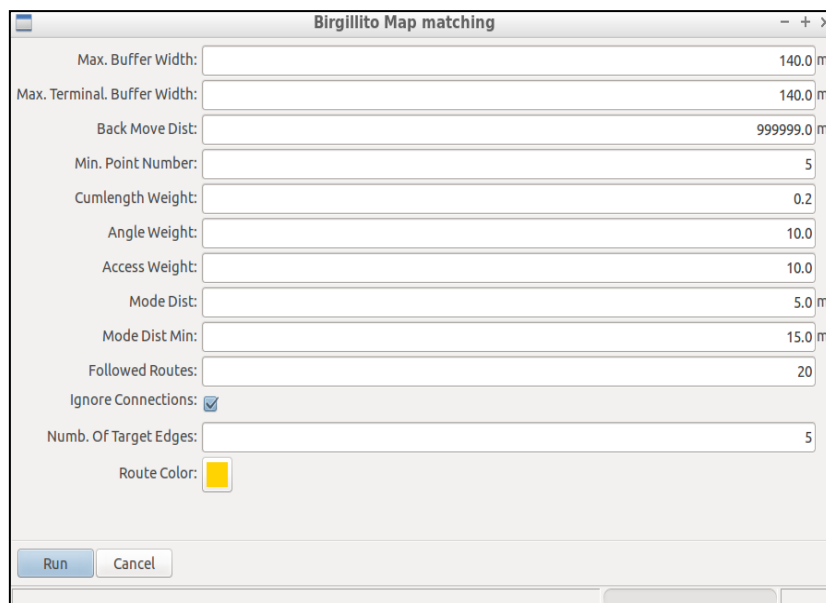
5.1. PARAMETRI DI MAP-MATCHING

L'algoritmo di map-matching è applicato su tutte le tracce mantenute e selezionate in seguito all'applicazione del filtro geometrico precedentemente attuato.

L'algoritmo di map-matching implementato all'interno di SUMOPy per analizzare i dati GPS raccolti è quello sviluppato dall'Ing. Birgillito come evoluzione dell'algoritmo ideato da Marchal e successivamente modificato dall'Ing. Schweizer.

Prima dell'avvio del procedimento di map-matching, il software permette di fissare manualmente i parametri di input dell'algoritmo in modo da calibrare il peso da attribuire a ciascuna delle variabili che intervengono nel calcolo del punteggio, *score*, da assegnare, ad ogni passo successivo, agli itinerari potenzialmente seguiti dall'utente della traccia analizzata, per determinare, al termine del procedimento, quello con la maggior probabilità di essere scelto.

I parametri di input dell'algoritmo da fissare sono di seguito descritti:



The screenshot shows a dialog box titled "Birgillito Map matching" with the following parameters and values:

Parameter	Value
Max. Buffer Width:	140.0 m
Max. Terminal Buffer Width:	140.0 m
Back Move Dist:	999999.0 m
Min. Point Number:	5
Cumlength Weight:	0.2
Angle Weight:	10.0
Access Weight:	10.0
Mode Dist:	5.0 m
Mode Dist Min:	15.0 m
Followed Routes:	20
Ignore Connections:	<input checked="" type="checkbox"/>
Numb. Of Target Edges:	5
Route Color:	Yellow

At the bottom of the dialog box, there are two buttons: "Run" and "Cancel".

Figura 30-Parametri di Map-matching

I parametri assumono il seguente significato:

Il parametro *Max. Buffer Width* definisce il raggio di ampiezza della regione di influenza di ciascun edge del grafo della rete.

Il parametro *Max. Terminal. Buffer Width* rappresenta la larghezza massima del buffer dell'arco terminale e permette di considerare, nella fase iniziale, quando vengono determinati i potenziali archi iniziali e finali, solo gli archi aventi distanza dall'ultimo punto GPS inferiore alla larghezza del buffer terminale.

Può succedere che, a causa di una falsa proiezione, risulti che un punto GPS anziché muoversi in avanti, torna indietro e questo valore di distanza, *Back Move Dist.*, permette di capire se effettivamente l'utente che sta percorrendo quella determinata traccia sta tornando indietro oppure no.

Min. Point Number rappresenta il numero minimo di punti GPS che deve essere presente, per ciascuna traccia, perché venga applicato il procedimento del map-matching su di essa;

Il parametro *Cumlength Weight* è impostato per fare in modo che l'algoritmo cerchi di minimizzare la lunghezza totalmente percorsa dal nodo di origine fino al punto raggiunto a ciascun passo di analisi;

Il parametro *Angle Weight* rappresenta il peso che viene attribuito dall'algoritmo alla componente del costo dell'arco legata alla similitudine fra la direzione dell'arco e la traiettoria di punti GPS successivi, per premiare il parallelismo e penalizzare il perpendicolarismo tra di essi.

L'*Access Weight* rappresenta invece il peso da moltiplicare per il livello di accesso di ciascun arco in modo da determinare la componente da sottrarre al costo calcolato per lo stesso. Nel caso di piste ciclabili, il livello d'accesso sarà maggiore per l'arco ad accesso riservato esclusivo dei ciclisti.

Per *Followed Routes* s'intende il numero totale di itinerari che viene seguito in parallelo nel corso dello svolgimento dell'algoritmo per la determinazione di quello con la maggior probabilità di essere quello realmente seguito dall'utente.

Il *Numb. Of Target Edges* rappresenta il numero massimo di itinerari per gli archi di destinazione e limita il numero di itinerari per il collegamento dei punti GPS. I valori dei parametri di input impostati derivano da analisi svolte dall'Ing. Birgillito e dall'Ing. Schweizer in fase di costruzione e calibrazione del modello.

5.2. ITINERARI DI MINIMO COSTO

Per ogni traccia restituita in output dall'algoritmo di map-matching è stato calcolato il percorso di minimo costo in termini di percorso più breve, *shortest path routing* e percorso più veloce, *fastest path routing* corrispondente. Anche per gli itinerari di minimo costo il software permette di definire le variabili di input del procedimento.

5.2.1. Parametri di *shortest path routing*

Per la ricostruzione degli itinerari più brevi i parametri da fissare sono i seguenti:

- *Mode Constant*: è una costante moltiplicativa applicata alla lunghezza degli edges della rete ad accesso esclusivo dei ciclisti per ridurre la lunghezza degli archi della rete ad uso esclusivo dei ciclisti;
- *Mode Dist.*: è un valore numerico sottratto alla lunghezza dell'arco, in fase di calcolo dei costi, per ridurre il costo degli archi della rete ad uso esclusivo dei ciclisti;
- *Mode Dist. Min*: lunghezza minima dell'arco ad accesso esclusivo dei ciclisti.

Inoltre, selezionando l'opzione *Ignore Connections* si ipotizza che, nonostante il grafo sia orientato, le biciclette possano compiere tutte le manovre possibili, comprese quelle non consentite, per passare da un arco a quello successivo della rete.

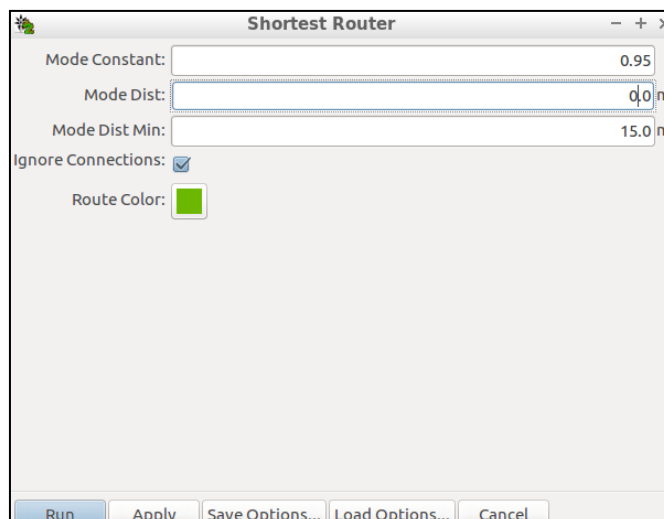


Figura 31-Parametri di Shortest Path Routing

5.2.2. Parametri di fastest path routing

Per la ricostruzione degli itinerari di minimo costo, in termini di tempo, i parametri da fissare sono i seguenti:

- *Mode Constant*;
- *Mode Time.*: è un valore numerico moltiplicato per l'access-level e sottratto al tempo di percorrenza dell'arco, in fase di calcolo dei costi, per ridurre il costo degli archi della rete ad uso esclusivo dei ciclisti;
- *Mode Dist. Min*;

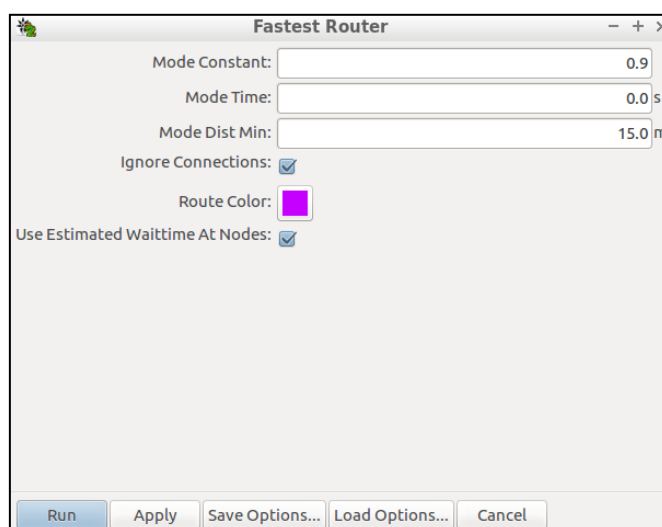


Figura 32-Parametri di Fastest Path Routing

5.3. OUTPUT DEL ROUTING

In seguito al procedimento di map-matching è stato possibile passare dai trips importati alla ricostruzione degli itinerari, *matched routes*, aventi la massima probabilità di essere quelli realmente percorsi dagli utenti, ottenuti accoppiando i punti GPS e i corrispondenti itinerari di minimo costo, *shortest path routing* e *fastest path routing*.

Per ogni traccia, vengono identificati un *ID Matched Route*, un *ID Shortest Route* e un *ID Fastest Route*.

I risultati ottenuti in seguito ai processi di routing sono visualizzabili, sotto forma di tabelle esportabili in formato .csv.

Il software, per ogni traccia analizzata, fornisce i seguenti dati di output:

- *ID matched route*;
- *ID shortest route*;
- *L match GPS[m]*: lunghezza della parte di tracciato identificato dalla successione di punti GPS che è stata accoppiata alla rete nel corso del procedimento eseguito, ottenuta per interpolazione lineare fra i punti GPS stessi.
- *L match [m]*: lunghezza della parte di tracciato GPS che è stata associata alla rete nel corso del procedimento eseguito, ottenuta dalla somma della lunghezza degli archi appartenenti all'itinerario ricostruito, compreso fra il primo e l'ultimo punto GPS assegnato alla rete;
- *T match [s]*: durata della quota parte di tracciato GPS analizzato che è stato accoppiato alla rete mediante il processo di map-matching, calcolata come la differenza fra gli istanti di rilevamento, timestamps, del primo e dell'ultimo punto GPS dell'itinerario ricostruito.
- *L short [m]*: lunghezza del percorso di minimo costo (minima distanza) che collega il primo e l'ultimo arco dell'itinerario ricostruito nel corso del map-matching;

- *L match mix [m]*: quota parte della “L match” data dalla somma della lunghezza di tutti gli archi ad accesso misto presenti nell’itinerario ricostruito, che collega il primo e l’ultimo punto GPS assegnati alla rete;
- *L match excl [m]*: quota parte della “L match” data dalla somma della lunghezza di tutti gli archi ad accesso esclusivo presenti nell’itinerario ricostruito, che collega il primo e l’ultimo punto GPS assegnati alla rete;
- *Length index [%]*: rapporto percentuale fra la lunghezza dell’itinerario contenente tutti gli archi *matchati* sulla rete e la lunghezza del corrispondente itinerario ottenuto congiungendo i punti GPS disponibili. L’esito ottimale del procedimento di map-matching dovrebbe produrre valori dell’*Indice di Lunghezza* prossimi al 100%, valori superiori indicano che l’algoritmo ha ricostruito un percorso più lungo di quello effettivamente compiuto e viceversa valori di Length Index inferiori al 100% indicano che il percorso ricostruito è più breve di quello tracciato.
- *Distance Error [mm]*: valore medio di distanza fra i punti GPS che compongono la traccia analizzata e gli archi che appartengono al corrispondente itinerario ricostruito sulla rete. È calcolato sulla base della distanza geometrica perpendicolare fra points ed edges, mediata sulla totalità dei punti relativi allo spostamento;
- *Computation Time [ms]*: tempo computazionale impiegato dall’algoritmo per la generazione del matched route;
- *Matched connected*: valore di verità che indica se l’itinerario ricostruito nel corso del procedimento di map-matching collega il primo e l’ultimo arco della rete, edge, a cui è stato possibile assegnare un punto GPS.

	ID matched route	ID shortest route	L match GPS [m]	L match [m]	T match [s]	L short [m]	L match mix [m]	L match excl [m]	Length index [%]	Distance error [mm]
1	1	6187	11109.578125	10201.054688	2602.000000	9843.443359	1564.257080	2383.804199	91.822159	7257.510742
2	2	6188	3471.338623	3189.722168	1486.956543	2636.998779	788.839478	12.161840	91.887383	9800.535156
4	3	6189	9515.001953	8789.099609	1792.340454	8297.839844	4361.160645	874.465149	92.370964	4058.656250
5	4	6190	2470.364746	2109.018311	959.000000	2241.504883	665.136841	1202.743042	85.372757	7467.142578
6	5	6191	2950.537109	2732.045654	2500.000000	2802.591797	1976.321289	0.000000	92.594864	8622.335938
7	6	6192	1025.669434	925.586182	278.000000	975.430420	812.701355	0.000000	90.242149	11173.892578
8	7	6193	1036.768799	981.951050	291.666656	900.666504	0.000000	219.496078	94.712631	4149.000000
9	8	6194	3041.022705	3544.823975	813.000000	3035.331055	444.260193	463.723785	116.566833	9170.093750
11	10	6195	3489.519531	3469.478760	985.000000	3340.387695	2575.895752	199.363800	99.425690	5140.372559
12	11	6196	2403.014160	2335.822998	545.000000	2091.408691	1494.479614	706.973267	97.203880	12883.479492
14	12	6197	3669.516357	3269.136230	949.000000	1247.988525	1047.761230	1782.143311	89.089020	5060.020508
15	13	6198	2261.902832	2105.104980	511.000000	1879.936523	802.808533	676.091614	93.067879	14535.274414
16	14	6199	3736.140625	3289.372070	756.000000	2795.102051	519.452148	1102.293579	88.041977	5407.007812
17	15	6200	5345.498047	5119.516113	2561.000000	4772.680176	674.851440	363.007874	95.772484	8324.415039
19	17	6201	5112.266602	4668.823242	1272.000000	4002.078613	951.116821	1043.961304	91.325897	9049.708008
20	18	6202	3759.725586	3526.351318	1100.000000	3466.643066	406.598083	1744.876221	93.792786	5481.169922
21	19	6203	1654.778687	1624.423706	384.000000	1519.934082	263.226746	45.473274	98.165619	4279.956053
22	20	6204	2800.100342	2565.433594	881.250000	2593.901123	1552.840454	143.974960	91.619347	3464.888428
23	21	6205	3192.967285	2765.599365	1118.000000	2635.886475	656.224670	1812.355225	86.615341	8324.415039
24	22	6206	7018.890625	7389.406250	1790.816284	245.445679	1500.256104	2443.804199	105.278839	4425.354004
25	23	6207	7097.144531	5759.418457	2661.000000	2613.870850	1858.451050	2696.779297	81.151207	10171.213867
26	24	6208	12057.363281	10434.774414	9303.000000	2567.894531	2757.632812	5731.446289	86.542755	10826.466797
29	26	6209	4362.983398	4290.043457	948.000000	4345.753906	1312.591431	844.254150	98.328209	4633.802246
30	27	6210	1339.320801	1165.713867	475.000000	1121.205811	354.837372	413.177368	87.037689	14006.035156
32	29	6211	4309.986816	3936.237061	1066.000000	3757.670654	1727.650635	1344.964111	91.328285	3784.096688
33	30	6212	2896.751465	2744.560059	710.000000	1900.808472	1469.652588	171.804886	94.746132	9319.953125
34	31	6213	4392.373047	4114.702637	1095.000000	3945.915039	2636.110596	791.420715	93.678352	4021.050049

Figura 33-Output numerico del routing

In seguito ad un'analisi dei risultati dell'algorithm di map-matching è stata individuata la presenza di indici di lunghezza molto distanti dal valore ottimale 100%; questo ha permesso di evidenziare e correggere alcuni errori compiuti dall'algorithm e modificare i pesi assegnati ai parametri utilizzati dallo stesso per calcolare i costi da assegnare agli archi appartenenti agli itinerari potenzialmente utilizzabili dagli utenti.

Sono state effettuate varie elaborazioni prima di giungere ad un'ulteriore calibrazione dell'algorithm.

I valori dei parametri impostati, sono quelli che hanno consentito di massimizzare il numero delle tracce correttamente ricostruite e ridurre i valori di *Length Index* e *Distance Error* ottenuti.

In seguito ai nuovi valori impostati di *Mode Dist.* e *Mode Dist. Min* è stata nuovamente valutata la percentuale di tracce che presentava un *length index* maggiore del 160% e si è visto che nel 2016 solo il 9,1% delle tracce analizzate,rispetto al 23% valutato precedentemente con altri valori del *Mode Dist.* e *Mode Dist. Min.*, presentava un *length index* elevato.

Gli itinerari ricostruiti dal software sono visualizzabili anche in forma grafica direttamente sulla mappa: per ciascun trip selezionato nel menu *browse* , sono visibili in colore giallo la traccia del matched route ,in colore verde la traccia del

corrispondente shortest route e in magenta la traccia del corrispondente fastest path route.

Nella figura che segue è mostrato un esempio grafico di output del routing ed in particolare, in figura 34 sono rappresentati i punti GPS di una traccia importata e in figura 35, a sinistra, è rappresentata la stessa traccia GPS matchata e a destra, per la stessa traccia sono raffigurati gli itinerari di minimo costo; gli itinerari *matched* e *shortest* risultano perfettamente sovrapposti mentre, l'itinerario *fastest* si sovrappone agli altri due solo per il tratto iniziale e finale dell'itinerario.

Inoltre, il *length index*, per la traccia rappresentata risulta pari al 103% il che vuol dire che il processo di map-matching ha generato un percorso non molto diverso da quello realmente percorso dall'utente, rappresentato in figura 34.

Questo dipende dal fatto che i punti GPS, visibili in figura, sono molto ravvicinati e allineati all'asse stradale (e quindi il dispositivo utilizzato per la rilevazione è sicuramente dotato di elevata precisione) e che la rappresentazione della rete è coerente con la rete reale e quindi l'algoritmo di map-matching funziona perfettamente.



Figura 34-Rappresentazione grafica di punti GPS di una singola traccia



Figura 35- A sinistra, matched route in giallo; a destra, shortest path in verde e fastest path in magenta, di una singola traccia



Figura 36- Rappresentazione grafica di punti GPS di tutte le tracce importate dell'European Cycling Challenge

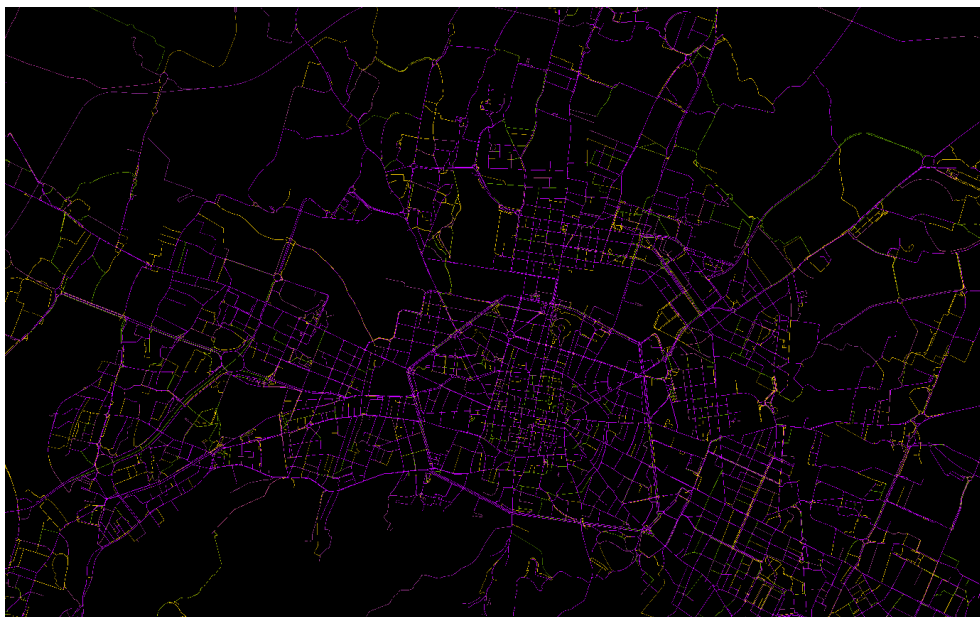


Figura 37-Output grafico del routing per tutte le tracce importate dell'Europea Cycling Challenge

5.4. POST MATCHING FILTER

In seguito al processo di map-matching, sono stati presi in considerazione solo i trips corrispondenti a determinati criteri, per evitare di comprendere nelle valutazioni dati riferiti a itinerari ricostruiti non rappresentativi del reale comportamento degli utenti.

La selezione delle tracce si basa essenzialmente sulla base dei valori di *Length Index* e del *Distance Error*, e con riferimento alla fascia oraria d'interesse e all'intervallo di velocità medio consentito, già impostato in precedenza con l'applicazione del filtro geometrico. I parametri da fissare sono i seguenti:

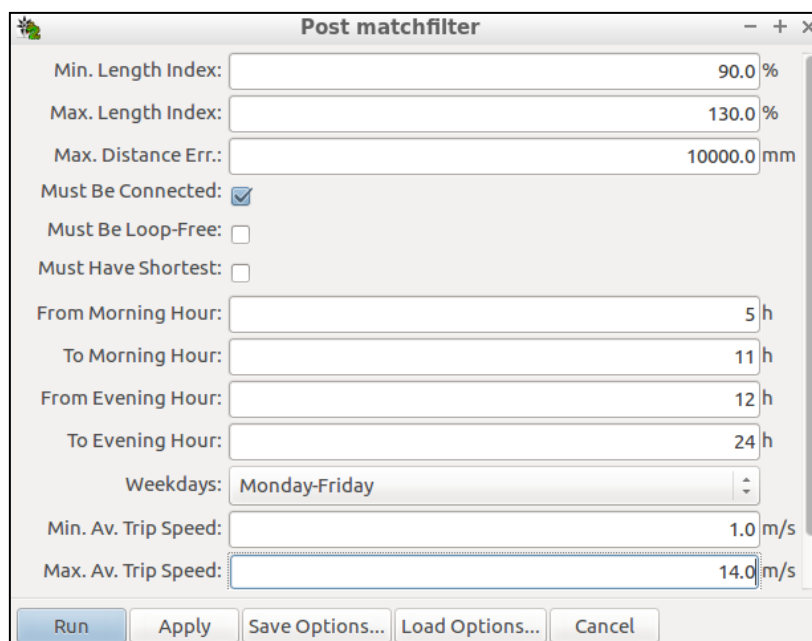


Figura 38-Filtro post matching

- *Min. Length Index*:valore minimo dell'indice di lunghezza considerato accettabile 90%;
- *Max. Length Index*:valore massimo dello'indice di lunghezza considerato accettabile 130%;
- *Max. Distance Err.*:valore massimo di errore di distanza medio fissato pari a 10000m;
- *Must be connenct*:indica che l'itinerario matchato deve connettere il primo e l'ultimo arco dell'itinerario identificato
- *Must be Loop-Free*: selezionando questa opzione, l'itinerario matchato deve essere privo di anelli ovvero tutti gli archi si ripetono una sola volta
- *Must Have Shortest*:selezionando questa opzione vengono selezionati i percorsi più brevi esistenti.
- *Min. Av.Trip Speed [m/s]*: indica il valore minimo di velocità media di percorrenza; tutti i trip la cui velocità media è inferiore a 1m/s non vengono importati;
- *Max. Av.Trip Speed [m/s]*: indica il valore massimo della velocità media di percorrenza; tutti i trip la cui velocità media supera i 14m/s non vengono importati;

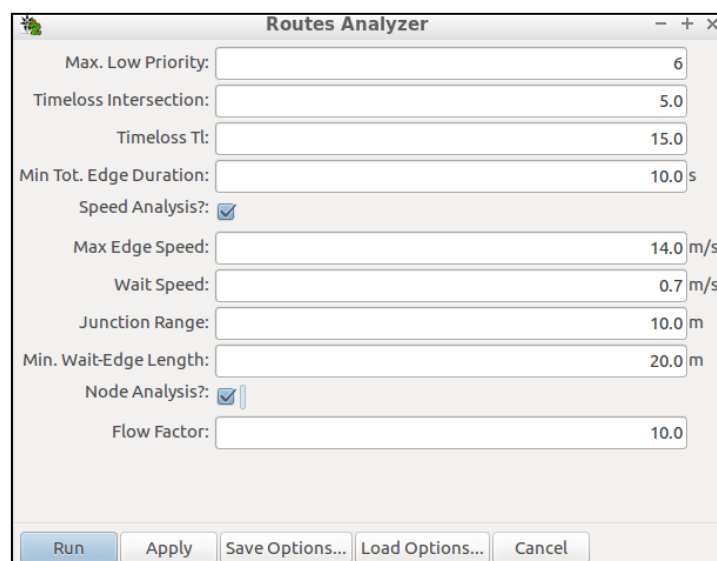
- *From / to morning hour [h]- From / to evening hour [h]*:indica l'intervallo temporale del mattino- sera di cui si vuole analizzarne i valori;
- *Weekdays*:da questo menu a tendina è possibile selezionare i giorni di interesse per effettuare l'analisi;
- *Preview Selected Trips*:indica il numero di trips, rispetto a quelli matchati, che vengono selezionati dal filtro *post matchfilter*

CAPITOLO 6- ANALISI DEGLI ITINERARI

In seguito al procedimento di map-matching , shortest path routing e fastest path routing è stato possibile proseguire con un analisi degli itinerari così ottenuti al fine di ottenere i valori dei tempi medi d'attesa dei ciclisti alle intersezioni su tutta l'area Urbana di Bologna. In particolare, in seguito all'analisi è stato possibile studiare due specifiche intersezioni semaforizzate, Porta San Felice e Porta San Donato, al fine di confrontare i risultati ottenuti dal software con i rilievi manuali forniti dal Dipartimento DICAM- Trasporti dell'Università di Bologna, per poter poi ottenere una relazione generale per la valutazione dei tempi medi d'attesa dei ciclisti alle intersezioni semaforizzate. L'analisi degli itinerari, *Route Analysis*, permette di analizzare tutti gli itinerari generati dal processo di routing (*matched route*, *shortest route* e *fastest route*) che non sono stati eliminati dal *filtro post-matching*. Per eseguire l'analisi il software richiede dei dati di input.

6.1. PARAMETRI DI INPUT DELL'ANALISI

I valori definiti in input alla *route analysis*, sono di seguito riportati e in figura 39 viene mostrata la finestra di dialogo per la definizione di tali parametri:



The screenshot shows a dialog box titled "Routes Analyzer" with the following parameters and values:

Parameter	Value
Max. Low Priority:	6
Timeloss Intersection:	5.0
Timeloss Tl:	15.0
Min Tot. Edge Duration:	10.0 s
Speed Analysis?:	<input checked="" type="checkbox"/>
Max Edge Speed:	14.0 m/s
Wait Speed:	0.7 m/s
Junction Range:	10.0 m
Min. Wait-Edge Length:	20.0 m
Node Analysis?:	<input checked="" type="checkbox"/>
Flow Factor:	10.0

At the bottom of the dialog box, there are five buttons: "Run", "Apply", "Save Options...", "Load Options...", and "Cancel".

Figura 39- Parametri di input dell'analisi

Il valore del *Max. Low Priority* pari a 6 indica che, per il calcolo della distanza totale percorsa, vengono presi in considerazione solo gli archi aventi livello di priorità inferiore o uguale a 6 ovvero itinerari ricostruiti su strade a bassa priorità.

Il *Timeloss Intersection* rappresenta il tempo perso (medio) alle intersezioni dovuto o a una riduzione della velocità in corrispondenza di un'intersezione o ad un tempo d'attesa; questo valore è impostato pari a 5 secondi.

Il *Timeloss TL*, impostato pari a 15 secondi, rappresenta il tempo perso medio ,ad un'intersezione semaforizzata, in presenza di semaforo rosso.

Il *Min Tot. Edge Duration* rappresenta un tempo minimo di permanenza dei ciclisti su un arco della rete al fine di calcolare la velocità media. Il valore impostato è pari a 10 secondi perché si assume che valori troppo piccoli potrebbero portare a distorsioni nei risultati.

Questi parametri, i cui valori sono impostati di default, non sono importanti al fine dell'analisi dei tempi medi d'attesa; lo sono invece i parametri di seguito descritti. Selezionando l'opzione *Speed Analysis*, è possibile eseguire anche un'analisi sulle velocità.

Max Edge Speed rappresenta il valore massimo di velocità ammissibile sull'arco ed è impostato pari a 14m/s.

Il *Wait Speed* è un valore di velocità, posto pari a 0,7 m/s, al di sotto del quale i ciclisti si considerano fermi.

Il *Junction Range* rappresenta una certa distanza da un *arco* per cui i tempi d'attesa sono considerati appartenenti all'arco in questione.

Il parametro *Min. Wait- Edge Length* rappresenta la lunghezza minima di un arco affinché, a tale arco, si possa associare un tempo d'attesa. I tempi medi d'attesa su archi aventi lunghezza inferiore a 20 m saranno sommati ai tempi d'attesa degli archi successivi, aventi lunghezza superiore.

Andando a selezionare l'opzione *Node Analysis* viene effettuata anche un'analisi delle intersezioni della rete, valutando principalmente il tempo medio d'attesa per diversi tipi di intersezioni (semaforizzate, con precedenza a destra, intersezioni non regolate da segnaletica, intersezioni con stop).

6.2. OUTPUT DELL'ANALISI

I risultati dell'analisi vengono forniti dal software sia in forma numerica che grafica.

Di seguito vengono descritti solamente i risultati dell'analisi ai fini del calcolo del tempo medio d'attesa.

6.2.1. Visualizzazione numerica

I risultati dell'analisi risultano suddivisi in sette tabelle che contengono attributi relativi agli itinerari matchati, *routeresults_matched*, agli itinerari di minimo costo, *routeresults_shortest* e *routeresults_fastest*, alle porzioni di questi itinerari che non risultano sovrapposti, *routeresults_matched_nonoverlap* e *routeresults_shortest_nonoverlap* e infine agli archi e ai nodi del grafo della rete ricostruita, *edgesresults* e *nodesresults*.

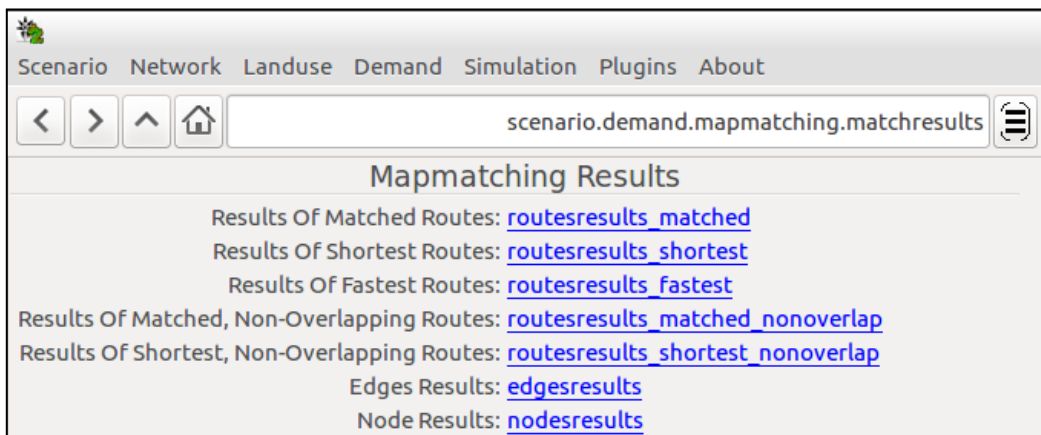


Figura 40-Output dell'analisi

L'attenzione è focalizzata sull'analisi degli archi e dei nodi della rete i quali forniscono indicazioni sull'andamento dei tempi medi d'attesa alle intersezioni.

- *Edges results*

Di seguito è rappresentato la tabella di output dell'analisi sugli archi.

Edges Results																
Edge ID	Avg. speed [m/h]	Avg. speed in motion [m/h]	Tot. duration [h]	number matched	number shortest	number fastest	Tot. short. length difference [m]	Rel. deviation [%]	Tot. fast. length difference [m]	trip probab.	Estim. Flows [1/h]	wait time [h]	wait time at junction [h]	number waiting at junction	wait time at TLS [h]	
1	0.00000	0.00000	0.00000	0	1	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000	
2	3.611340	3.691994	0.00000	16	0	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	140.00000	1.87500	2	0.312500	
3	38230	7.00000	0.00000	4	1	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00016	40.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000	
4	3.356084	3.356084	0.00000	27	48	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.001460	270.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000	
5	3.747351	3.790096	0.00000	14	0	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.000757	140.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000	
6	2.234335	2.234335	0.00000	3	0	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.000162	30.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000	
7	2.179933	2.315077	0.00000	25	1	39	0.00000	0.00000	12952.554688	0.001352	250.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000	
8	32778	0.00000	0.00000	1	0	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.000054	10.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000	
9	5463	1.427838	0.00000	1	1	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.000054	10.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000	
10	12	13.988330	13.988330	0.00000	1	8	8	0.00000	0.00000	60189.636719	0.000054	10.00000	0.00000	0	0.00000	
11	13	3.892854	3.892854	0.00000	1	8	8	0.00000	0.00000	60189.636719	0.000054	10.00000	0.00000	0	0.00000	
12	32783	2.724547	2.676310	0.00000	44	44	3	0.00000	0.00000	0.0002179	440.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000	
13	18	6.075112	6.075112	0.00000	1	0	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.000054	10.00000	0.00000	0	0.00000	
14	38790	2.354589	2.421891	0.00000	9	0	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.000487	90.00000	7.22222	7.22222	1	0.00000
15	20	2.351483	2.351483	0.00000	29	39	30	0.00000	0.00000	76949.404250	0.001568	290.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000
16	32789	6.432065	6.432065	0.00000	39	18	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.002109	390.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000
17	32790	5.864197	5.864197	0.00000	24	18	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.001298	240.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000
18	23	3.280085	3.280085	0.00000	9	29	39	0.00000	0.00000	153991.375000	0.000487	90.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000
19	32793	0.624119	0.636175	0.00000	2	0	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.000108	20.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000
20	32794	4.601433	4.313009	0.00000	14	0	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.000757	140.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000
21	32795	0.624119	0.636175	0.00000	2	0	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.000108	20.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000
22	32796	4.307132	4.471160	0.00000	4	0	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.000116	40.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000
23	32797	5.522256	5.379026	0.00000	34	18	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.001838	340.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000
24	32798	5.767438	5.767438	0.00000	26	18	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.001406	260.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000
25	32799	3.893153	3.893153	0.00000	4	0	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.000216	40.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000
26	32800	4.607718	4.607718	0.00000	2	0	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.000108	20.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000
27	32802	2.405591	2.755080	0.00000	140	135	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.000770	140.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000
28	32803	1.092118	1.304642	0.00000	10	11	10	0.00000	0.00000	0.00000	0.000041	100.00000	21.00000	21.00000	0	0.00000
29	5468	0.00000	0.00000	0.00000	1	0	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.000054	10.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000
30	6548	14.00000	14.00000	0.00000	1	0	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.000054	10.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000
31	32813	1.495419	1.594635	0.00000	23	0	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.001244	230.00000	0.00000	0.00000	0	0.00000

Figura 41-Edges results

Come mostrato in tabella, per ciascun arco del grafo della rete appartenente ad almeno uno degli itinerari ricostruiti, l'analisi fornisce in output una serie di attributi.

L'Edge ID rappresenta il numero identificativo dell'arco.

Per Avg. Speed s'intende la velocità media di percorrenza dell'arco; per Avg. Speed in motion si considera sempre una velocità media ma calcolata senza considerare i valori di velocità nulli.

Tot. Duration rappresenta la durata media di attraversamento dell'arco.

Number matched rappresenta il numero di ciclisti che hanno impegnato l'arco durante gli spostamenti effettuati dagli stessi e ricostruiti dal programma mediante il procedimento di map-matching; number shortest è il numero di ciclisti che avrebbe potuto utilizzare l'arco in oggetto se avesse scelto il percorso di minima distanza in alternativa all'itinerario seguito; number fastest è il numero di ciclisti che avrebbe potuto utilizzare l'arco in oggetto se avesse scelto il percorso più veloce in alternativa all'itinerario seguito.

Tot. short. length difference e Tot. fast. length difference rappresentano la lunghezza totale, valutata sull'intera rete di trasporto, del percorso aggiuntivo che gli utenti compiono non utilizzando l'arco in oggetto nei casi in cui esso appartiene rispettivamente al percorso più breve o al percorso più veloce.

Il valore di trip probab esprime la percentuale di utilizzo dell'arco considerato ed è dato dal rapporto tra il numero delle volte in cui l'arco è stato attraversato e il

numero di itinerari ricostruiti durante il procedimento di map-matching, considerando tutti i viaggi compiuti dagli utenti.

L'*Estim. Flows* rappresenta il valore medio orario del flusso stimato sull'arco considerato.

Dall'analisi degli archi sono forniti anche i valori dei tempi medi d'attesa sull'arco (*wait time*) e i tempi medi d'attesa al semaforo (*wait time at TLS*) e al nodo (*wait time at junction*) qualora l'arco converga in un'intersezione.

Il *number waiting at junction* rappresenta il numero degli utenti che attendono in corrispondenza dell'intersezione in cui converge l'arco.

- *Node results*

Di seguito è rappresentato la tabella di output dell'analisi sui nodi.

Node Results			
	Node ID	wait time [s]	number matched
1	1	-nan	0
2	2	-nan	0
3	3	-nan	0
4	4	-nan	0
5	5	-nan	0
6	7	-nan	0
7	10	1.199591	18
8	12	2.500000	2
9	14	-nan	0
10	15	-nan	0
11	16	-nan	0
12	17	-nan	0
13	18	-nan	0
14	19	-nan	0
15	20	0.076144	2
16	21	-nan	0
17	22	-nan	0
18	23	-nan	0
19	24	-nan	0
20	26	-nan	0
21	27	-nan	0
22	28	-nan	0
23	36	-nan	0
24	37	-nan	0
25	38	-nan	0
26	39	-nan	0
27	42	-nan	0
28	43	-nan	0
29	46	-nan	0
30	47	-nan	0
31	49	-nan	0

Figura 42-Nodes results

Come mostrato in tabella, per ciascun nodo del grafo della rete, l'analisi fornisce in output tre attributi: il *Node Id* che rappresenta il numero identificativo del nodo, il *wait time* che equivale al tempo d'attesa al nodo e il *number matched* che rappresenta il numero di ciclisti che hanno impegnato il nodo durante gli spostamenti effettuati dagli stessi.

6.2.2. Visualizzazione grafica

I risultati tabellati visti in precedenza vengono forniti dal software anche in forma grafica attraverso grafici e immagini, di seguito riportati.

- *Edges results*

Nelle immagini che seguono viene mostrato l'andamento dei flussi di ciclisti sugli archi e l'andamento dei tempi d'attesa attribuiti agli archi sull'intera rete.

In particolare, in figura 43 è rappresentato l'andamento dei flussi di ciclisti sugli archi della rete, appartenenti a percorsi ottenuti in seguito al procedimento di map-matching; in figura 44 è rappresentato l'andamento del tempo medio d'attesa, alle intersezioni semaforizzate e non semaforizzate; in figura 45, in cui è rappresentato il tempo medio d'attesa alle intersezioni semaforizzate; in figura 46, viene mostrato l'andamento dei tempi d'attesa ai nodi della rete.

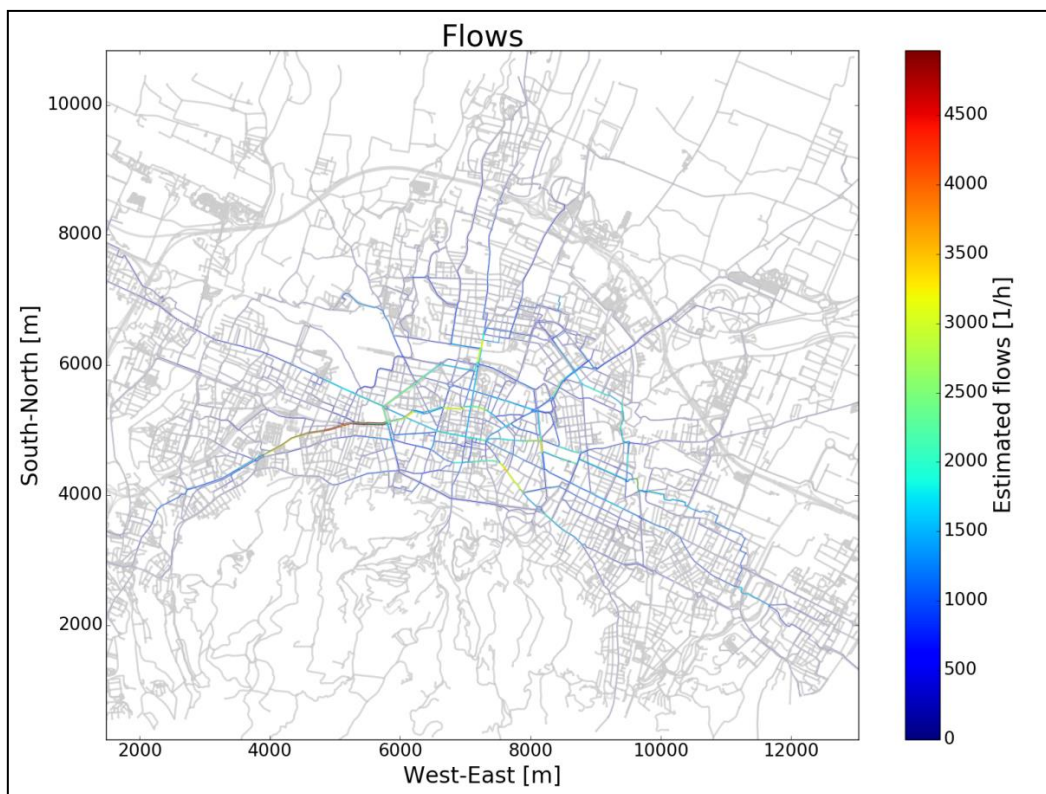


Figura 43- Rappresentazione grafica dell'andamento dei flussi dei ciclisti, su tutta la rete.

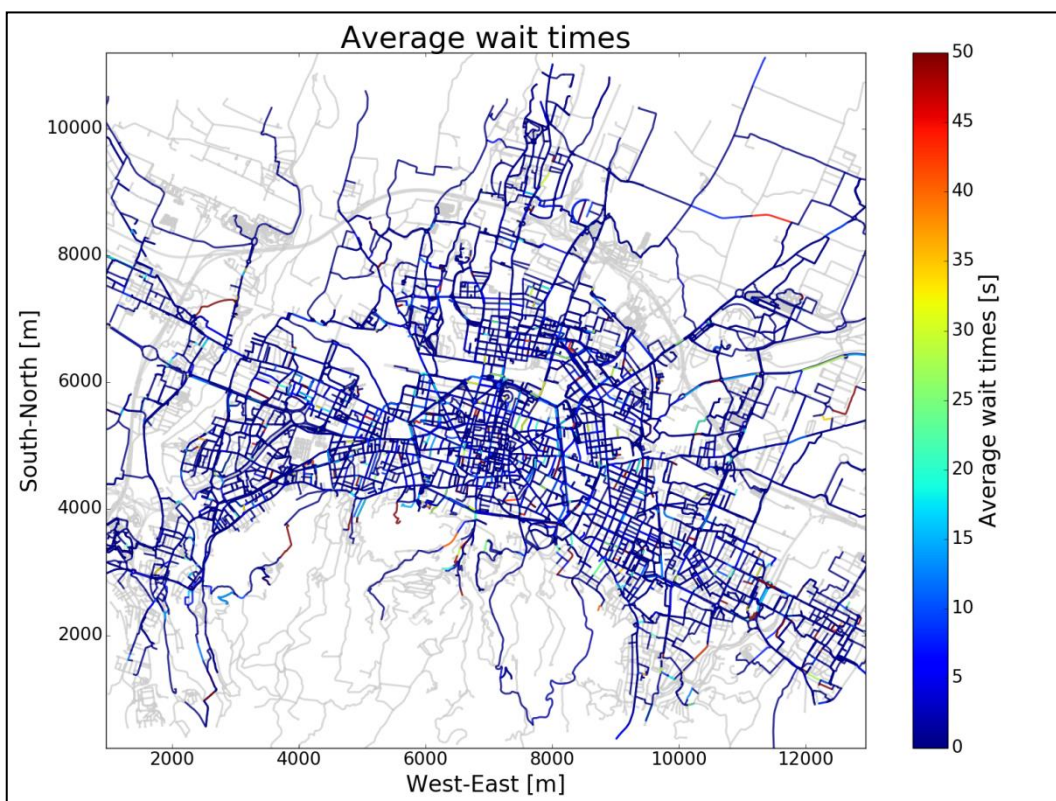


Figura 44- Rappresentazione grafica del tempo medio d'attesa su tutta la rete

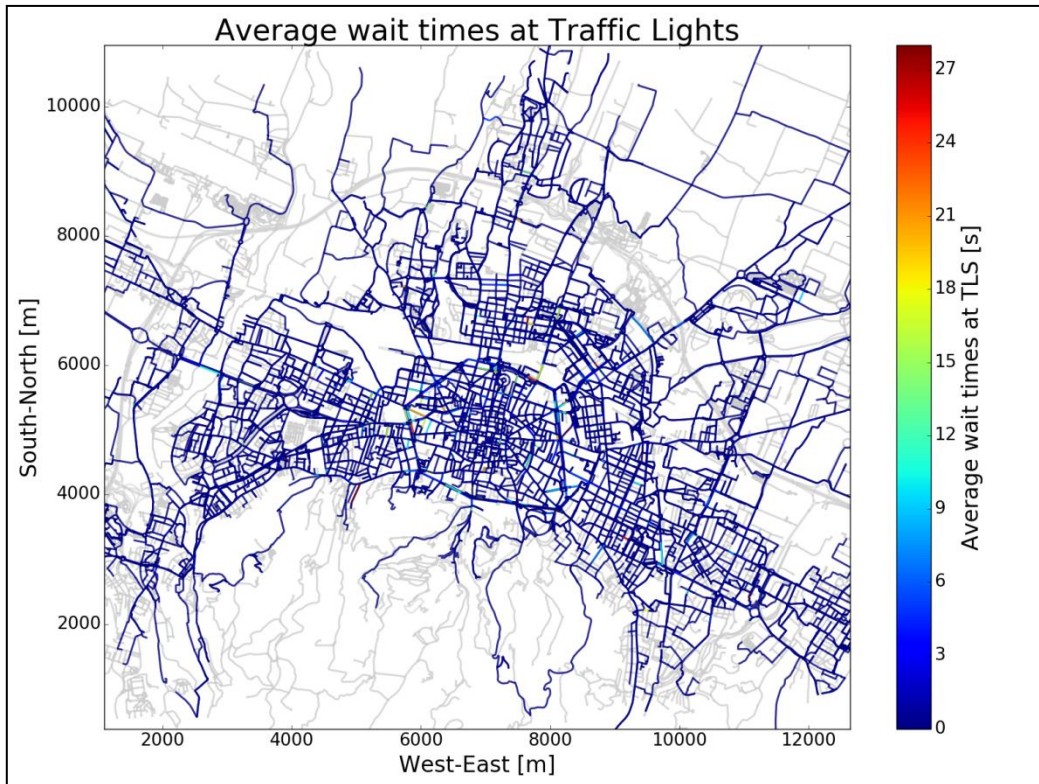


Figura 45- Rappresentazione grafica del tempo medio d'attesa, in corrispondenza di intersezioni semaforizzate, su tutta la rete

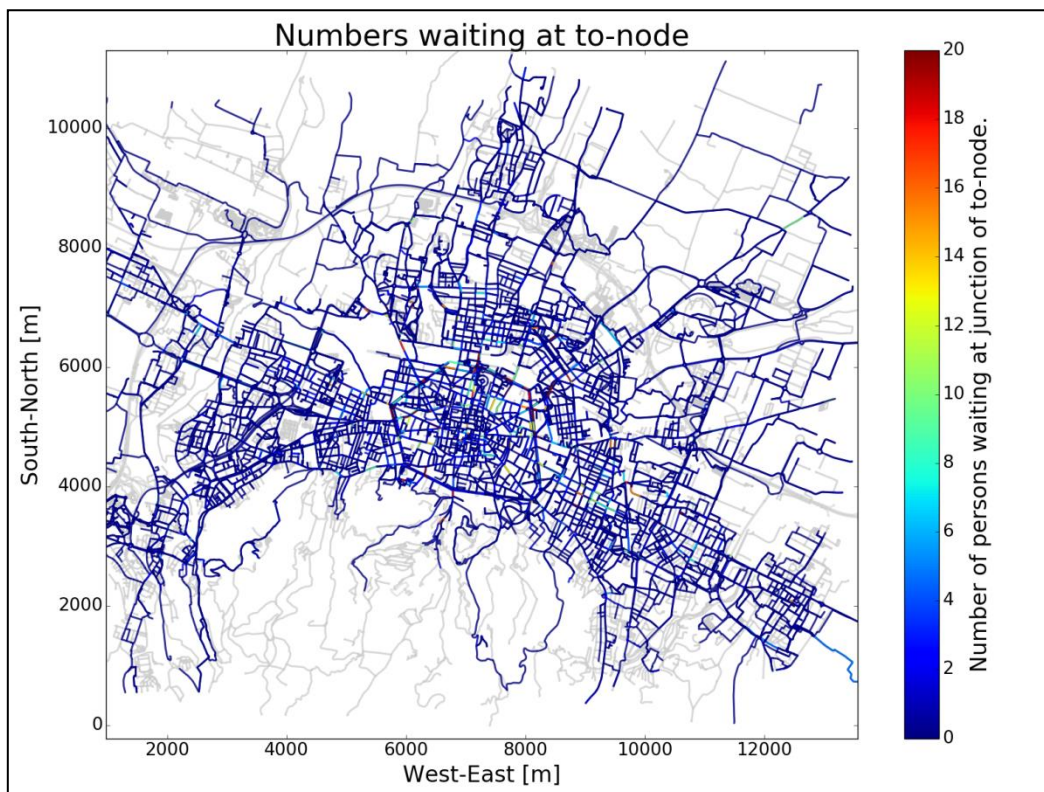


Figura 46- Rappresentazione grafica del numero di ciclisti che attendono, in corrispondenza dei nodi.

- *Nodes results*

Graficamente, l'analisi ai nodi fornisce due grafici; il primo, raffigurato in figura 48, rappresenta l'andamento del tempo medio d'attesa dei ciclisti, in base al tipo di intersezione: *zipper*, intersezione per ingresso in tangenziale; *priority_stop*, ovvero intersezione in cui la segnaletica stradale impone di fermarsi; *right_before_left*, intersezione in cui l'assenza di segnaletica impone di dare precedenza a destra; *dead_end*, strade senza uscita; *priority* intersezioni con diritto di precedenza; *traffic_light*, intersezione semaforizzata e *unregulated*, intersezioni non regolate dal Codice della Strada.

L'analisi ai nodi mostra che il tempo medio d'attesa alle intersezioni semaforizzate, mediato su tutte le intersezioni della rete di Bologna (che risultano essere 367) è di circa 13 secondi.

Il maggior tempo medio d'attesa si verifica alle intersezioni di tipo *right_before_left* mentre quello minore è per intersezioni in cui la segnaletica stradale impone di fermarsi, *priority_stop*; il tempo d'attesa medio in corrispondenza di un semaforo risulta meno della metà del tempo medio d'attesa calcolato su intersezioni che impongono la precedenza a destra (32 secondi).

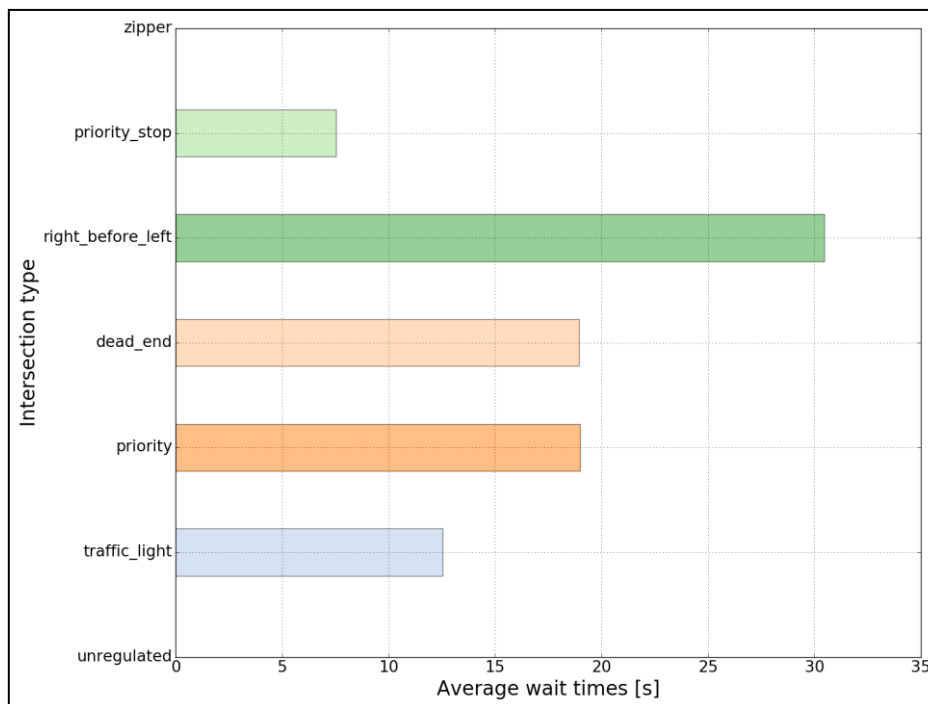


Figura 47- Andamento del tempo medio d'attesa in base al tipo di intersezione

Nel grafico di figura 50 viene invece rappresentato il tempo medio d'attesa ai nodi attraversati dagli itinerari ricostruiti in seguito al procedimento di map-matching.

Il 10% circa delle intersezioni rappresentate in figura 50 presenta un tempo d'attesa medio massimo pari a circa 36 secondi, circa il 20% presenta un tempo medio d'attesa compreso tra i 20 e i 28 secondi e il restante 70% presenta un tempo medio d'attesa inferiore ai 20 secondi.

In generale, circa il 60% delle tracce presenta un tempo medio d'attesa alle intersezioni semaforizzate inferiore a 16 secondi.

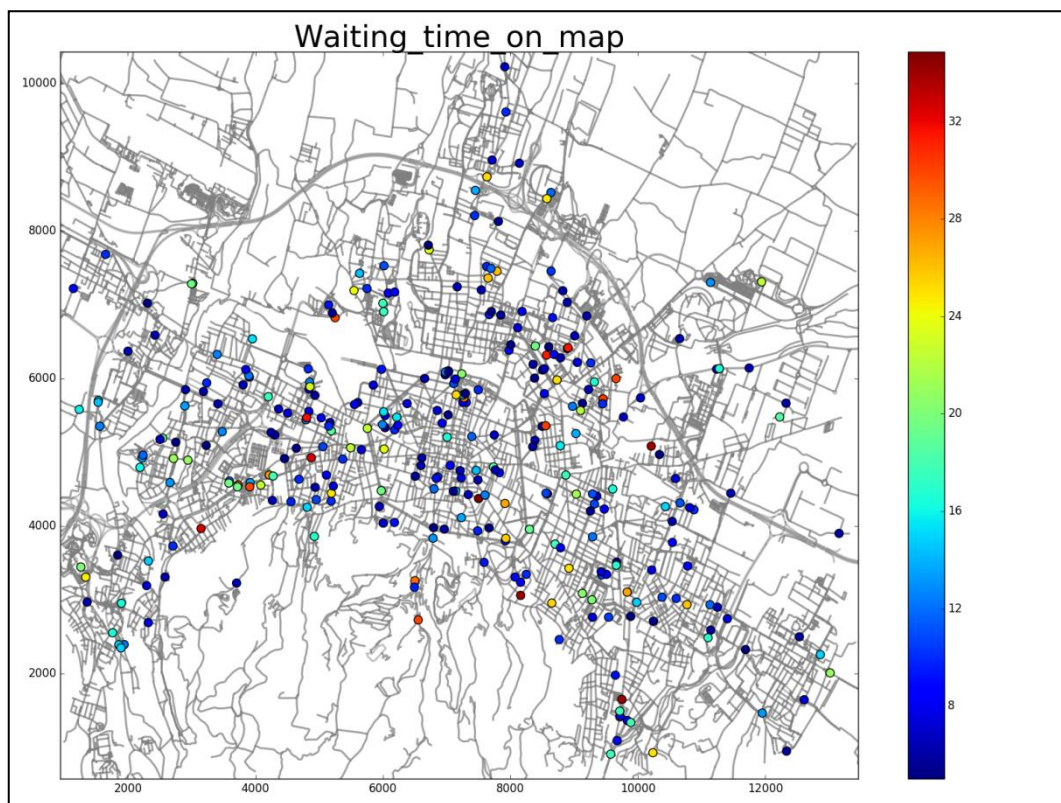


Figura 50- Rappresentazione grafica del tempo medio d'attesa alle intersezioni, sull'intera rete

CAPITOLO 7- VALUTAZIONE DEI TEMPI D'ATTESA ***ALLE INTERSEZIONI SEMAFORIZZATE***

La modalità di scelta del percorso degli utenti della rete dipende da molte variabili ma, in genere, soprattutto per quanto riguarda gli spostamenti sistematici (casa-lavoro, casa-scuola, etc.), la scelta ricade sul percorso più breve e/o più veloce.

La presenza di più intersezioni semaforizzate lungo il tragitto può rappresentare motivo di scelta di un percorso alternativo.

Per comprendere il comportamento degli utenti e avere una stima dei tempi d'attesa degli stessi in corrispondenza delle intersezioni semaforizzate, è stata effettuata un'analisi microscopica della rete ed in particolare, sono stati analizzati i singoli trips che attraversano gli incroci semaforizzati oggetto di studio.

Attraverso i profili di velocità sono state ottenute informazioni relative ai tempi d'attesa alle intersezioni per ogni traccia selezionata permettendo di fare una media di tutti i tempi da confrontare con i valori dei tempi d'attesa ottenuti dai rilievi manuali forniti dal Dipartimento di Trasporti dell'Università di Bologna.

Di seguito vengono quindi mostrati i risultati ottenuti in seguito ad analisi sui tempi d'attesa eseguite sui due incroci semaforizzati dell'area Urbana di Bologna, in corrispondenza di Porta San Felice e Porta San Donato.

Sono stati scelti questi due incroci in quanto, il Dipartimento di Trasporti dell'Università di Bologna ha fornito i risultati di rilievi manuali dei tempi d'attesa proprio in corrispondenza di queste due intersezioni ed è stato quindi possibile effettuare un confronto tra i dati forniti dal software e quelli forniti dal Dipartimento.

Grazie al confronto tra questi dati e la cooperazione con l'Ing. Schweizer è stata ottenuta una formula generale per il calcolo dei tempi medi d'attesa alle intersezioni basata su un modello stocastico.

7.1. DESCRIZIONE DELLE INTERSEZIONI OGGETTO DI STUDIO

In questo paragrafo vengono presentate le due intersezioni interessate dall'analisi.



Figura 50-Posizione delle intersezioni analizzate all'interno dell'Area urbana di Bologna

7.1.1. Intersezione semaforizzata di Porta San Felice



Figura 51- Intersezione semaforizzata , Porta San Felice

L'intersezione in esame è costituito da due semafori, aventi cicli leggermente diversi, che all'interno del software vengono considerati come un'unica intersezione semaforizzata.

L'attraversamento ciclabile analizzato fa parte della tangenziale delle biciclette, una pista ciclabile bidirezionale quasi esclusivamente riservata alle bici.

L'analisi è stata effettuata considerando separatamente i ciclisti nelle due diverse direzioni: da Porta Lama a Porta Sant'Isaia e viceversa.



Figura 52- Porta San Felice, da OpenStreetMap

7.1.2. Intersezione Semaforizzata di Porta San Donato



Figura 53-Intersezione semaforizzata, Porta San Donato

L'incrocio semaforizzato di Porta San Donato, dotato di pista ciclabile con semaforo di corsia, permette l'attraversamento di un'ampia strada di scorrimento a due carreggiate con spartitraffico e tre corsie per senso di marcia, regolato da due semafori, uno per ogni carreggiata, caratterizzati da cicli leggermente diversi. Si tratta dell'attraversamento di viale Filopanti da via Malaguti per proseguire su via Imerio (e viceversa).

L'analisi dei tempi medi d'attesa al semaforo è stata effettuata considerando separatamente i ciclisti provenienti dalle due direzioni: dal centro alla periferia e viceversa.

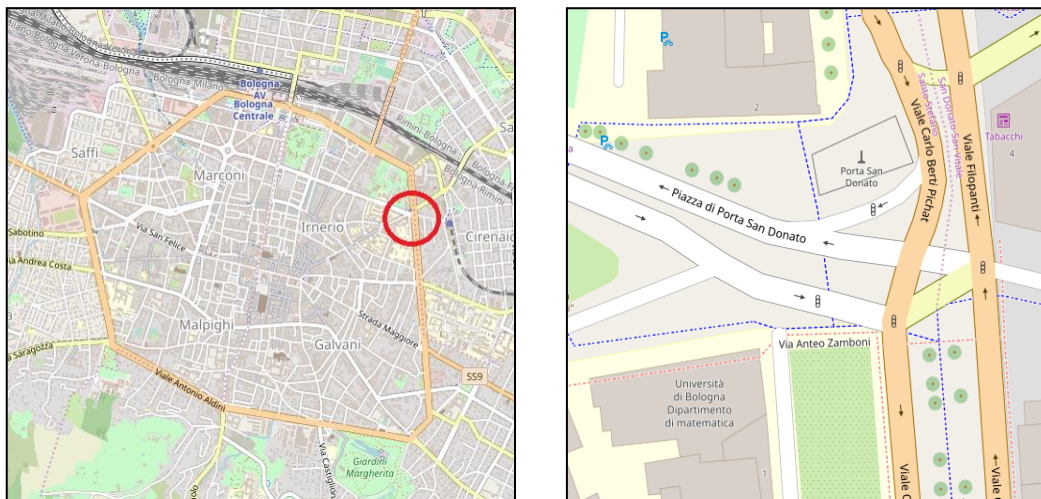


Figura 54-Porta San Donato, da OpenStreetMap

7.2. ANALISI ESEGUITE ALLE INTERSEZIONI E RELATIVI RISULTATI

Il primo passo per l'analisi delle intersezioni è stato quello di selezionare, tra tutte le tracce ottenute dal processo di map-matching, quelle che attraversano l'incrocio d'interesse. Successivamente, effettuando nuovamente l'analisi, in particolare la *Speed Analysis*, è stato possibile plottare, per ogni traccia selezionata, il profilo di velocità corrispondente dal quale si è ottenuto il valore del tempo d'attesa sull'arco convergente all'intersezione; così facendo, per ogni traccia sono noti i tempi d'attesa alle intersezioni.

Dopo aver analizzato i profili di velocità di tutte le tracce selezionate è stato valutato il tempo medio d'attesa: in particolare, è stato calcolato il tempo medio

d'attesa totale e il tempo medio d'attesa, valutato considerando solo le tracce i cui tempi d'attesa all'intersezione risultano non nulli, separatamente per le due intersezioni e per le due direzioni.

Infine sono stati confrontati i risultati così ottenuti con i valori dei tempi d'attesa ottenuti da rilievi manuali forniti dal Dipartimento di Trasporti.

Dal confronto con questi dati e l'analisi dei cicli semaforici alle due intersezioni, è stato possibile stimare l'attendibilità di un modello matematico generale per la determinazione dei tempi medi d'attesa alle intersezioni semaforizzate.

I trips considerati nell'analisi sono quelli compiuti nella fascia oraria mattutina 5-11. Si è preso in considerazione la fascia mattutina in quanto è più probabile che gli spostamenti che si verificano in quest'intervallo temporale siano spostamenti sistematici casa- lavoro o casa-scuola; di pomeriggio è probabile che gli utenti tornando da lavoro o da scuola non tornino subito a casa ma effettuino delle soste durante il tragitto.

In figura 55 è mostrato l'andamento di una traccia generica analizzata in cui il punto evidenziato in rosso rappresenta l'origine dello spostamento e il punto evidenziato in verde la destinazione; i punti gialli rappresentano i punti di localizzazione GPS che descrivono la variazione di posizione dell'utente in funzione del tempo, la linea verde rappresenta il percorso più veloce (in termini di tempo) e la linea magenta il percorso più breve (in termini di distanza) che congiunge i punti iniziali e finali dello spostamento.

In figura 56, per la traccia rappresentata in figura 55, è mostrato il profilo di velocità: un grafico che mostra l'andamento della velocità (espressa in Km/h) in funzione del tempo (in secondi). In alto sono indicati i numeri identificativi degli archi successivi che l'utente ha percorso per andare dall'origine alla destinazione dello spostamento e in basso, i tempi d'attesa sugli archi qualora questi risultino diversi da zero; viene specificato il valore del *wait time*, *wait time at junction* e il *wait time at TL*.

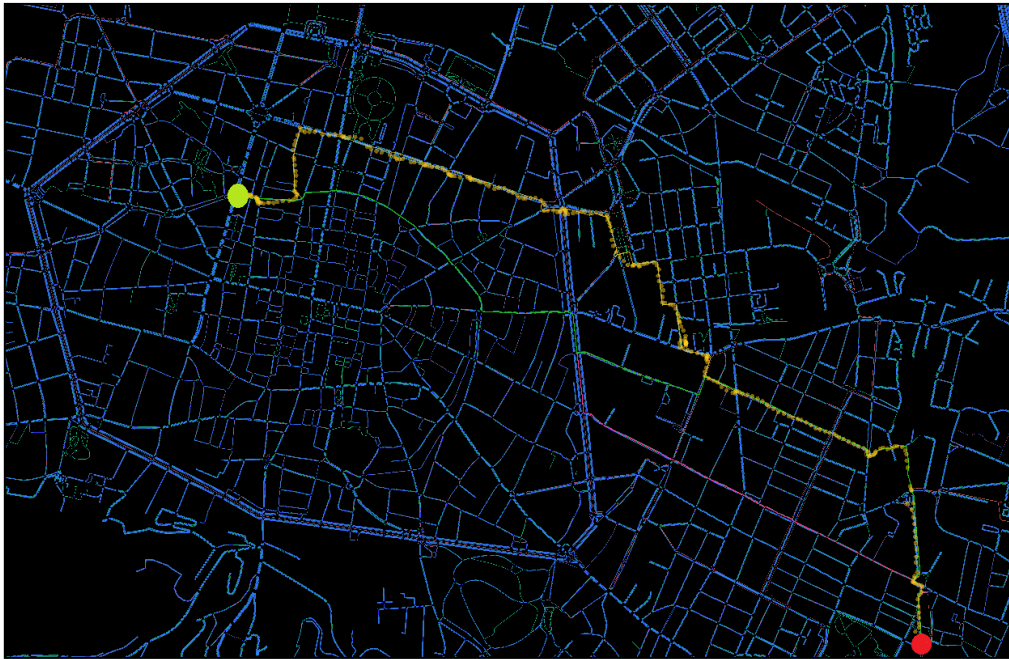


Figura 55-Rappresentazione di un trip

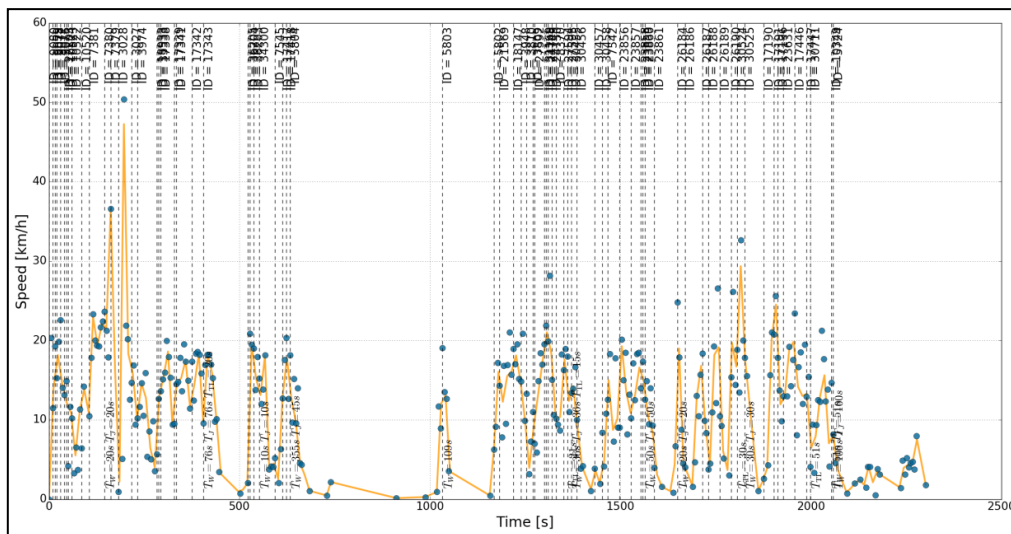


Figura 56-Esempio del profilo di velocità di una traccia

Il *wait time at TL* è il valore su cui si è particolarmente concentrata l'analisi e racchiude la somma dei tempi d'attesa che si hanno in corrispondenza del sistema semaforico e il suo valore viene indicato in corrispondenza dell'arco che precede il sistema semaforico.

7.2.1. Risultati Porta San Felice

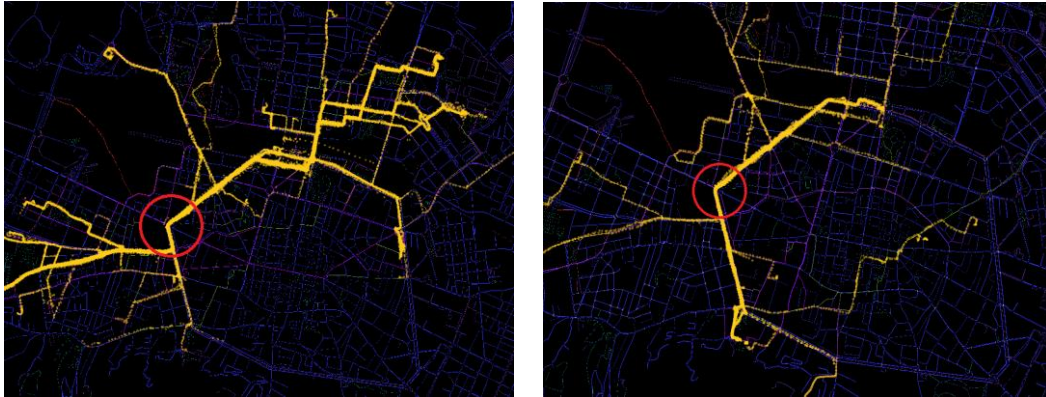


Figura 57- A sinistra, tracce selezionate che attraversano l'incrocio di Porta San Felice da Porta Sant'Isaia a Porta Lama; a destra, tracce selezionate che attraversano l'incrocio di Porta San Felice da Porta Lama a Porta Sant'Isaia

In figura 57 è mostrato l'andamento delle tracce selezionate che attraversano l'incrocio di Porta San Felice in direzione Porta Lama- Porta Sant'Isaia e in direzione opposta.

Per quanto riguarda la direzione Porta Sant'Isaia - Porta lama, su 139 tracce che attraversano l'incrocio in esame, la percentuale di ciclisti che si fermano al semaforo è di circa il 52%. In questa percentuale sono compresi i ciclisti che si fermano al semaforo fino a quando il segnale non diventa verde e quelli che invece arrivano al semaforo quando il segnale è rosso, attendono qualche secondo e ripartono prima che il segnale diventi verde.

Nel restante 48% sono compresi i ciclisti che arrivano all'incrocio, trovano il verde e proseguono e quelli invece che proseguono, nonostante il segnale sia rosso.

Nella direzione opposta invece, il numero di tracce selezionate risulta decisamente inferiore al caso precedente con un numero totale di tracce pari a 30 e una percentuale di tracce che presentano un tempo d'attesa non nullo pari al 43%.

A differenza dei rilievi manuali, i risultati forniti dal software non permettono di distinguere tra i ciclisti che proseguono perché il semaforo è verde da quelli che proseguono nonostante il semaforo sia rosso.

Tabella 1- Numero tracce selezionate per l'incrocio di Porta San felice e percentuale di ciclisti che presentano un tempo d'attesa all'intersezione non nullo, nelle due direzioni

INTERSEZIONE	n° tracce selezionate	% ciclisti che attendono
Sant'Isaia -Lame	139	51.8%
Lame- Sant'Isaia	30	43%

Di seguito viene mostrato un esempio di profilo di velocità medio delle tracce che attraversano l'incrocio di Porta San Felice, da Porta Sant'Isaia a Porta Lame. Il tempo medio d'attesa all'intersezione, associato all'arco 25619 (arco che precede l'intersezione semaforizzata), risulta essere di 23 secondi.

In figura 58 è mostrato l'andamento del profilo di velocità medio, in cui la velocità è espressa in funzione del tempo.

In figura 59 invece, sono rappresentati gli andamenti dei profili di velocità di tutte le tracce selezionate in cui la velocità è espressa in funzione della distanza.

I profili di velocità sono ottenuti per interpolazione lineare tra ogni coppia di punti rappresentativi della velocità in funzione del tempo o della distanza.

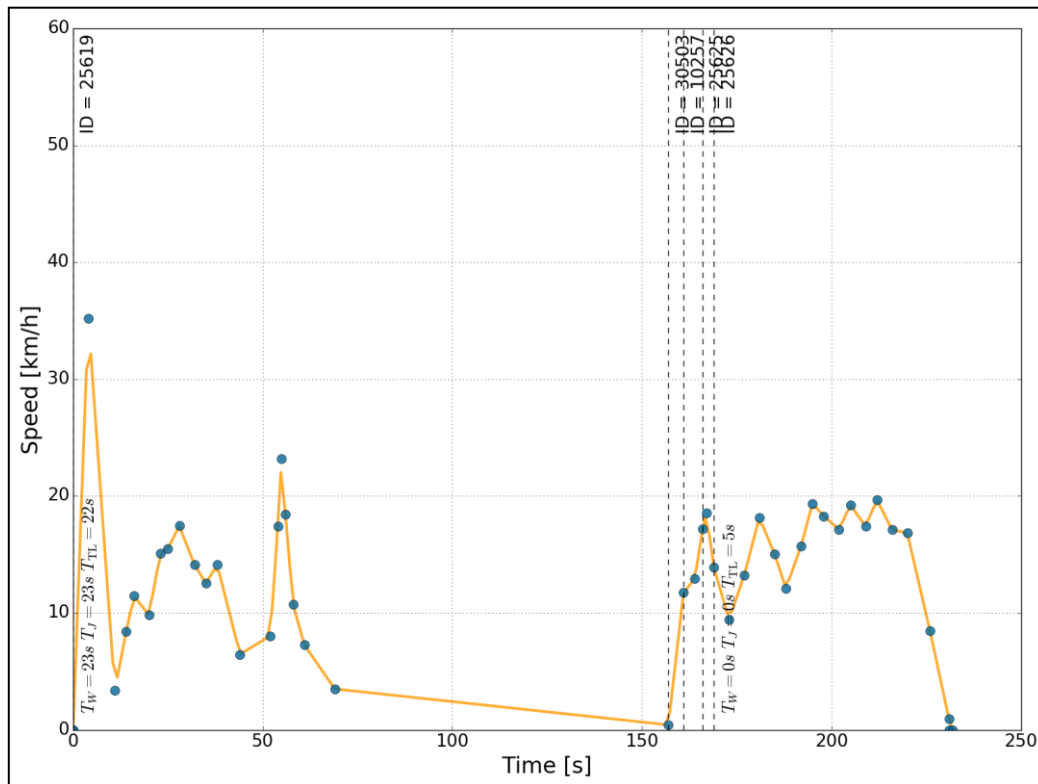


Figura 58- Profilo di velocità medio Porta San felice, da Porta Sant'Isaia a Porta Lame, velocità in funzione del tempo

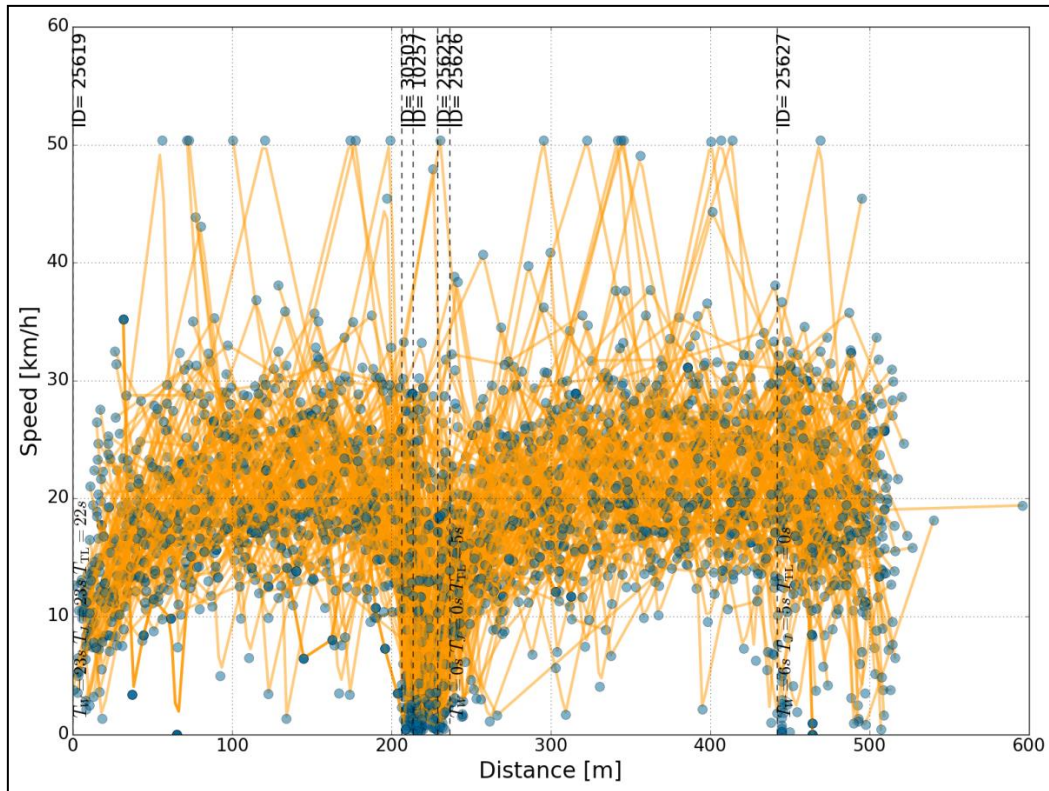


Figura 59- Profili di velocità di tutte le tracce che attraversano l'incrocio di Porta San Felice, da Porta Sant'Isaia a Porta Lama, velocità in funzione della distanza

Nelle tabelle che seguono si mostrano i risultati ottenuti dall'analisi dei singoli profili di velocità e il confronto dei tempi d'attesa così ottenuti con i valori dei tempi d'attesa medi ottenuti dai rilievi manuali, per entrambe le direzioni.

Per *wait time at TL parziale* si considera il tempo medio d'attesa al semaforo calcolato non considerando le tracce i cui tempi d'attesa sono nulli.

I valori dei tempi d'attesa totali e parziali forniti dal Dipartimento di Trasporti risultano coincidenti in quanto il ciclista rilevatore, per tutte le tracce effettuate, presenta un tempo d'attesa non nullo. I dati dei rilievi manuali presi come riferimento sono stati ottenuti mediante elaborazione di dati GPS derivanti dall'utilizzo dell'applicazione Smartphone *Endomondo*, in grado di rilevare la posizione dell'utente in movimento nello spazio e nel tempo; il rilevatore, percorrendo i tracciati d'interesse con l'applicazione in funzione ha fornito dati GPS di posizionamento planimetrico e temporale permettendo la valutazione del tempo di attesa effettivo al semaforo.

Sono stati considerati solo i rilievi effettuati nell'ora di punta della mattina dalle 8 alle 9.

Tabella 2- tempo d'attesa all'intersezione di Porta San felice, da Porta Sant'Isaia a Porta Lama

<i>Sant'Isaia - Lama</i>	<i>Valori stimati da SUMOPy</i>	<i>Rilievi Manuali</i>
<i>Media wait time at TL totale (s)</i>	23.1	60
<i>Media wait time at TL parziale (s)</i>	43.9	60

Per la direzione Porta Sant'Isaia - Porta Lama il tempo medio d'attesa totale di tutte le tracce analizzate risulta essere di circa 23 secondi mentre il valore dello stesso parametro fornito dai rilievi manuali risulta pari a 60 secondi.

Se, per la stessa direzione, si considera il tempo medio d'attesa parziale, il software fornisce un valore del tempo medio d'attesa pari a 43.9 secondi e per i rilievi manuali il tempo medio d'attesa parziale risulta uguale al tempo medio d'attesa totale in quanto le tracce GPS del ciclista rilevatore non presentano tempi d'attesa nulli.

Tabella 3 -tempo d'attesa all'intersezione di Porta San felice, da Porta Lama a Porta Sant'Isaia

<i>Lama – Sant'Isaia</i>	<i>Valori stimati da SUMOPy</i>	<i>Rilievi Manuali</i>
<i>Media wait time at TL totale (s)</i>	26.5	56.5
<i>Media wait time at TL parziale (s)</i>	61.2	56.5

Per la direzione Porta Lama- Porta Sant'Isaia, il tempo medio d'attesa totale di tutte le tracce analizzate risulta essere di circa 26.5 secondi mentre, il valore dello stesso parametro fornito dai rilievi manuali risulta pari a 56.5 secondi.

Se, per la stessa direzione, si considera il tempo medio d'attesa parziale, il software fornisce un valore del tempo d'attesa pari a 61.2 secondi e per i rilievi manuali, anche in questo caso, il tempo medio d'attesa parziale risulta uguale al tempo medio d'attesa totale in quanto le tracce GPS del ciclista rilevatore non presentano tempi d'attesa nulli.

In Tabella 4, per ogni fase del ciclo semaforico è definita una durata media della fase, mediata su 6 cicli semaforici monitorati nell'ora di punta della mattina;

quest'informazione risulterà utile in fase di applicazione del modello per la stima dei tempi medi d'attesa alle intersezioni.

Tabella 4-Durata media fasi ciclo semaforico, Porta San Felice, ora di punta della mattina

<i>Fasi del ciclo semaforico</i>	<i>Durata media fasi ciclo semaforico, ora di punta della mattina</i>
<i>Verde</i>	18
<i>Giallo</i>	8
<i>Rosso</i>	132
<i>Totale ciclo</i>	158

7.2.2. Risultati Porta San Donato

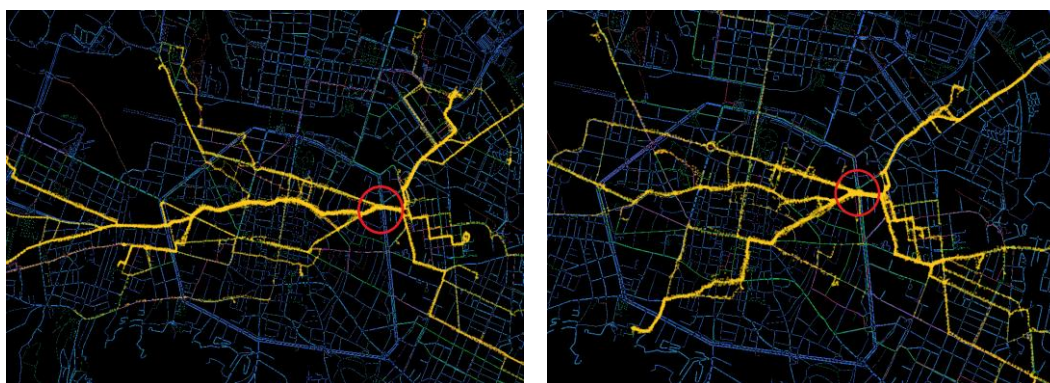


Figura 60 -A sinistra, tracce selezionate che attraversano l'incrocio di Porta San Donato dal centro alla periferia della città; a destra, tracce selezionate che attraversano l'incrocio di Porta San Donato dalla città alla periferia.

Anche per l'incrocio di Porta San Donato vengono mostrate le tracce selezionate nelle due direzioni con un totale di 120 tracce: 67 rappresentano le tracce degli utenti che da Porta San Donato si spostano verso il centro e 53 il numero delle tracce in cui gli utenti si spostano nella direzione opposta. Nel primo caso, la percentuale degli utenti che si ferma in corrispondenza dell'incrocio è pari al 50,7 %; nel secondo caso al 49,1% sul totale delle tracce.

Tabella 5 -Numero tracce selezionate per l'incrocio di Porta San Donato e percentuale di ciclisti che presentano un tempo d'attesa all'intersezione non nullo, nelle due direzioni

<i>INTERSEZIONE</i>	<i>n° tracce selezionate</i>	<i>% ciclisti che attendono</i>
<i>San Donato-Centro</i>	67	50.7%
<i>Centro-San Donato</i>	53	49.1%

Nella tabella che segue si mostrano i risultati ottenuti dall'analisi dei profili di velocità e il confronto dei tempi d'attesa così ottenuti con i valori dei tempi d'attesa medi ottenuti dai rilievi manuali.

Per la direzione Porta San Donato - Centro, i rilievi manuali forniscono informazioni relative ai tempi medi d'attesa all'intersezione sia totali che parziali. Per la direzione Centro – Porta San Donato i rilievi non forniscono valori del tempo medio d'attesa nell'ora di punta della mattina e non è quindi possibile fare un confronto; vengono specificati solo i tempi medi d'attesa valutati dal software.

Tabella 6- tempo d'attesa all'intersezione di Porta San Donato, verso il centro

<i>San Donato - Centro</i>	<i>Valori stimati da SUMOPy</i>	<i>Rilievi Manuali</i>
<i>Media wait time at TL totale (s)</i>	24	29.5
<i>Media wait time at TL parziale (s)</i>	43.3	39.3

Per la direzione Porta San Donato - Centro il tempo medio d'attesa totale di tutte le tracce analizzate risulta essere di circa 24 secondi mentre, il valore dello stesso parametro fornito dai rilievi manuali risulta pari a 29.5 secondi.

In questo caso i tempi d'attesa totali e parziali ottenuti dai rilievi manuali risultano diversi tra loro in quanto il 20% delle tracce GPS registrate dal rilevatore presentano tempi d'attesa all'intersezione nulli.

Se, per la stessa direzione, si considera il tempo medio d'attesa parziale, il software fornisce un valore del tempo d'attesa pari a 43.3 secondi mentre i rilievi manuali un valore pari a 39.3.

Tabella 7- Tempo d'attesa all'intersezione di Porta San Donato, verso periferia

<i>Centro - San Donato</i>	<i>Valori stimati da SUMOPy</i>	<i>Rilievi Manuali</i>
<i>Media wait time at TL totale (s)</i>	21.5	-
<i>Media wait time at TL parziale (s)</i>	38.9	-

Per la direzione Centro- Porta San Donato, il tempo medio d'attesa totale di tutte le tracce analizzate risulta essere di circa 21.5 secondi; se, per la stessa direzione,

si considera il tempo medio d'attesa parziale, il software fornisce un valore del tempo d'attesa pari a 38.9 secondi.

Anche in questo caso per ogni fase del ciclo semaforico viene definita la durata media della fase, mediata su 6 cicli semaforici monitorati nell'ora di punta della mattina.

Tabella 8- Durata media fasi ciclo semaforico, Porta San Donato, ora di punta della mattina

<i>Fasi del ciclo semaforico</i>	<i>Durata media fasi ciclo semaforico, ora di punta della mattina</i>
<i>Verde</i>	13
<i>Giallo</i>	8
<i>Rosso</i>	124
<i>Totale ciclo</i>	145

7.3. MODELLO MATEMATICO PER LA DETERMINAZIONE DEI TEMPI D'ATTESA ALLE INTERSEZIONI SEMAFORIZZATE

Il modello matematico implementato dall'Ing. Schweizer è un modello stocastico in cui la variabile di input per la determinazione del tempo medio d'attesa all'intersezione è il tempo di rosso, t_R , che rappresenta la variabile aleatoria del modello. La variabile t_R varia all'interno di un intervallo $[0, T_R]$, in cui T_R rappresenta la durata media della fase di rosso del ciclo semaforico.

$$T_w = E[t_R \cdot P_R] = \quad (1.1)$$

$$P_R \int_0^{T_R} t_R \cdot \zeta(t_R) \cdot dt_R = \quad (1.2)$$

$$P_R \int_0^{T_R} t_R \cdot \frac{1}{T_R} \cdot dt_R = \quad (1.3)$$

Secondo questo modello, il tempo d'attesa medio all'intersezione semaforizzata è dato dal valore medio del prodotto tra t_R e P_R dove con P_R s'intende la probabilità che gli utenti arrivino all'intersezione quando il semaforo è rosso. $\zeta(t_R)$

rappresenta la funzione densità di probabilità. Andando a risolvere l'integrale, supponendo la funzione densità di probabilità costante e pari a $\frac{1}{T_R}$ e considerando che $P_R = \frac{T_R}{T_R+T_G}$ otteniamo che il tempo medio d'attesa all'intersezione semaforizzata vale:

$$T_W = \frac{1}{2} \frac{T_R^2}{T_R+T_G} \quad (1.4)$$

con T_G durata del verde del ciclo semaforico comprendente anche la durata del giallo semaforico

Quest'equazione permette di calcolare il tempo medio d'attesa alle intersezioni semaforizzate ideale, ovvero il tempo che i ciclisti dovrebbero attendere all'intersezione se non decidessero di proseguire con il rosso.

Per tenere conto del reale comportamento degli utenti alle intersezioni quest'equazione va moltiplicata per un coefficiente $\beta \in [0,1]$, un parametro adimensionale, che dipende dal comportamento dei ciclisti all'intersezioni.

Se $\beta=0$ il comportamento medio dei ciclisti è molto lontano dal comportamento ideale: questo valore di β indica che il tempo d'attesa medio reale dei ciclisti alle intersezioni è pari a zero e quindi nessun ciclista si ferma in corrispondenza dell'intersezione; $T_w \neq T_w'$ e in particolare $T_w' = 0$

Se $\beta=1$ invece, il comportamento dei ciclisti è opposto a quello appena descritto ovvero tutti i ciclisti che arrivano all'incrocio con semaforo rosso si fermano e attendono che il semaforo diventi verde prima di ripartire; in questo caso $T_w = T_w' \neq 0$

Per le intersezioni analizzate il coefficiente β vale in media 0,45; questo valore è stato ottenuto dal rapporto tra il tempo medio d'attesa all'intersezione, ottenuto dal software, e il valore di T_w calcolato con il modello.

La formula (1.4) diventa:

$$T_W' = \frac{1}{2} \beta \frac{T_R^2}{T_R+T_G} \quad (1.5)$$

7.4. APPLICAZIONE DEL MODELLO ALLE INTERSEZIONI ANALIZZATE

Nelle tabelle che seguono sono specificati i valori dei parametri da utilizzare nel modello per le intersezioni analizzate; in particolare nel tempo di verde risulta compreso anche la durata del giallo in quanto è stato ipotizzato che in corrispondenza del giallo i ciclisti proseguono senza fermarsi.

Tabella 9-Valori utilizzati nel modello, Porta San Felice

<i>Parametri del modello</i>	<i>Valori parametri</i>
$T_G=T_G+T_Y$	25
T_R	132

Tabella 10- Valori utilizzati nel modello, Porta San Donato

<i>Parametri del modello</i>	<i>Valori parametri</i>
$T_G=T_G+T_Y$	21
T_R	124

Con i valori di T_G e T_R indicati in tabella 9 e in tabella 10, il tempo d'attesa all'intersezione semaforizzata calcolata con la (1.3) risulta:

Tabella 11- Tempo medio d'attesa all'intersezione semaforizzata da modello

<i>Intersezioni</i>	$T_W(s)$
<i>Porta San Felice</i>	56
<i>Porta San Donato</i>	53

Confrontando i valori di T_W con i valori dei tempi medi d'attesa parziali forniti dal Dipartimento è stato possibile verificare l'attendibilità del modello: infatti, i tempi d'attesa calcolati dal modello sono molto simili ai valori ottenuti dai rilievi manuali.

In seguito è stata applicata la formula (1.4) per tener conto del fatto che i ciclisti non sempre si fermano quando arrivano all'intersezione e il semaforo è rosso:

Tabella 12- Valori di β per l'intersezione di Porta San Felice, nelle due direzioni

Porta San Felice	
Direzioni	β
<i>Sant'Isaia</i> → <i>Lame</i>	0.41
<i>Lame</i> → <i>Sant'Isaia</i>	0.47

Tabella 13-Tempo medio d'attesa reale, Porta San Felice

Porta San Felice	
Direzioni	$T_w'(s)$
<i>Sant'Isaia</i> → <i>Lame</i>	23
<i>Lame</i> → <i>Sant'Isaia</i>	26

Il parametro β calcolato per l'incrocio semaforizzato di Porta San Felice, direzione Porta Sant'Isaia - Porta Lame, vale 0,41 mentre nella direzione opposta β risulta pari a 0,47.

Tabella 14- Valori di β per l'intersezione di Porta San Donato, nelle due direzioni

Porta San Donato	
Direzioni	β
<i>San Donato</i> → <i>Centro</i>	0.45
<i>Centro</i> → <i>San Donato</i>	0.40

Tabella 15- Tempo medio d'attesa reale, Porta San Donato

Porta San Donato	
Direzioni	$T_w'(s)$
<i>San Donato</i> → <i>Centro</i> ($\beta=0.45$)	23.9
<i>Centro</i> → <i>San Donato</i> ($\beta=0.40$)	21.2

Il parametro β calcolato per l'incrocio semaforizzato di Porta San Donato, direzione Porta San Donato - Centro, vale 0,45 mentre nella direzione opposta β risulta pari a 0,40.

I valori di T_w' ottenuti sono ovviamente uguali ai valori dei tempi d'attesa medi forniti dal software (essendo β dato dal rapporto tra il tempo medio d'attesa fornito dal software e il valore di T_w); il valore di β così determinato, permette al modello matematico di riprodurre i tempi d'attesa ottenuti dal software ma a noi interessano i valori veri che sono invece quelli misurati. Questi calcoli sono stati

effettuati per mostrare dei tipici valori che può assumere il parametro β in modo che, a partire da altri incroci, conoscendo i soli tempi di rosso e ciclo semaforico si possa individuare un ipotetico tempo di attesa.

Ovviamente ogni incrocio ha proprie caratteristiche in quanto a sicurezza e quindi i valori di β potrebbero essere molto diversi per alcuni incroci; questo potrebbe essere un argomento di ricerca per sviluppi futuri che potrebbero far diventare β una funzione dipendente da vari attributi anziché una costante.

CONCLUSIONI

In questa tesi è stato redatto un modello per il calcolo dei tempi d'attesa dei ciclisti alle intersezioni semaforizzate che avesse valenza generale ed attraverso una serie di fasi successive è stato possibile verificare l'attendibilità del modello.

I tempi d'attesa ottenuti dall'analisi delle tracce GPS sul programma SUMOPy sono stati confrontati con i valori dei tempi medi d'attesa da rilievi manuali, forniti dal DICAM- Trasporti dell'Università di Bologna: il valore ottenuto dalle analisi risulta in genere inferiore rispetto a quello fornito dal Dipartimento.

Questo dipende dal fatto che i dati sui tempi d'attesa forniti dal Dipartimento sono stati ottenuti da spostamenti effettuati da rilevatori che non hanno commesso infrazione, fermandosi in corrispondenza del semaforo rosso e quindi le misure risultano condizionate. Invece i tempi d'attesa totali calcolati con SUMOPy comprendono anche le tracce di ciclisti che non si fermano all'intersezione, sebbene il semaforo sia rosso.

Dalle tracce GPS non è possibile risalire al numero di ciclisti che arrivati all'intersezione semaforizzata hanno incontrato il segnale luminoso disposto al verde o al rosso. Tale informazione è invece desumibile dai rilievi manuali.

Sulla base di questo dato, la media dei tempi d'attesa ottenuti dal software, considerando solo tempi d'attesa non nulli, si avvicina molto alla media stimata dai rilievi manuali, con una differenza di 5-10 secondi, dovuti principalmente a errori di precisione del dispositivo di localizzazione GPS. Questo risultato ha permesso di verificare l'attendibilità del software.

Una volta verificata l'attendibilità dei tempi di sosta misurati da SUMOPy, si è proceduto con la definizione del modello che permette di calcolare il tempo medio d'attesa ideale alle intersezioni semaforizzate ovvero il tempo medio che i ciclisti dovrebbero attendere all'intersezione se rispettassero sempre il semaforo rosso.

Il modello è stato confrontato con le tracce del DICAM in cui i rilevatori rispettano il semaforo ed i valori sono risultati molto simili.

Per tener conto del reale comportamento degli utenti, in particolare di quelli che non attendono il semaforo verde per passare, tale modello è stato modificato con l'introduzione di un coefficiente moltiplicativo β minore di 1 che dipende oltre

che dal comportamento dei ciclisti in corrispondenza di un incrocio semaforizzato anche dalla geometria dell'intersezione.

Dall'analisi dei tempi di attesa rilevati manualmente alle intersezioni semaforizzate di Porta San Felice e Porta San Donato, è stata evidenziata la prevalente tendenza dei ciclisti in attraversamento alle intersezioni semaforizzate a commettere infrazione, senza rispettare il segnale luminoso di arresto. Dal confronto tra tempi stimati e tempi rilevati è stato ricavato un valore medio per il coefficiente β pari a 0.45, da cui è stato ricavato che i tempi di attesa reali sono circa la metà di quelli ideali.

Il calcolo dei tempi d'attesa dei ciclisti alle intersezioni semaforizzate è un tema ancora non molto approfondito come è emerso dallo studio della letteratura. Per approfondire il tema sarebbe opportuno analizzare più intersezioni semaforizzate al fine di trovare una correlazione tra β e altri attributi quali ad esempio la geometria dell'intersezione semaforizzata o la durata del ciclo semaforico, per fornire un valore di β che non sia costante ma che tenga conto delle diverse variabili che contraddistinguono ogni intersezione.

BIBLIOGRAFIA

ANPA, *Mobilità ciclistica nelle aree urbane. Politiche per una mobilità sostenibile in Italia e in Europa*, 2002

Birgillito G., *Metodi di map-matching per l'identificazione degli itinerari dei ciclisti*, 2016.

Campagnoli C., *Un'indagine sperimentale sui tempi d'attesa dei ciclisti alle intersezioni semaforizzate*, 2017.

Castaldini S., *Analisi dei dati GPS raccolti dai ciclisti nell'area Urbana di Bologna mediante l'applicazione del metodo di map-matching*, 2017.

Cinelli G., *Una rassegna sui sistemi di geolocalizzazione per dispositivi mobili*, 2016.

Manum B., Arnesen P., Nordstrom T., Gil J., *Improving GIS- based models for bi cycling speed estimation*, 2018.

Piscione G., *Ricostruzione dei tempi d'attesa dei ciclisti alle intersezioni semaforizzate*, 2017.

Poliziani C., *Sviluppo di un modello di domanda basato sulle attività tramite micro- simulazioni di reti di trasporto multi- modali*, 2017.

Schweizer J., *SUMOPy: an advanced simulation suite for SUMO*, 2014.

Sharafat C.M., *Traffic Micro-simulation Modelling & SUMOPy User Manual*, 2013.

Strauss J., Luis F. Miranda-Moreno, *Speed, travel time and delay for intersections and road segments in the Montreal network using cyclist Smartphone GPS data*, 2017.

Xiaobao Yang, Mei Huan , Mohamed Abdel-Aty , Yichuan Peng , Ziyou Gao, *A hazard-based duration model for analyzing crossing behavior of cyclists and electric bike riders at signalized intersections*, 2015.

<https://www.bikeitalia.it/2014/12/15/i-nuovi-dati-sulluso-della-bici-in-europa/>

<http://www.cyclingchallenge.eu/>

<https://mobike.com/it/>

<https://www.cittametropolitana.bo.it/portale/>

<http://pumsbologna.it/>

