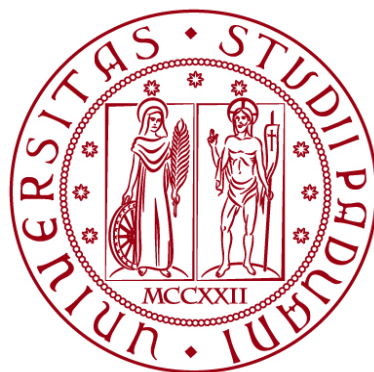


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E
AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA

**VALUTAZIONE DELL'IMPATTO DELLA
COMPOSIZIONE DEL PARCO VEICOLARE SULLE
EMISSIONI INQUINANTI MEDIANTE
MICROSIMULAZIONE: UN CASO STUDIO**

Relatore: Chiar.mo Prof. Ing. CLAUDIO MENEGUZZER

Laureando: GABRIELE MORRONE

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

INDICE

INTRODUZIONE	1
1.1 IL PESO DEI TRASPORTI NELL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO	1
1.2 INQUADRAMENTO BIBLIOGRAFICO.....	1
1.3 SCHEMA DELL'ELABORATO	2
L'AMBIENTE DI MICROSIMULAZIONE AIMSUNNEXT	3
2.1 IL SOFTWARE	3
2.2 MODELLI UTILIZZATI NELLA MICROSIMULAZIONE	3
2.3 CENTROIDI E MATRICI O/D	5
2.4 CONTROLLO DEI FLUSSI NELLE INTERSEZIONI.....	6
2.5 MODELLI DI EMISSIONI	6
2.6 OUTPUT	6
IMPLEMENTAZIONE DEL CASO STUDIO	8
3.1 DESCRIZIONE DELLA RETE	8
3.2 TIPOLOGIE DI STRADE	8
3.3 MATRICI O/D UTILIZZATE	9
3.4 DIVERSIFICAZIONE DELLE FLOTTE VEICOLARI PER TIPO DI ALIMENTAZIONE.....	11
3.5 DIVERSIFICAZIONE DEI VEICOLI IN BASE ALLE PRESTAZIONI.....	12
ANALISI DEI DATI.....	14
4.1 OUTPUT CONSIDERATI	14
4.2 VALORI AGGREGATI	15
4.3 SERIE TEMPORALI	17
4.4 EMISSIONI IN FUNZIONE DEL TEMPO DI PERCORRENZA.....	19
4.5 EMISSIONI IN FUNZIONE DEL RITARDO	23
DISCUSSIONE DEI RISULTATI	26
5.1 TENDENZE DEI VALORI AGGREGATI	26
5.2 TENDENZE TRA LE SERIE TEMPORALI.....	26
CONCLUSIONI.....	29
BIBLIOGRAFIA.....	30
BIBLIOGRAFIA DIRETTA	30
BIBLIOGRAFIA INDIRETTA.....	31

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 1 - Capacità dei tratti stradali in base alla tipologia	9
Tabella 2 - Matrice Origine-Destinazione per il traffico di veicoli leggeri nell'ora media	10
Tabella 3 - Matrice Origine-Destinazione del traffico di veicoli pesanti nell'ora media	11
Tabella 4 - Distribuzioni percentuali di motorizzazione implementate nella simulazione	12
Tabella 5 - Accelerazione dei veicoli implementata nella simulazione, distinta per alimentazione	13
Tabella 6 – Equazioni delle rette di regressione che descrivono le emissioni di CO ₂ , NO _x e PM in funzione della percentuale di veicoli elettrici	16
Tabella 7 – Pendenza, ordinata all'origine e fattori di significatività statistica per le regressioni lineari effettuate sui valori di CO ₂ emessa rispetto al tempo totale di percorrenza medio	21
Tabella 8 - Pendenza, ordinata all'origine e fattori di significatività statistica per le regressioni lineari effettuate sui valori di NO _x emessi rispetto al tempo totale di percorrenza medio	21
Tabella 9 - Pendenza, ordinata all'origine e fattori di significatività statistica per le regressioni lineari effettuate sui valori di PM emessi rispetto al tempo totale di percorrenza medio	21
Tabella 10 - Pendenza, ordinata all'origine e fattori di significatività statistica per le regressioni lineari-logaritmiche effettuate sui valori di VOC emessi rispetto al tempo totale di viaggio medio	22
Tabella 11 - Pendenza, ordinata all'origine e fattori di significatività statistica per le regressioni lineari effettuate sui valori di CO ₂ emessa rispetto al ritardo medio per chilometro	25
Tabella 12 - Pendenza, ordinata all'origine e fattori di significatività statistica per le regressioni lineari effettuate sui valori di NO _x emessa rispetto al ritardo medio per chilometro	25
Tabella 13 - Pendenza, ordinata all'origine e fattori di significatività statistica per le regressioni lineari effettuate sui valori di PM emessa rispetto al ritardo medio per chilometro	25
Tabella 14 - Pendenza, ordinata all'origine e fattori di significatività statistica per le regressioni lineari effettuate sui valori di VOC emessa rispetto al ritardo medio per chilometro	25
Tabella 15 - Confronto tra l'andamento dei coefficienti angolari delle rette di regressione relative alle emissioni di CO ₂ e l'andamento delle percentuali di autoveicoli alimentati a combustibile	27
Tabella 16 - Confronto tra l'andamento dei coefficienti angolari delle rette di regressione relative alle emissioni di NO _x e l'andamento delle percentuali di autoveicoli alimentati a combustibile	27
Tabella 17 - Confronto tra l'andamento dei coefficienti angolari delle rette di regressione relative alle emissioni di PM e l'andamento delle percentuali di autoveicoli alimentati a combustibile	28
Tabella 18 - Confronto tra l'andamento dei coefficienti angolari delle rette di regressione relative alle emissioni di VOC e l'andamento delle percentuali di autoveicoli alimentati a combustibile	28

LISTA DELLE FIGURE

Figura 1 - Relazione velocità/densità secondo il modello di deflusso di Gipps	4
Figura 2 - Andamento del gap critico in funzione del tempo di attesa (fonte: Aimsun User Manual)	5
Figura 3 - Fotografia satellitare dell'area oggetto di studio.....	8
Figura 4 - Schema funzionale dell'area con indicazione dei centroidi esterni	10
Figura 5 - Relazione tra percentuale di veicoli elettrici ed anidride carbonica prodotta	15
Figura 6 - Relazione tra percentuale di veicoli elettrici ed ossidi di azoto prodotti.....	15
Figura 7 - Relazione tra percentuale di veicoli elettrici e particolato prodotto.....	16
Figura 8 - Relazione tra percentuale di veicoli elettrici e composti organici volatili prodotti.	16
Figura 9 - Relazione tra percentuale di veicoli elettrici e ritardo medio per chilometro percorso	17
Figura 10 - Confronto tra le serie temporali di tempo totale di percorrenza ed emissioni di anidride carbonica per la flotta circolante CV20	18
Figura 11 - Confronto tra le serie storiche di ritardo medio ed emissioni di particolato e composti organici volatili per chilometro percorso per la flotta circolante IP-3	18
Figura 12 – Rapporto tra anidride carbonica prodotta e tempo totale di viaggio per le varie composizioni della flotta veicolare.	19
Figura 13 - Rapporto tra ossidi di azoto prodotti e tempo totale di viaggio per le varie composizioni della flotta veicolare.	19
Figura 14 - Rapporto tra particolato prodotto e tempo totale di viaggio per le varie composizioni della flotta veicolare	20
Figura 15 - Rapporto tra composti organici volatili emessi e tempo totale di viaggio per le varie composizioni della flotta veicolare	22
Figura 16 - Rapporto tra anidride carbonica emessa e ritardo medio degli autoveicoli per le varie composizioni della flotta veicolare	23
Figura 17 - Rapporto tra ossidi di azoto prodotti e ritardo medio degli autoveicoli per le varie composizioni della flotta veicolare	23
Figura 18 - Rapporto tra particolato prodotto e ritardo medio degli autoveicoli per le varie composizioni della flotta veicolare	24
Figura 19 - Rapporto tra composti organici volatili emessi e ritardo medio degli autoveicoli per le varie composizioni della flotta veicolare.....	24

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

1.1 Il peso dei trasporti nell'inquinamento atmosferico

A livello globale il settore dei trasporti rappresenta una delle principali fonti di inquinamento atmosferico e di emissione dei gas a effetto serra. All'interno dell'Unione Europea, esso produce un quarto delle emissioni complessive di gas serra, ed è un dato in continua crescita. Il trasporto su gomma contribuisce per più del 70%, mentre la restante quota è attribuibile al trasporto aereo e marittimo. Per questo motivo, in linea con gli obiettivi di sostenibilità ambientale delineati a livello internazionale, vengono proposte e studiate un numero sempre crescente di soluzioni per la mobilità volte a ridurre i costi esterni, ovvero l'impatto sull'ambiente e la società. Ad esempio, all'interno dell'accordo europeo denominato "Green Deal europeo", che si propone di ridurre le emissioni nette di gas serra di almeno il 55% entro il 2030 e di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 per l'intera Unione, sono previste misure riguardanti l'incremento del trasporto ferroviario e l'implementazione dell'intelligenza artificiale per la mobilità, ma anche drastiche riduzioni alla vendita di autoveicoli e veicoli commerciali che emettono CO₂. Se si considera che ad oggi in Spagna più dell'85% del trasporto di persone e dell'80% del trasporto merci avviene tramite autoveicoli, si intuisce facilmente l'enorme impatto di una misura simile.

1.2 Inquadramento bibliografico

Sono stati condotti numerosi studi riguardanti vari aspetti legati all'impatto ecologico dei sistemi di trasporto, in quanto la sostenibilità ambientale sta diventando sempre più centrale nella pianificazione e nella gestione di infrastrutture e reti di trasporto.

La complessità del calcolo delle emissioni di gas inquinanti generate dai veicoli all'interno di una rete viene attribuita all'alto numero di variabili che influenzano il problema, le quali non sono tra di loro indipendenti, ma in generale interagiscono tra loro, come, ad esempio, le caratteristiche dei veicoli, i comportamenti di guida, le condizioni ambientali e le differenti origini delle emissioni inquinanti (Smit et al., 2009). Per questo motivo, sono state tentate varie semplificazioni, ad esempio inizialmente sono stati utilizzati modelli che stimassero le emissioni inquinanti prodotte da un flusso veicolare sulla base dei valori aggregati utilizzati per descrivere il deflusso, come la velocità media o il ritardo (Quaassdorff et al., 2016; Alshayeb et al., 2021). La maggior parte di questi modelli si è poi rivelata soltanto parzialmente affidabile, in quanto i valori considerati non erano in grado di rappresentare adeguatamente il flusso veicolare, come evidenziato dall'articolo di rassegna di Pinto et al. (2020).

Successivamente sono stati sviluppati modelli di stima delle emissioni che considerassero i profili cinematici dei veicoli. Una delle metodologie più significative in questa ottica è quella che utilizza il coefficiente VSP (Vehicle Specific Power) come indicatore per le emissioni prodotte da un veicolo in un dato istante. Questo viene calcolato tramite una funzione di velocità ed accelerazione istantanee e si è rivelato essere più affidabile dei modelli basati sugli indicatori aggregati, come ad esempio nel caso studio dell'articolo di Acuto et al. (2022). Nonostante questo, esistono più studi che ne riscontrano una generale inaffidabilità, attribuita anche alla carenza di sensibilità del metodo ai parametri comunemente usati per la calibrazione delle simulazioni (Song et al., 2012).

Un altro modello che utilizza i valori istantanei delle variabili cinematiche dei singoli veicoli è il modello "Panis et al.", che li implementa in una formula bi-parabolica e, nonostante la sua semplicità, si è rivelato capace di stimare le emissioni di CO₂ molto più efficacemente (Lakouari et al., 2020).

I modelli di emissione più affidabili sono, quindi, quelli che utilizzano accelerazione e velocità istantanee dei veicoli. A seguito di una prima fase di calibrazione dei parametri, essi vengono solitamente integrati con software di microsimulazione, in quanto permettono di ottenere i profili cinematici di ogni veicolo il cui deflusso è simulato all'interno dell'area oggetto dello studio. Ad esempio, per lo studio di Gastaldi et al. (2014) è stato utilizzato il software S-Paramics®, mentre nell'articolo di Lu et al (2014) sono stati comparati i risultati ottenuti dalla calibrazione dei software VISSIM ed Aimsun.

Al variare dell'insieme di algoritmi e modelli che caratterizzano i vari software è stato osservato che alcuni sono più rappresentativi per la simulazione di determinati scenari, ad esempio il software Aimsun si è rivelato più adatto alla simulazione del traffico autostradale, in particolare quando utilizzato per il calcolo delle emissioni (Anyu et al., 2014). Per ottenere dati significativi relativi ad altre condizioni di deflusso sono stati condotti vari studi per la ricalibrazione e l'adattamento dei parametri in relazione alla zona oggetto dello studio (Wu et al., 2016) oppure per l'implementazione all'interno dell'ambiente di microsimulazione di modelli di deflusso più sviluppati. Ad esempio, nell' articolo di Samaras et al. (2018) è stato affinato il modello di car-following di Gipps utilizzato da Aimsun con gli accorgimenti proposti dallo studio di Morello et al. (2014).

1.3 Schema dell'elaborato

Il presente elaborato si articola in sei capitoli. Inizialmente viene presentato l'ambiente di microsimulazione AimsunNext ed i vari modelli che utilizza. A seguire vengono descritte le caratteristiche del caso studio sviluppato. Nel quarto capitolo vengono raccolti ed illustrati i dati ottenuti dalle simulazioni, mentre nel quinto le relazioni ottenute vengono confrontate e discusse. Infine, il sesto capitolo è dedicato ad alcune considerazioni finali.

CAPITOLO 2

L'AMBIENTE DI MICROSIMULAZIONE AIMSUNNEXT

2.1 Il software

AimsunNext è un software di proprietà della compagnia Yunex Traffic, azienda specializzata nell'offrire soluzioni per l'automazione di autostrade e gallerie, la gestione del traffico anche tramite controllo attuato, nonché soluzioni intelligenti per i sistemi di pedaggio e di comunicazione V2X. Il software permette la modellazione multimodale delle reti di trasporto ed è in grado di simulare la mobilità a vari livelli di risoluzione, dalla singola intersezione fino ad un'intera regione; permettendo quindi di valutare e pianificare interventi di ogni tipo sulla rete stessa. Per questa analisi è stata utilizzata la versione 22.0.1, pubblicata nel febbraio 2022, con una licenza Student.

La funzione primaria tra quelle che caratterizzano il software è la modellazione di reti stradali esistenti finalizzata alla simulazione di diversi scenari di traffico. Ciò significa, ad esempio, implementare sezioni dedicate ad autoveicoli complete di corsie con differenti caratteristiche geometriche (allineamento orizzontale, verticale e larghezza) e di controllo (limite di velocità imposto), unite da intersezioni a raso con vari tipi di regolazione oppure da intersezioni sfalsate. I flussi di autoveicoli all'interno della rete sono implementati tramite matrici Origine-Destinazione variabili nel tempo, sfruttando anche la possibilità di simulare flotte veicolari differenziate in base alla distribuzione delle tipologie di alimentazione delle autovetture. Dalla micro-simulazione dei flussi il software ottiene i profili cinematici dei singoli veicoli da cui possono essere estrapolati i dati aggregati per un singolo tratto o per l'intera rete. Da questi si possono calcolare l'andamento delle variabili descrittive dei flussi di traffico, come densità, ritardo ed headway medio; infine, tramite appositi modelli di emissione si possono ottenere le emissioni inquinanti generate dai veicoli in funzione delle condizioni di deflusso del singolo tratto o area.

2.2 Modelli utilizzati nella microsimulazione

La micro-simulazione di flussi di traffico si basa sull'applicazione ad ogni veicolo entrante nella rete del modello di car-following di Gipps (1981), per il quale l'accelerazione di ogni veicolo è funzione della distanza tra esso e quello che lo precede, tenendo in considerazione la necessità di una minima distanza tra essi, nonché di accelerazione e decelerazione medie, caratteristiche di ogni veicolo, e della velocità massima assegnata al singolo veicolo. Tale velocità viene fissata per ogni veicolo all'interno di un intervallo definito intorno al limite di velocità considerato nel tratto in ragione dell'aggressività di guida di ogni conducente ed

assume il significato di velocità di deflusso libero. Per ogni intervallo temporale viene quindi calcolata la velocità di ogni veicolo, dal cui integrale si ottiene la posizione ad ogni iterazione. Sviluppando il modello di Gipps per le grandezze aggregate che descrivono il deflusso veicolare, si ottiene la relazione tra velocità media e densità sintetizzata dal grafico di *figura 1*.

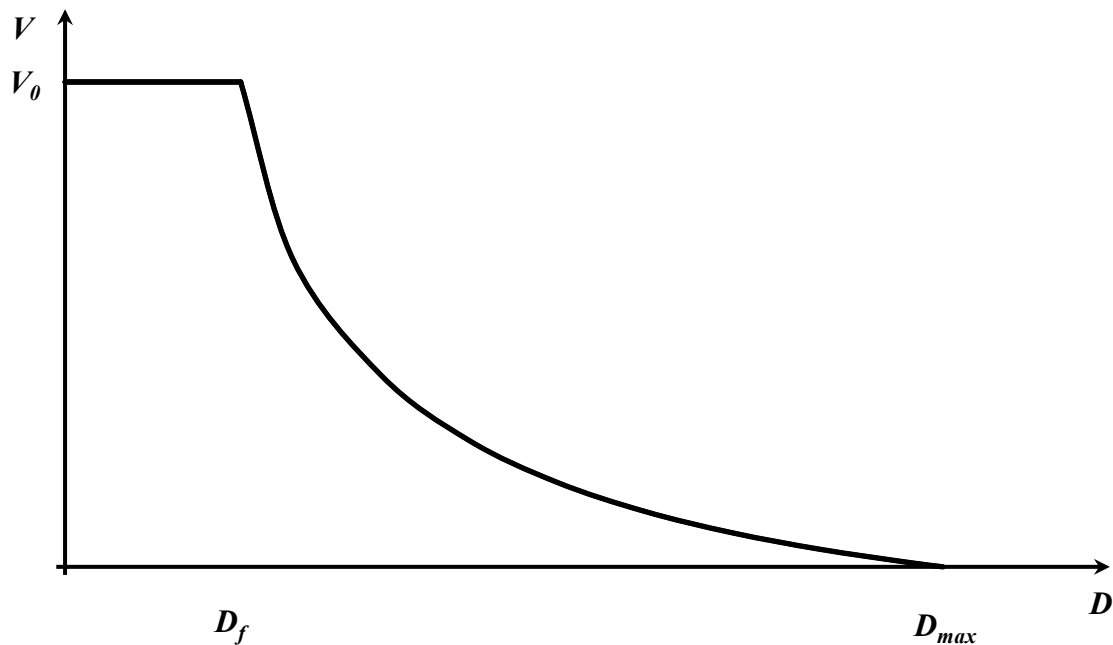


Figura 1 - Relazione velocità/densità secondo il modello di deflusso di Gipps

Il modello è opportunamente adattato per i tratti curvi, nei quali la velocità massima dei veicoli viene ridotta leggermente, nonché per i tratti in cui si hanno due corsie, nei quali si limita la velocità massima dei veicoli nella corsia più veloce in funzione della velocità dei veicoli più lenti presenti nella corsia o rampa di immissione adiacente ovvero che potrebbero immettersi improvvisamente nel flusso veicolare, utilizzando quindi dei modelli di car-following a due corsie.

Per quanto riguarda sia il cambio di corsia sia il comportamento dei veicoli alle intersezioni regolate a priorità, è invece considerato un modello di accettazione dell'intervallo temporale a disposizione per compiere la manovra desiderata. In questo caso, il gap temporale accettato è determinato in base a distanza, velocità ed accelerazione dei veicoli che sopraggiungono nei flussi antagonisti, ma diminuisce linearmente tra un valore massimo ed uno minimo in base al tempo trascorso in attesa dal veicolo (*figura 2*).

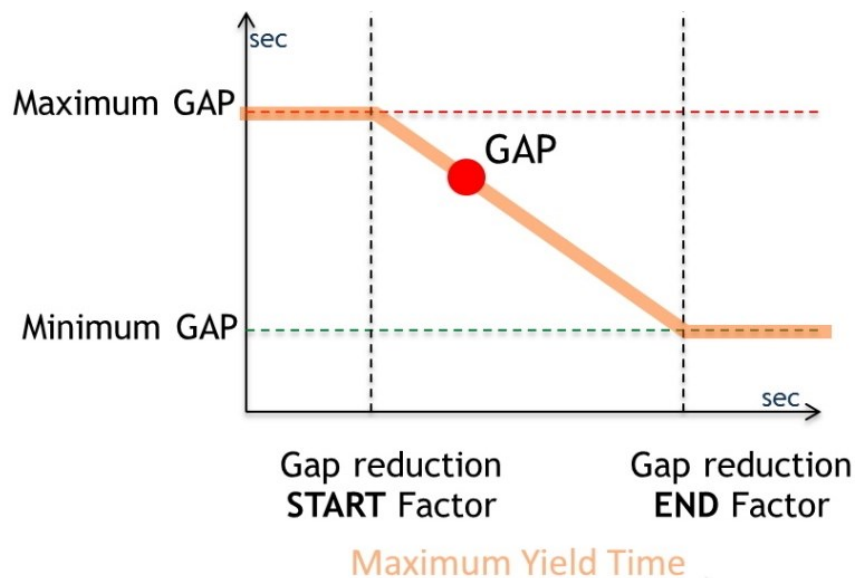


Figura 2 - Andamento del gap critico in funzione del tempo di attesa (fonte: Aimsun User Manual)

Il comportamento dei veicoli all'interno delle rampe di immissione viene simulato tramite una coda con disciplina First In-First Out, ovvero considerando l'esecuzione della manovra di immissione in ordine di arrivo alla rampa, e non prima che il veicolo sia sufficientemente vicino alla fine della rampa. Inoltre, viene fissata una "distanza di cooperazione", per cui i veicoli del flusso principale rallentano nel caso in cui vi siano veicoli nella rampa di immissione sufficientemente vicini alla fine di questa, permettendo l'inserimento nella corrente principale e facilitando quindi il deflusso. Essa viene tipicamente fissata pari alla lunghezza della rampa, ma la probabilità che un veicolo del flusso principale cooperi con il veicolo che si immette è di default fissata all' 80%.

2.3 Centroidi e Matrici O/D

Per la descrizione delle reti di trasporto solitamente si ricorre ad un'operazione di aggregazione spaziale che permette di idealizzare in nodi puntiformi, detti centroidi, determinate aree, permettendo così l'analisi dei flussi tra di essi. Per poter simulare i flussi all'interno dell'area oggetto dello studio, il software permette la creazione di centroidi zonali al di fuori dell'area stessa, ovvero tramite una zonizzazione esterna si individuano i flussi veicolari entranti ed uscenti dall'area studio. Ad essi vengono quindi associate delle matrici Origine-Destinazione, ovvero delle matrici quadrate, di ordine pari al numero di centroidi considerati, aventi come elementi il numero di veicoli generati da un determinato centroide ed attratti ad un altro. Viene poi data la possibilità di implementare differenti matrici O/D per le varie composizioni della flotta veicolare, sia distinguendo autovetture e mezzi pesanti che in termini di tipo di motorizzazione. Inoltre, nel caso studio le varie matrici O/D sono state combinate ottenendo sia diverse tipologie di veicoli nella rete allo stesso tempo, sia diversi volumi di traffico nel tempo, andando quindi a simulare un'ora di punta con una fase di carico ed una di scarico del sistema.

2.4 Controllo dei flussi nelle intersezioni

Per ogni nodo stradale presente nella rete AimsunNext permette di determinare la relativa tipologia di controllo. Possono essere simulate intersezioni con regolazione a priorità con l'apposizione della segnaletica di “dare precedenza”, intersezioni prive di segnaletica, in cui può essere considerato il criterio di precedenza a destra o precedenza per il flusso principale (come nel caso delle immissioni da rampa), intersezioni con regolazione a priorità con l'apposizione di segnaletica di stop, e infine intersezioni regolate mediante impianto semaforico, sia con controllo individuale che con controllo coordinato lungo un percorso o su di un'area.

2.5 Modelli di emissioni

L'ambiente di microsimulazione di AimsunNext22 offre cinque diversi modelli per valutare i costi ambientali dell'utilizzo di un sistema di trasporto. Il modello che più si presta alle caratteristiche del caso studio considerato, in quanto si è dimostrato approssimare correttamente le emissioni inquinanti di autoveicoli in un'area prevalentemente extraurbana, è il “Panis et al. Pollutant Emission Model”. Esso è stato definito e calibrato nel 2006 e permette di stimare le emissioni dei singoli veicoli a partire dalla tipologia di motorizzazione e dal profilo cinematico di questi. Permette il calcolo delle emissioni di CO₂, NO_x, PM₁₀ e VOC del veicolo n all'istante t tramite la formula parametrica (1), le cui variabili sono accelerazione e velocità istantanea del veicolo e per la quale è disponibile la taratura dei fattori f_i per le differenti motorizzazioni.

$$E_n(t) = \max [E_0 = 0; f_1 + f_2 v_n(t) + f_3 v_n(t)^2 + f_4 a_n(t) + f_5 a_n(t)^2 + f_6 v_n(t) a_n(t)] \quad (1)$$

Inoltre, per il calcolo delle emissioni di composti organici volatili (VOC) ed ossidi di azoto (NO_x) quando i veicoli decelerano con $a_n(t) < -0.5 \frac{m}{s^2}$, ovvero durante una brusca frenata, vengono considerati differenti valori dei coefficienti f_i in quanto le emissioni di questi composti aumentano sensibilmente rispetto ad i valori rilevabili nelle altre fasi.

Il modello di emissioni è applicabile agli autoveicoli alimentati a diesel, benzina e GPL, mentre non prevede alcuna emissione per i veicoli elettrici. Per i mezzi pesanti invece, il modello è stato calibrato soltanto per la motorizzazione diesel.

2.6 Output

Per ogni simulazione effettuata il software permette di determinare svariati indicatori di performance e di costo, riguardanti sia l'intera rete sia singoli segmenti, e la loro variazione durante la durata della simulazione, ovvero in base al livello di carico della rete. Quelli di maggiore rilevanza sono il perditempo medio degli utenti, la densità ed il flusso dei veicoli, la velocità media, la lunghezza di coda media ed il tempo mediamente trascorso da fermi. Inoltre, vengono fornite le emissioni di CO₂, NO_x, PM₁₀ e VOC prodotte dai veicoli, secondo il modello

di emissioni scelto, per ogni segmento considerato, sia in valore assoluto che in relazione ai chilometri percorsi; con la possibilità di differenziare in base alla tipologia di veicolo. Inoltre, ad ogni andamento sono associati i valori medi nell'intera simulazione e la deviazione standard del valore in ogni intervallo di iterazione.

Infine, a seguito di più simulazioni con i medesimi input, per ogni variabile di interesse si possono calcolare i valori medi sulle iterazioni, in modo da ottenere valori più rappresentativi, come evidenziato da studi precedenti (Lu et al., 2014; Gastaldi et al., 2014).

CAPITOLO 3

IMPLEMENTAZIONE DEL CASO STUDIO

3.1 Descrizione della rete

L'area selezionata per il caso studio (*figura 3*) è situata in una zona industriale una decina di chilometri a nord della città spagnola di Valencia. È stata selezionata sia a causa della presenza di due rotonde caratterizzate da alti flussi di traffico, sia in quanto i segmenti stradali considerati non presentano né possibili fermate intermedie né entrate ed uscite con flussi significativi, al di fuori delle sezioni agli estremi dell'area, facilitando quindi la stima dei flussi che attraversano la rete.

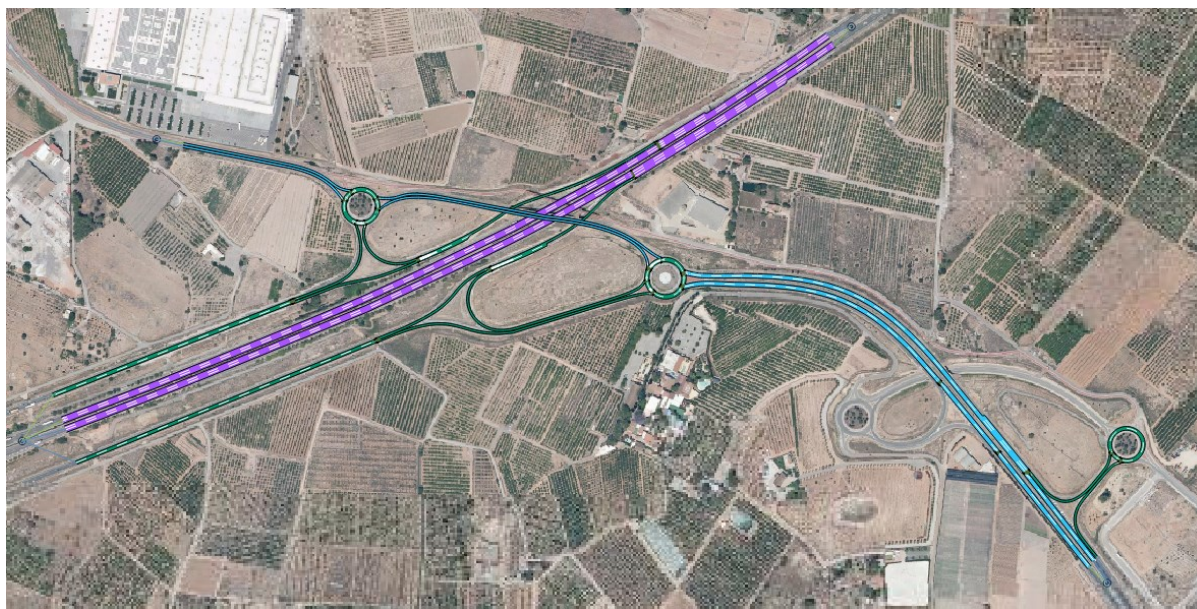


Figura 3 - Fotografia satellitare dell'area oggetto di studio

3.2 Tipologie di strade

Nell'area analizzata sono presenti differenti tipologie di strade, alle quali sono associati differenti valori caratteristici per vari parametri, di cui il più importante ai fini del caso studio è la velocità massima consentita.

I segmenti con il limite di velocità più elevato sono i due tratti dell'autostrada A7 (*Autovía del Mediterráneo*), uno per direzione, caratterizzati da $V_{lim} = 120 \text{ km/h}$; con le rispettive rampe di accesso ed uscita e strade di tipo collettore-distributore, con limite di velocità fissato a $V_{lim} = 70 \text{ km/h}$.

Inoltre, sono presenti due segmenti della strada CV-32, facenti parte della rete stradale della comunità autonoma di Valencia (*Carreteres de la Comunitat Valenciana*), uno per direzione, con $V_{lim} = 70 \text{ km/h}$; che contengono tre rotatorie ed incrociano i segmenti autostradali sopramenzionati, permettendo tramite una intersezione a livelli sfalsati a rombo modificato di entrare ed uscire dal tratto autostradale, ed inoltre collegano le zone industriali presenti nelle vicinanze. Dall'area in esame sono stati esclusi alcuni tratti di strade di tipo collettore-distributore ed un'altra strada "regionale" che andrebbero a chiudere l'intersezione.

Va notato che nella maggior parte delle autostrade spagnole non è richiesto il pagamento di un pedaggio; infatti, nell'area considerata non sono presenti caselli né altre infrastrutture per il *Road Pricing*.

Sia i limiti di velocità che la larghezza delle corsie (pari a 3.5 metri) sono stati implementati nella simulazione assumendo che la rete stradale reale segua i requisiti minimi fissati dal codice spagnolo per la progettazione di infrastrutture stradali (3.1-Instrucción de Carreteras); mentre la capacità delle sezioni è quella fornita da Aimsun in relazione alla tipologia di ogni tratto.

I valori di capacità delle varie sezioni sono riassunti nella seguente tabella, espressi in *Passenger Car Units*, per i quali bisogna quindi considerare che viene utilizzato un coefficiente di omogeneizzazione per i mezzi pesanti pari a 1.9.

Tabella 1 - Capacità dei tratti stradali in base alla tipologia

Tratto considerato	Tipologia	Classificazione (3.1-IC)	Capacità di ogni corsia [$PCUs/h$]
Autostradale	A-120	Gruppo 2	2100
Strada di tipo collettore-distributore	C-70	Gruppo 3	900
Strada regionale	C-70	Gruppo 3	900

3.3 Matrici O/D utilizzate

I dati relativi ai flussi di traffico caratterizzanti l'area oggetto dello studio sono stati ottenuti a partire dalle mappe di traffico pubblicate dal "Ministero dei Trasporti, della Mobilità e dei Programmi Urbani" spagnolo e dalla "*Generalitat Valenciana*".

Per quanto riguarda i tratti autostradali, si hanno a disposizione i valori di traffico giornaliero medio annuo (AADT) e la percentuale di mezzi pesanti del deflusso ottenuti dalle misurazioni effettuate tramite una stazione secondaria, situata a nord-est dell'area in esame.

Per i tratti della strada regionale invece, oltre ad AADT e percentuale dei mezzi pesanti, sono disponibili dati più completi, comprendenti anche la distribuzione oraria del traffico durante la giornata media come rilevato in due differenti stazioni permanenti, situate rispettivamente alle estremità nord e sud dell'area in esame.

È stato quindi ottenuto un coefficiente di punta pari a 2, definito come il rapporto tra il volume di traffico dell'ora di punta e quello dell'ora media all'interno della giornata. Assumendo che il traffico sia uniformemente distribuito nell'area, è possibile andare a definire due differenti matrici O/D, una relativa all'ora media ed una relativa all'orario di punta, che vengono assunte come riferimento per descrivere le differenti condizioni di carico del sistema.

Conseguentemente ai dati disponibili ed alla conformazione dell'area, sono stati identificati 4 centroidi esterni, uno per ogni sezione entrante nell'area di analisi rispettivamente dell'autostrada e della strada regionale, come rappresentato nella *figura 4*:

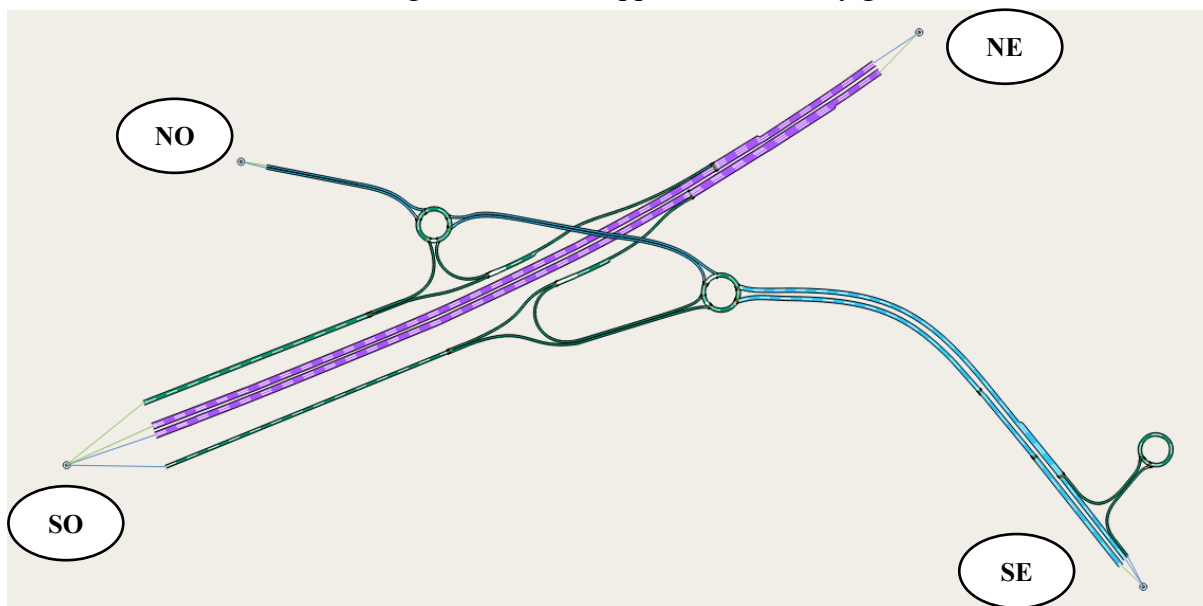


Figura 4 - Schema funzionale dell'area con indicazione dei centroidi esterni

L'intensità oraria media per i tre centroidi per i quali sono presenti dati rilevati (ovvero NE, SE, NO) è ottenuta semplicemente dividendo per 24 l'intensità media giornaliera annua.

Per ottenere le matrici Origine-Destinazione viene considerata l'ipotesi di uguaglianza tra i flussi attratti e generati per ogni centroide, utilizzando il traffico giornaliero medio annuo come coefficiente di attrazione e generazione di spostamenti. Per il centroide SO è stato considerato lo stesso valore del centroide NE, in quanto essi sono situati ai due estremi del tratto autostradale che attraversa l'area.

La matrice ottenuta è mostrata in *tabella 2* e descrive l'intensità del traffico di veicoli leggeri per l'ora media:

Tabella 2 - Matrice Origine-Destinazione per il traffico di veicoli leggeri nell'ora media

O/D	SE	NE	NO	SO
SE		188	33	197
NE	257		109	624
NO	34	72		71
SO	127	730	34	

Ripetendo il procedimento per i valori di flusso dei mezzi pesanti si ottiene la seguente matrice:

Tabella 3 - Matrice Origine-Destinazione del traffico di veicoli pesanti nell'ora media

O/D	SE	NE	NO	SO
SE		26	1	27
NE	42		8	373
NO	1	5		5
SO	10	393	2	

Tramite il coefficiente di punta si ottengono poi le matrici relative allo stato del sistema durante l'ora di punta. Combinando le matrici ottenute si configura una domanda di traffico distribuita su tre ore, di cui la prima e la terza simulano un'ora media, mentre a quella centrale è associata la matrice O/D relativa all'ora di punta, permettendo quindi di analizzare sia la formazione di rallentamenti e code nel sistema, sia la loro dissipazione al diminuire della domanda.

3.4 Diversificazione delle flotte veicolari per tipo di alimentazione

A partire dalle matrici Origine-Destinazione relative al traffico di autoveicoli, sono state poi implementate differenti matrici variando la distribuzione percentuale tra le motorizzazioni considerate, ovvero benzina, diesel, GPL ed elettrico. In questo modo si intende ottenere per le medesime condizioni di flussi nel sistema differenti quantitativi di emissioni inquinanti, cercando quindi di simulare le variazioni dei costi esterni legati alle emissioni nocive in una rete stradale in seguito all'evoluzione della flotta veicolare che la utilizza.

Le prime distribuzioni percentuali implementate, da utilizzare come riferimento, sono quelle corrispondenti al parco veicolare della comunità valenciana negli anni 2020 e 2021, come rilevate dall'istituto di statistica della comunità Valenciana (*Institut Valencià d'Estadística*). Per permettere l'utilizzo del modello di emissioni scelto, sono state effettuate le seguenti semplificazioni:

- gli autoveicoli alimentati a metano sono stati considerati come alimentati a GPL
- gli autoveicoli dotati di doppia alimentazione sono stati considerati come utilizzati nella modalità meno inquinante, ad esempio i veicoli ad alimentazione ibrida con motore endotermico a benzina accoppiato al motore elettrico sono stati considerati come elettrici.

Seguendo le recenti tendenze, derivanti anche da accordi internazionali sul clima, sono state poi ipotizzate altre distribuzioni di motorizzazioni con una progressiva diminuzione dei veicoli a motore endotermico, in particolare diesel e benzina, ed un aumento della parte della flotta alimentata elettricamente. Le distribuzioni considerate sono le seguenti:

Tabella 4 - Distribuzioni percentuali di motorizzazione implementate nella simulazione

Alimentazione	CV 20	CV 21	IP-1	IP-2	IP-3
Diesel [%]	52.0	51.2	50.1	48.3	45.1
Benzina [%]	47.7	48.3	42.4	37.7	33.2
GPL [%]	0.2	0.2	0.6	1.8	3.4
Elettrico [%]	0.1	0.3	6.9	12.2	18.3

3.5 Diversificazione dei veicoli in base alle prestazioni

Conseguentemente alla differenziazione della flotta in base alla motorizzazione, si dovrebbero avere veicoli con prestazioni differenti. Realisticamente, si può avanzare l'ipotesi che in media i motori endotermici offrano prestazioni tra di loro simili in termini cinematici e di guida su strada, mentre siano i motori elettrici a presentare differenze sostanziali nell'esperienza di guida.

In particolare, in fase di decelerazione si osserva una leggera differenza dovuta alla presenza del meccanismo di frenata rigenerativa che al rilascio dell'acceleratore applica una resistenza alle ruote che ricarica sostanzialmente la batteria del veicolo; a differenza dei motori esclusivamente endotermici. Per questi ultimi però il motore al rilascio dell'acceleratore "recupera di giri" rallentando leggermente, ed il cambio manuale solitamente installato permette di rallentare riducendo manualmente il rapporto di coppia tra motore e ruote grazie alla trasmissione manuale; per cui non si ritiene necessario differenziare i valori di decelerazione media dei veicoli.

Al contrario, i veicoli ibridi ed elettrici, equiparati all'interno del modello, sono generalmente dotati di una maggiore accelerazione rispetto a veicoli equivalenti con il solo motore endotermico, conseguentemente al principio di funzionamento dei motori elettrici. Per questa ragione, nella simulazione sono stati implementati differenti valori di accelerazione per i veicoli elettrici, ottenuti a partire dai dati relativi all'accelerazione da fermi di differenti veicoli (pubblicati dai produttori). L'accelerazione per ognuno dei modelli considerati è stata calcolata sotto l'ipotesi che questa sia costante durante l'aumento della velocità fino ai 100 km/h ; ovvero tramite:

$$a = \frac{v_f - v_i}{\Delta t} = \frac{100 \text{ km/h}}{\Delta t}$$

Effettuato un campionamento su 15 modelli di vari produttori, è stato poi calcolato il valore medio dell'accelerazione (escludendo i due valori estremi), mentre la deviazione standard è stata calcolata imponendo il medesimo coefficiente di variazione CV utilizzato di default dal software. A questo punto i valori di accelerazione massima e minima sono stati definiti aggiungendo e sottraendo al valore medio tre deviazioni standard, in modo da rappresentare

l'ampia distribuzione campionaria. I valori ottenuti per le automobili elettriche sono sintetizzati nella *tabella 5* e comparati con quelli implementati di default nel software, utilizzati invariati per i veicoli a motore endotermico.

Tabella 5 - Accelerazione dei veicoli implementata nella simulazione, distinta per alimentazione

	Accelerazione [m/s^2]	Coefficiente di Variazione	Deviazione Standard [m/s^2]	Valore minimo [m/s^2]	Valore massimo [m/s^2]
Automobili elettriche	5.06	0.067	0.34	4.04	6.08
Automobili con motorizzazione endotermica	3.00	0.067	0.2	2.6	3.4

Si nota immediatamente che le automobili elettriche (ed ibride) avranno un'accelerazione molto maggiore nella simulazione, variando il loro comportamento all'interno del modello di car-following, ovvero i profili cinematici ottenuti.

CAPITOLO 4

ANALISI DEI DATI

4.1 Output considerati

Sono state effettuate sei replicazioni della simulazione per ogni flotta veicolare implementata nel modello, in linea con lo sviluppo di studi simili (Gastaldi et al, 2014; Song et al, 2012). Per ognuna delle grandezze considerate vengono, quindi, utilizzati i valori medi sulle sei replicazioni, in modo da aumentarne la significatività statistica.

Ognuna delle simulazioni ha la durata di tre ore, nominalmente dalle ore 7:00 alle 10:00, con un'ora di intensità relativa all'orario di punta tra due ore di traffico medio, così come registrato dalle stazioni di rilevamento del traffico dell'area considerata. I valori ottenuti dalle microsimulazioni si riferiscono a tutti i veicoli che sono usciti dall'area della simulazione durante i 10 minuti precedenti all'indicatore temporale associato. Ad esempio, i grammi di CO₂ associati all'indicatore temporale 8:30:00 sono quelli prodotti da tutti i veicoli che sono usciti dalla rete tra le 8:20:01 e le 8:30:00. Conseguentemente, non vi sono valori relativi agli estremi temporali delle simulazioni, in quanto non attendibili, visto che parte dei veicoli non ha attraversato completamente l'area simulata.

Le variabili considerate sono:

- **Tempo Totale di viaggio (Total Travel Time):** tempo di percorrenza totale relativo a tutte le autovetture che hanno attraversato la rete. Include il tempo trascorso nella coda virtuale, ovvero la coda eventualmente formata all'esterno della rete dai veicoli in entrata. È misurato in ore.
- **Ritardo (Delay Time):** perditempo medio per veicolo per chilometro. Questa è la differenza tra il tempo di percorrenza effettivo ed il tempo di percorrenza previsto, ovvero il tempo necessario per attraversare il sistema in condizioni ideali. Viene calcolato come media estesa a tutti gli autoveicoli e poi omogeneizzato in base ai chilometri percorsi. Non include il tempo trascorso all'interno della coda virtuale. È misurato in secondi a chilometro.
- **Emissioni (IEM Emission):** Il totale delle emissioni inquinanti emesse da tutti i veicoli usciti dalla rete nell'intervallo temporale considerato. Per valutarne la relazione con il perditempo, viene omogeneizzato in base ai chilometri percorsi. Non essendo disponibili dei modelli per il calcolo delle emissioni per i mezzi pesanti che non siano alimentati a diesel, ci si riferirà alle emissioni prodotte soltanto dagli autoveicoli. È misurato o in grammi o in grammi a chilometro.

Inizialmente si andranno a considerare i valori aggregati per ogni gruppo di sei simulazioni, successivamente si analizzeranno le serie temporali di ogni variabile di interesse e le relative correlazioni con le composizioni della flotta veicolare implementate.

4.2 Valori aggregati

I valori aggregati possono essere utilizzati per descrivere complessivamente le serie storiche delle differenti medie, ottenute dalle sei microsimulazioni.

Per ogni flotta circolante implementata, la rappresentazione delle quantità in grammi di CO₂, NO_x e PM emesse in funzione della percentuale di veicoli elettrici, che caratterizza la flotta, mostra un trend lineare decrescente (*figure 5, 6 e 7*). Calcolandone le equazioni delle rette di regressione ed il fattore R² per ognuno dei casi viene confermata la rappresentatività del modello lineare scelto (*tabella 6*).

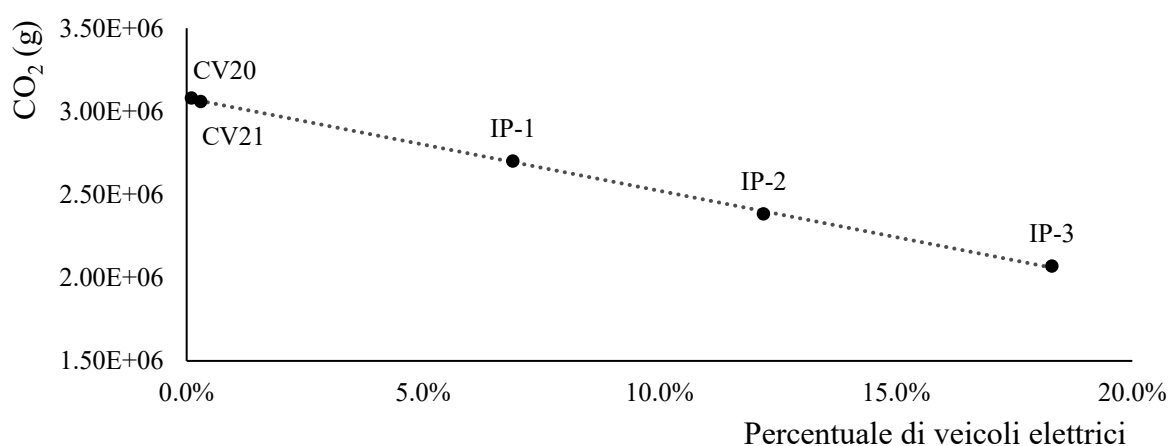


Figura 5 - Relazione tra percentuale di veicoli elettrici ed anidride carbonica prodotta

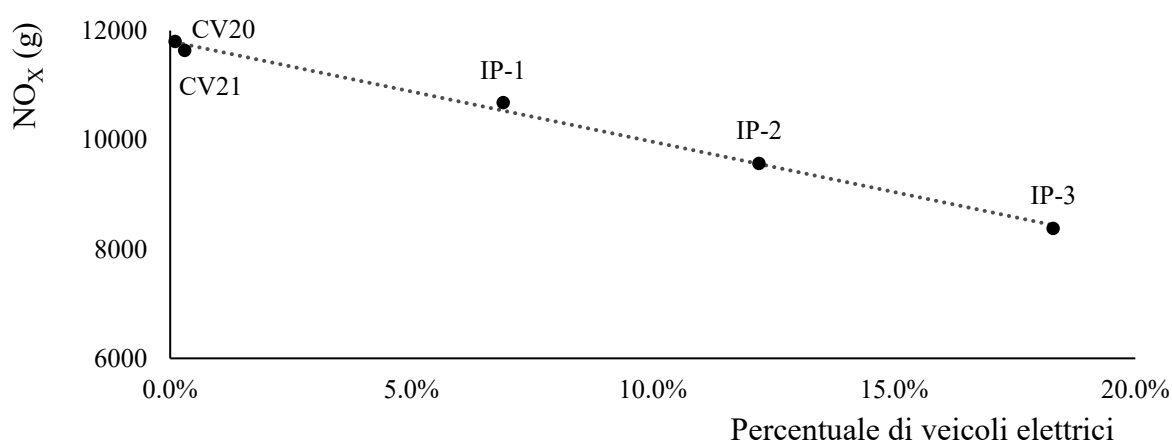


Figura 6 - Relazione tra percentuale di veicoli elettrici ed ossidi di azoto prodotti

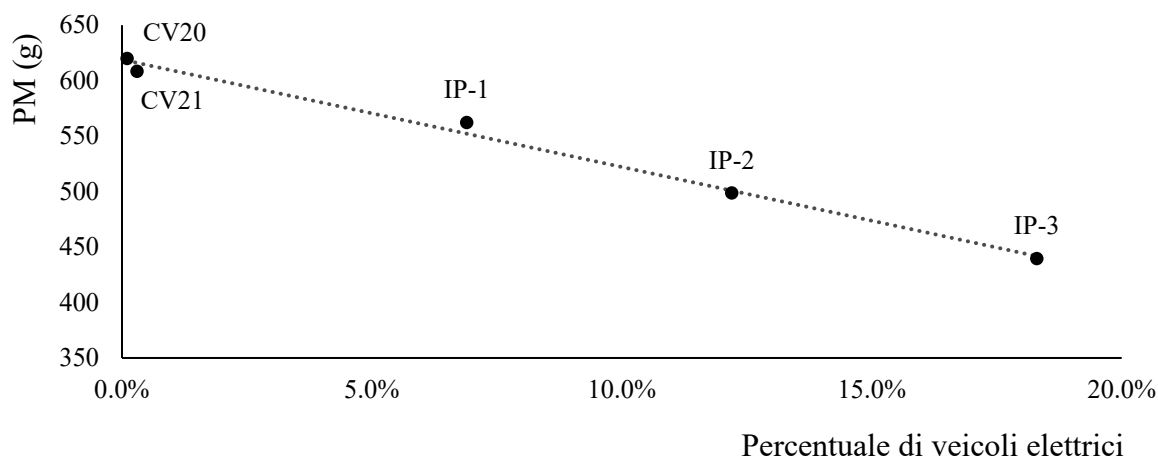


Figura 7 - Relazione tra percentuale di veicoli elettrici e particolato prodotto

Tabella 6 – Equazioni delle rette di regressione che descrivono le emissioni di CO_2 , NO_x e PM in funzione della percentuale di veicoli elettrici

Inquinante [g]	Equazione della retta di regressione, con x percentuale di veicoli elettrici	Fattore R^2
CO_2	$CO_2 = -5.67 \cdot 10^6 x + 3.08 \cdot 10^6$	0.9994
NO_x	$NO_x = -18394 x + 11804$	0.9956
PM	$PM = -968 x + 619$	0.9925

Al contrario, la rappresentazione delle emissioni di VOC in funzione della percentuale di veicoli elettrici viene meglio descritta da un andamento logaritmico decrescente, di equazione $VOC_{[g]} = -81.5 \cdot \ln(x) + 1069.1$; sia x la percentuale di veicoli elettrici. La scelta del modello è supportata da un valore di $R^2=0.947$, leggermente più alto rispetto a quello che si ottiene con un'interpolazione lineare dei medesimi valori.

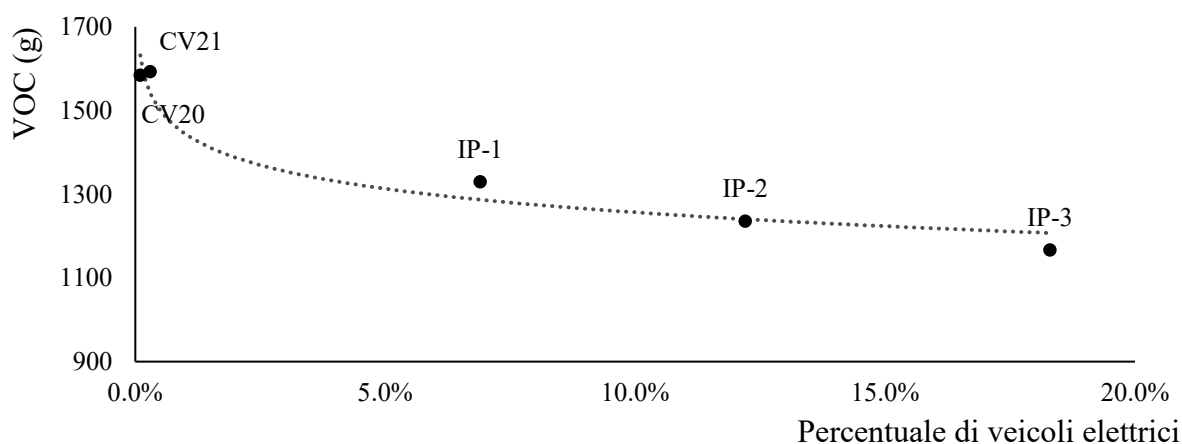


Figura 8 - Relazione tra percentuale di veicoli elettrici e composti organici volatili prodotti

Ricercando invece un legame tra le grandezze caratteristiche del deflusso veicolare e la composizione della flotta, si osserva l'esistenza di una correlazione logaritmica con il perditempo per chilometro dei veicoli leggeri, calcolato come valor medio dei perditempi di tutti i veicoli leggeri che attraversano la simulazione (*figura 9*). L'equazione ottenuta è $Ritardo_{[s/km]} = -0.0321 \cdot \ln(p) + 5.4885$ ed è consolidata da un fattore $R^2=0.9528$.

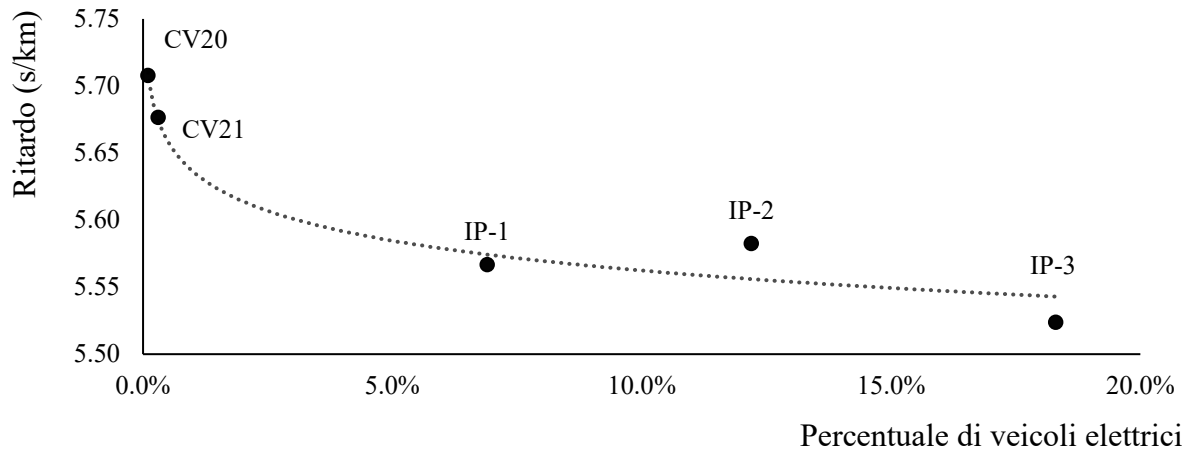


Figura 9 - Relazione tra percentuale di veicoli elettrici e ritardo medio per chilometro percorso

4.3 Serie temporali

Relativamente alle serie temporali, si nota come sia il tempo totale di viaggio all'interno del sistema che il perditempo medio di ogni autoveicolo seguano un andamento che rispecchia quello dei quantitativi di emissioni inquinanti. Ad esempio, considerando la serie temporale del tempo di percorrenza totale medio delle simulazioni effettuate con la distribuzione percentuale di motorizzazione che rispecchia quella effettivamente circolante nella comunità valenciana nel 2020, e riportandola nel medesimo grafico della serie temporale media delle emissioni di CO₂ per la medesima flotta circolante, si ottiene il grafico di *figura 10*.

Considerando invece l'andamento del ritardo medio, si nota la medesima relazione confrontandolo con l'andamento delle emissioni mediamente prodotte per chilometro percorso dagli autoveicoli. Ad esempio, sovrapponendo la serie temporale del ritardo medio con quelle delle emissioni medie di particolato e di composti organici volatili per le simulazioni che considerano la distribuzione percentuale di motorizzazione IP-3, si ottiene il grafico di *figura 11*.

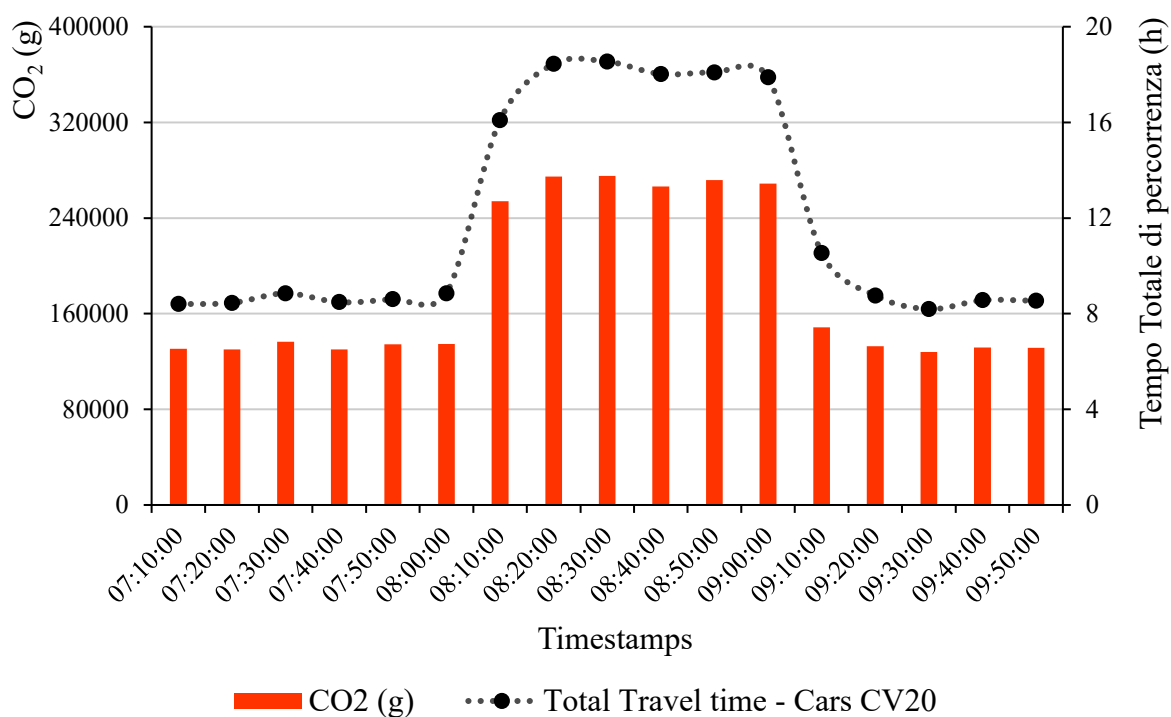


Figura 10 - Confronto tra le serie temporali di tempo totale di percorrenza ed emissioni di anidride carbonica per la flotta circolante CV20

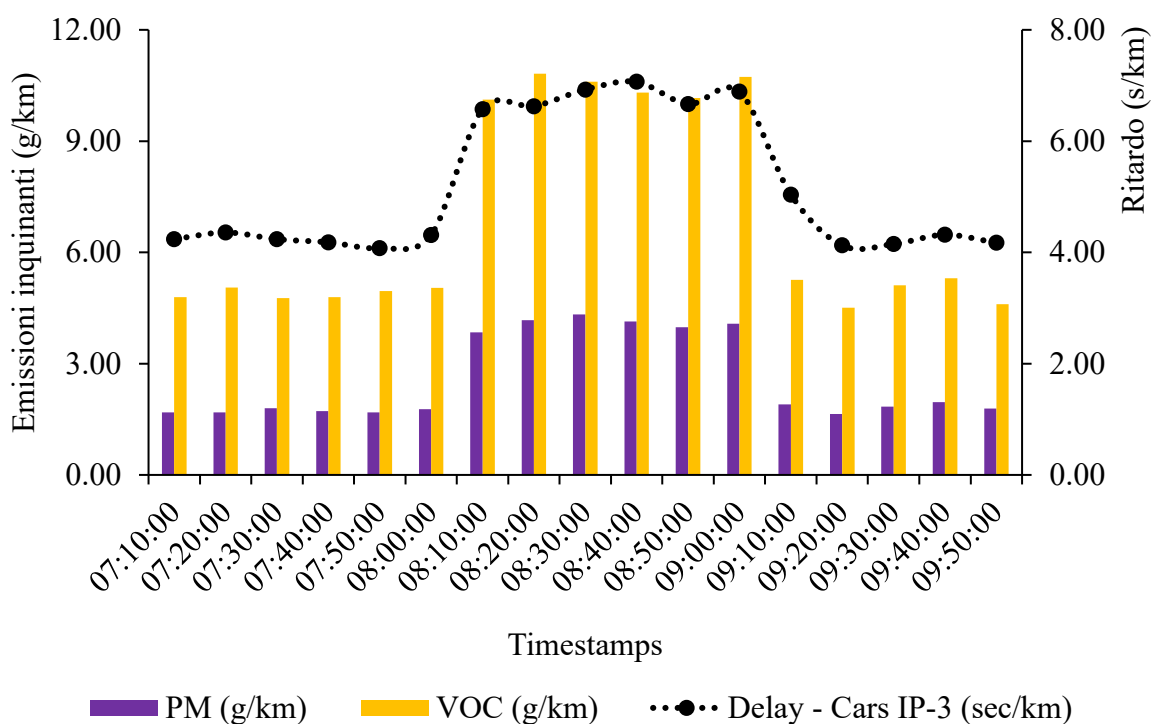


Figura 11 - Confronto tra le serie storiche di ritardo medio ed emissioni di particolato e composti organici volatili per chilometro percorso per la flotta circolante IP-3

4.4 Emissioni in funzione del tempo di percorrenza

Accoppiando le serie temporali si possono ottenere delle relazioni quantitative che legano il tempo totale di viaggio degli autoveicoli all'interno del sistema per un certo intervallo temporale con le emissioni inquinanti prodotte dagli stessi nell'intervallo. Per quanto riguarda le emissioni di anidride carbonica, di ossidi di azoto e di particolato, la relazione lineare è quella che risulta meglio descrivere il legame tra le variabili. Sinteticamente, possono essere visualizzate tramite i grafici seguenti.

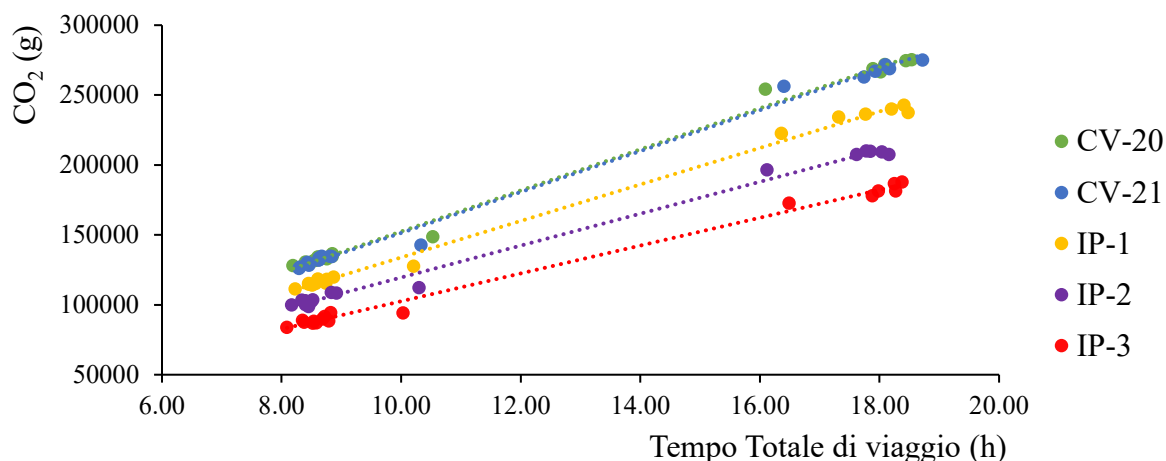


Figura 12 – Rapporto tra anidride carbonica prodotta e tempo totale di viaggio per le varie composizioni della flotta veicolare.

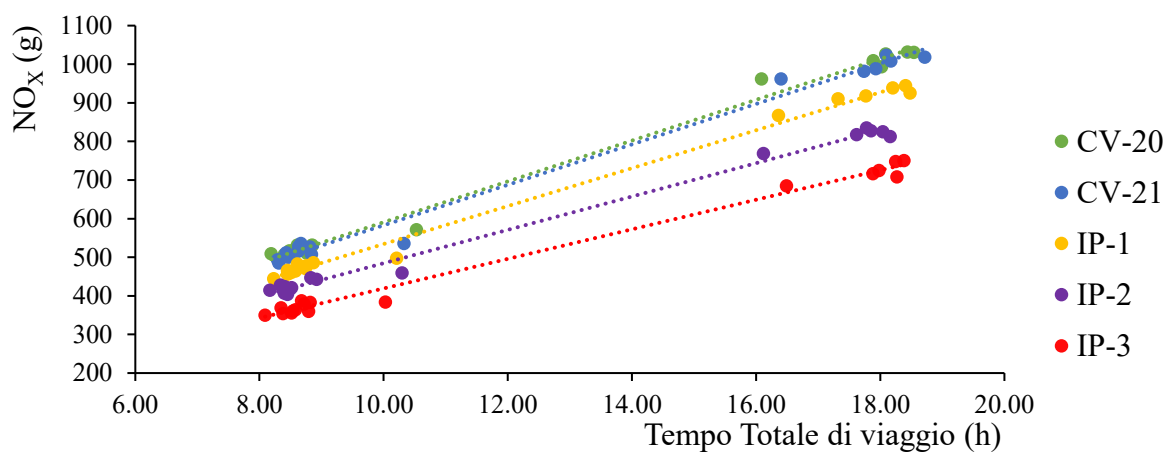


Figura 13 - Rapporto tra ossidi di azoto prodotti e tempo totale di viaggio per le varie composizioni della flotta veicolare.

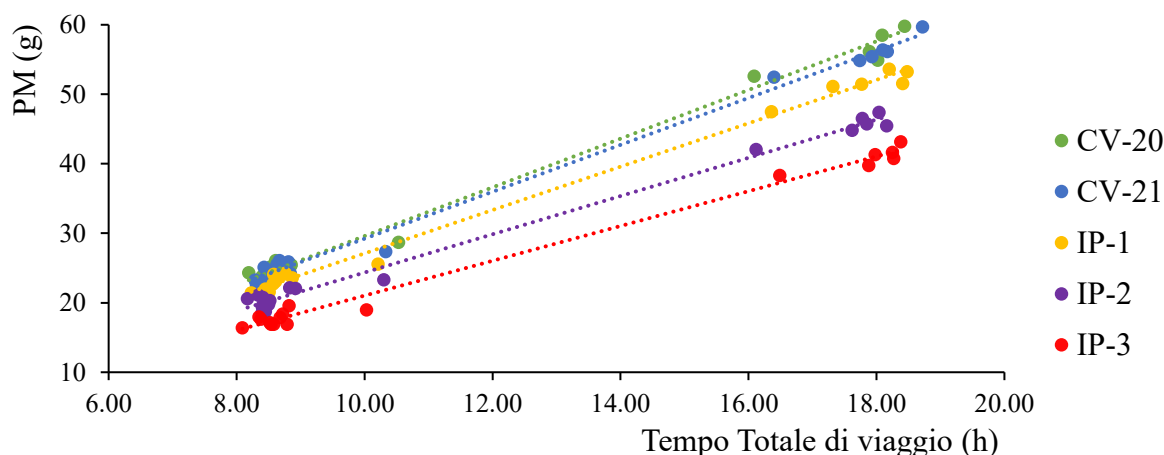


Figura 14 - Rapporto tra particolato prodotto e tempo totale di viaggio per le varie composizioni della flotta veicolare

Dalla procedura di regressione lineare si ottengono i coefficienti m e b che caratterizzano le rette, di tipo $\text{emissioni} = m \cdot (\text{tempo totale di percorrenza}) + b$, ed i relativi errori. Inoltre, sono calcolati alcuni indicatori statistici per determinare l'affidabilità del modello utilizzato rispetto ai dati, ovvero l'efficacia nel rappresentarli. Questi sono i fattori R^2 , F e t .

- Il fattore R^2 descrive l'adattabilità della retta di regressione alla distribuzione di dati, ha valore compreso tra 0 ed 1 e tende ad uno all'aumentare della rappresentatività dei dati da parte del modello.
- Il fattore F invece descrive la probabilità che la relazione trovata tra la variabile dipendente e la variabile indipendente sia soltanto casuale e relativa alla specifica distribuzione considerata. Si utilizza per il test di ipotesi F , un test ad una coda sulla significatività della relazione lineare che utilizza la distribuzione F di Fisher.
- Il fattore t si calcola come rapporto tra il valore del coefficiente di pendenza m ed il relativo errore standard. Si utilizza per il test t , un test a due code che quantifica la probabilità che il valore ottenuto sia dovuto ad una casualità tramite la distribuzione t di Student.

Per entrambe le statistiche test è stato considerato un livello di significatività $\alpha=1\%$, per cui i valori ottenuti dalle regressioni lineari per i due fattori sono stati rispettivamente confrontati con i valori delle distribuzioni $F_{0.01,1,15} = 8.683$ e $t_{0.005,15} = 3.286$.

Per quanto riguarda le emissioni di anidride carbonica, ossidi di azoto e particolato, i tre fattori hanno confermato il modello di regressione lineare per tutte le distribuzioni della flotta veicolare circolante considerate.

I valori ottenuti per i vari inquinanti in relazione al tempo totale di viaggio medio per ogni intervallo temporale simulato sono riassunti nelle tabelle seguenti.

Tabella 7 – Pendenza, ordinata all'origine e fattori di significatività statistica per le regressioni lineari effettuate sui valori di CO₂ emessa rispetto al tempo totale di percorrenza medio

CO ₂	CV 20	CV 21	IP-1	IP-2	IP-3
m	14688	14636	13048	11409	9958
b	5552	5018	3402	5449	2939
R²	0.9954	0.9951	0.9962	0.9944	0.9949
F	3243.4	3020.3	3930.9	2677.1	2911.4
t	57.0	55.0	62.7	51.7	54.0

Tabella 8 - Pendenza, ordinata all'origine e fattori di significatività statistica per le regressioni lineari effettuate sui valori di NO_x emessi rispetto al tempo totale di percorrenza medio

NO _x	CV 20	CV 21	IP-1	IP-2	IP-3
m	52.86	52.39	49.11	43.19	38.29
b	62.06	58.84	43.21	52.62	36.24
R²	0.9935	0.9909	0.9949	0.9940	0.9927
F	2293.5	1637.8	2915.8	2481.6	2035.8
t	47.9	40.5	54.0	49.8	45.1

Tabella 9 - Pendenza, ordinata all'origine e fattori di significatività statistica per le regressioni lineari effettuate sui valori di PM emessi rispetto al tempo totale di percorrenza medio

PM	CV 20	CV 21	IP-1	IP-2	IP-3
m	3.503	3.374	3.120	2.751	2.504
b*	-5.425	-4.518	-4.101	-3.156	-4.006
R²	0.9933	0.9945	0.9949	0.9929	0.9928
F	2207.7	2703.3	2943.0	2083.7	2077.7
t	47.0	52.0	54.2	45.6	45.6

Per quanto riguarda le emissioni di composti organici volatili, si riscontra che il modello che meglio descrive la relazione con il tempo totale di viaggio all'interno delle simulazioni sia quello di regressione lineare-logaritmica, ovvero quello descritto dall'equazione $VOC = m \cdot \log_{10}(\text{tempo totale di viaggio}) + b$; coerentemente con quanto osservato per i valori

aggregati. Si può visualizzare nel grafico di *figura 15*. I valori ottenuti applicando i medesimi metodi dei casi precedenti, che confermano la scelta del modello, sono riassunti nella *tabella 9*.

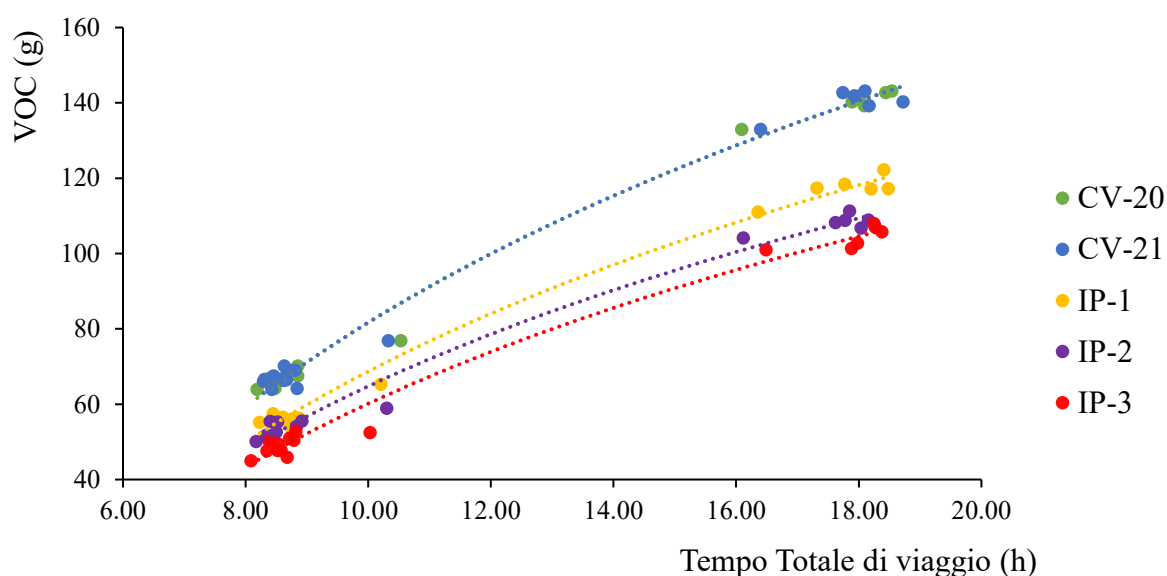


Figura 15 - Rapporto tra composti organici volatili emessi e tempo totale di viaggio per le varie composizioni della flotta veicolare

Tabella 10 - Pendenza, ordinata all'origine e fattori di significatività statistica per le regressioni lineari-logaritmiche effettuate sui valori di VOC emessi rispetto al tempo totale di viaggio medio

VOC	CV 20	CV 21	IP-1	IP-2	IP-3
m	230.4	232.3	193.7	174.7	174.0
b*	-148.8	-150.2	-125.0	-110.0	-113.9
R²	0.9933	0.9928	0.9932	0.9899	0.9897
F	2219.9	2075.1	2175.5	1475.9	1434.6
t	47.1	45.6	46.6	38.4	37.9

* Si segnala che i valori relativi alle ordinate all'origine delle funzioni calcolate per le emissioni di PM e VOC non hanno alcun significato fisico, in quanto negativi.

4.5 Emissioni in funzione del ritardo

Valutando invece la relazione tra le serie storiche che quantificano le emissioni per chilometro percorso e le serie storiche relative al perditempo medio degli autoveicoli all'interno del sistema, si evidenzia una dipendenza lineare per tutti gli inquinanti considerati. Sinteticamente, si può visualizzare attraverso i seguenti grafici.

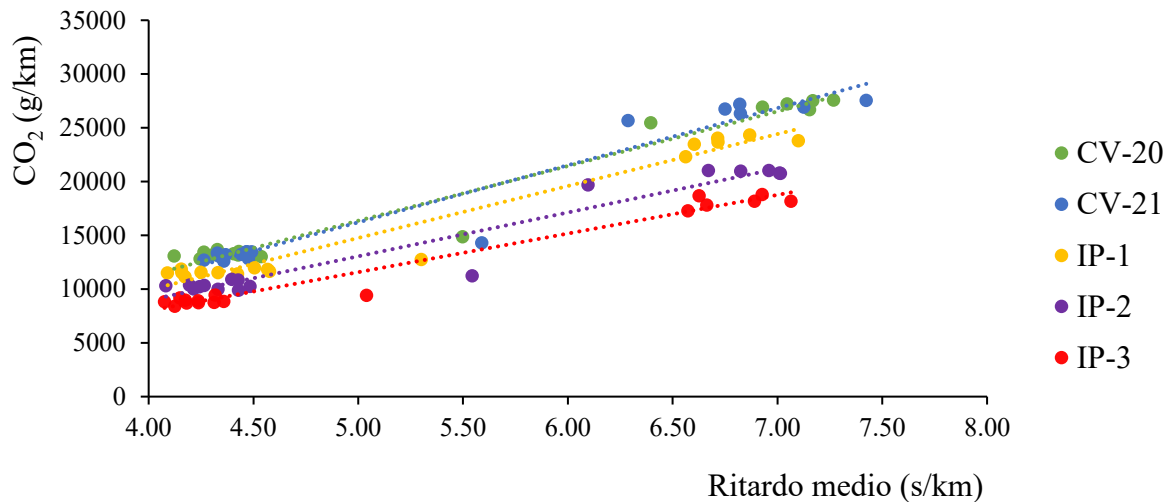


Figura 16 - Rapporto tra anidride carbonica emessa e ritardo medio degli autoveicoli per le varie composizioni della flotta veicolare

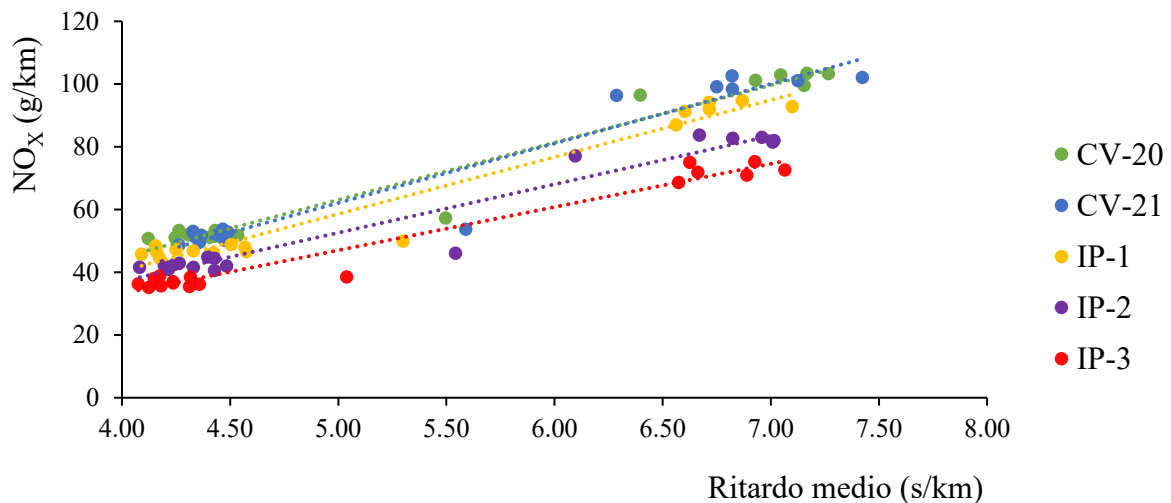


Figura 17 - Rapporto tra ossidi di azoto prodotti e ritardo medio degli autoveicoli per le varie composizioni della flotta veicolare

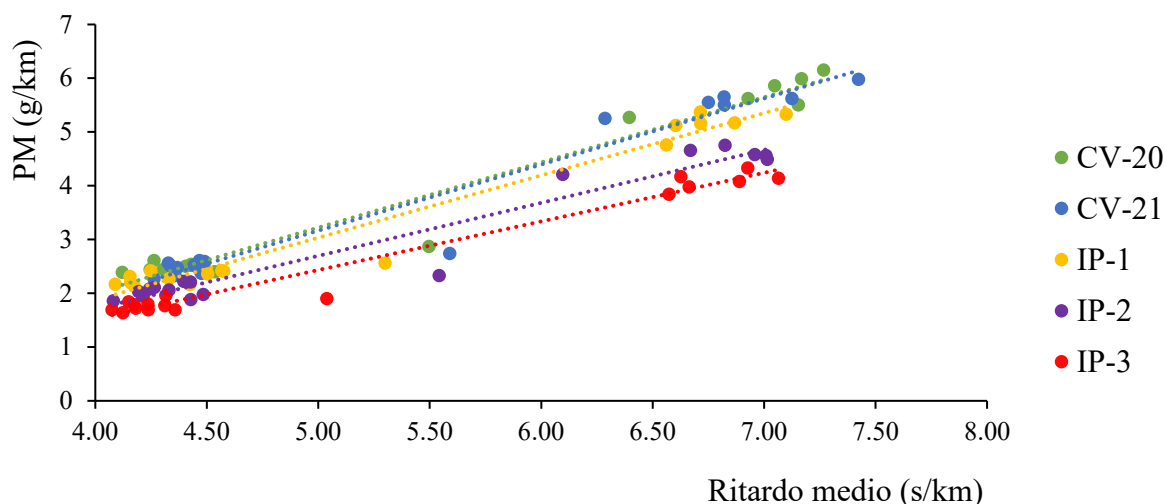


Figura 18 - Rapporto tra particolato prodotto e ritardo medio degli autoveicoli per le varie composizioni della flotta veicolare

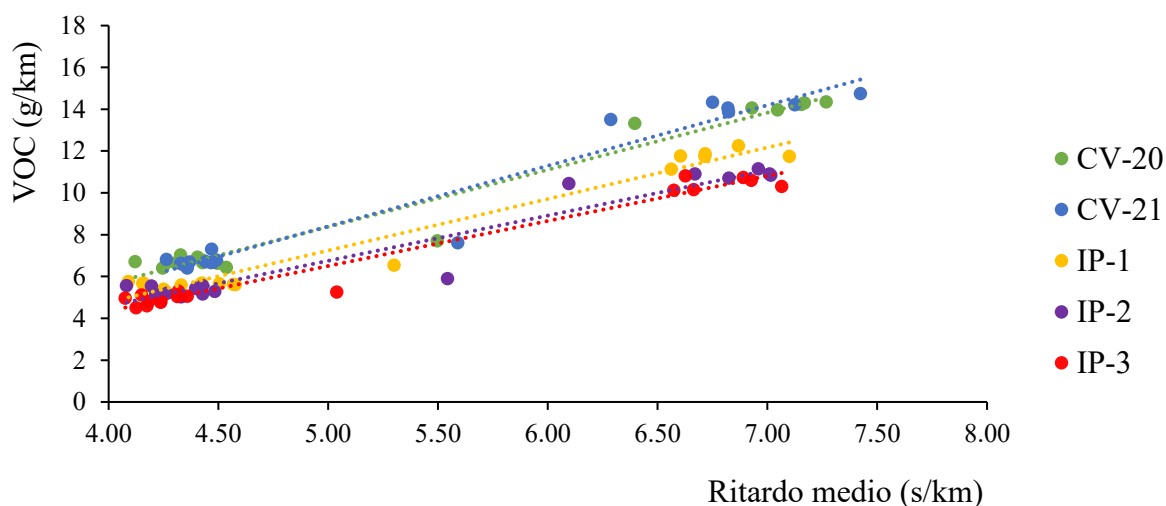


Figura 19 - Rapporto tra composti organici volatili emessi e ritardo medio degli autoveicoli per le varie composizioni della flotta veicolare

Applicando i metodi di verifica probabilistica dei modelli già visti per i casi precedenti, la scelta del modello di regressione lineare viene confermata. Tuttavia, com'è anche intuibile dalle rappresentazioni grafiche, si può notare che la significatività statistica del modello è leggermente ridotta. I valori numerici ottenuti dalla regressione lineare sono riportati nelle tabelle seguenti.

* Si segnala che i valori ottenuti per le ordinate all'origine delle rette di regressione calcolate non hanno alcun significato fisico, in quanto negativi.

Tabella 11 - Pendenza, ordinata all'origine e fattori di significatività statistica per le regressioni lineari effettuate sui valori di CO₂ emessa rispetto al ritardo medio per chilometro

CO ₂	CV 20	CV 21	IP-1	IP-2	IP-3
m	5082	5314	4832	4076	3592
b*	-9050	-10364	-9409	-7330	-6387
R²	0.9639	0.9440	0.9609	0.9379	0.9726
F	400.5	252.8	368.8	226.4	532.9
t	20.0	15.9	19.2	15.0	23.1

Tabella 12 - Pendenza, ordinata all'origine e fattori di significatività statistica per le regressioni lineari effettuate sui valori di NO_x emessa rispetto al ritardo medio per chilometro

NO _x	CV 20	CV 21	IP-1	IP-2	IP-3
m	18.28	18.96	18.15	15.45	13.79
b*	-28.30	-32.69	-32.18	-24.63	-21.94
R²	0.9609	0.9343	0.9559	0.9395	0.9671
F	368.6	213.3	325.1	232.8	441.1
t	19.2	14.6	18.0	15.3	21.0

Tabella 13 - Pendenza, ordinata all'origine e fattori di significatività statistica per le regressioni lineari effettuate sui valori di PM emessa rispetto al ritardo medio per chilometro

PM	CV 20	CV 21	IP-1	IP-2	IP-3
m	1.213	1.229	1.158	0.986	0.904
b*	-2.841	-2.981	-2.758	-2.232	-2.088
R²	0.9632	0.9502	0.9632	0.9420	0.9737
F	392.4	286.3	392.6	243.5	554.4
t	19.8	16.9	19.8	15.6	23.5

Tabella 14 - Pendenza, ordinata all'origine e fattori di significatività statistica per le regressioni lineari effettuate sui valori di VOC emessa rispetto al ritardo medio per chilometro

VOC	CV 20	CV 21	IP-1	IP-2	IP-3
m	2.730	2.897	2.463	2.163	2.153
b*	-5.273	-6.089	-5.069	-4.063	-4.259
R²	0.9653	0.9508	0.9633	0.9360	0.9714
F	416.8	289.7	394.2	219.5	508.8
t	20.4	17.0	19.9	14.8	22.6

CAPITOLO 5

DISCUSSIONE DEI RISULTATI

5.1 Tendenze dei valori aggregati

A partire dalla relazione lineare riscontrata tra i valori aggregati delle emissioni prodotte e la percentuale di veicoli elettrici implementati nelle simulazioni, è possibile estrapolare i quantitativi di emissioni corrispondenti ad una flotta veicolare composta interamente da veicoli elettrici. Per le emissioni di anidride carbonica, ossidi di azoto e particolato, si ottengono dei valori negativi, chiaramente assurdi, che però indicano una riduzione nelle emissioni totali non derivante soltanto dal minor numero di autoveicoli in grado di produrre emissioni, bensì anche dal miglior deflusso veicolare. Questo è favorito dalle migliori prestazioni dei veicoli elettrici, si era infatti evidenziata una relazione decrescente tra ritardi medi degli autoveicoli e percentuale di autoveicoli elettrici.

Per quanto riguarda invece le emissioni di composti organici volatili, essi sono legati alla percentuale di veicoli elettrici con una relazione logaritmica, che vede quindi una decrescita delle emissioni più graduale. Si può ipotizzare che sia dovuta alla diminuzione della percentuale di autoveicoli con alimentazione diesel a favore anche di quelli alimentati a GPL, in quanto è stato rilevato che queste motorizzazioni emettono maggiori quantitativi di composti organici volatili (Johnson, 2017).

5.2 Tendenze tra le serie temporali

Considerando le applicazioni del modello di regressione effettuate sulle serie storiche, si possono fare delle ulteriori considerazioni riguardanti le variazioni dei coefficienti ottenuti.

Sia per le rette di regressione che descrivono la relazione tra le emissioni ed il tempo totale di viaggio degli autoveicoli all'interno del sistema, che per quelle che descrivono la relazione tra le emissioni ed il ritardo medio degli autoveicoli si osserva (nella maggior parte dei casi) una diminuzione dei coefficienti angolari all'aumentare della percentuale di veicoli elettrici nella flotta veicolare.

Si possono poi analizzare la variazione relativa dei coefficienti angolari e la variazione relativa della percentuale di flotta veicolare in grado di produrre emissioni, calcolate per la coppia di distribuzioni veicolari i e j come:

$$m'_{i-j} = \frac{m_i - m_j}{m_i}; p'_{i-j} = \frac{(\% \text{ combustibile})_i - (\% \text{ combustibile})_j}{(\% \text{ combustibile})_i}$$

Considerando le coppie di distribuzioni veicolari $i - j$ in modo da avere una percentuale sempre crescente di veicoli elettrici, ovvero con $p'_{i-j} > 0$, e calcolando il rapporto tra queste due grandezze, si osserva che, per quasi tutti i casi, risulta maggiore di 1, ovvero i coefficienti angolari delle rette di regressione diminuiscono più velocemente rispetto alla riduzione relativa del numero di veicoli che producono emissioni nocive (*tabelle 15, 16, 17 e 18*).

Questo significa che l'incremento del numero di veicoli elettrici circolanti nella rete riduce le emissioni inquinanti prodotte in misura maggiore rispetto alla mera riduzione del numero di veicoli in grado di produrre emissioni, grazie all'effetto di miglioramento del deflusso veicolare osservato nel capitolo precedente.

All'interno delle tabelle sono stati evidenziati i casi per i quali il rapporto m'_{i-j}/p'_{i-j} risulta inferiore all'unità.

Tabella 15 - Confronto tra l'andamento dei coefficienti angolari delle rette di regressione relative alle emissioni di CO₂ e l'andamento delle percentuali di autoveicoli alimentati a combustibile

	CO ₂	CV 20-CV 21	CV 21 - IP-1	IP-1 – IP-2	IP-2 – IP-3
	p'_{i-j} [%]	0.200	6.620	5.693	6.948
Rispetto al tempo totale di viaggio	m'_{i-j} [%]	0.355	10.850	12.563	12.711
	m'_{i-j}/p'_{i-j}	1.77	1.64	2.21	1.83
Rispetto al ritardo medio	m'_{i-j} [%]	-4.565	9.060	15.659	11.868
	m'_{i-j}/p'_{i-j}	$m' < 0$	1.37	2.75	1.71

Tabella 16 - Confronto tra l'andamento dei coefficienti angolari delle rette di regressione relative alle emissioni di NO_x e l'andamento delle percentuali di autoveicoli alimentati a combustibile

	NO _x	CV 20-CV 21	CV 21 - IP-1	IP-1 – IP-2	IP-2 – IP-3
	p'_{i-j} [%]	0.200	6.620	5.693	6.948
Rispetto al tempo totale di viaggio	m'_{i-j} [%]	0.899	6.262	12.047	11.336
	m'_{i-j}/p'_{i-j}	4.49	0.95	2.12	1.63
Rispetto al ritardo medio	m'_{i-j} [%]	-3.735	4.270	14.905	10.726
	m'_{i-j}/p'_{i-j}	$m' < 0$	0.65	2.62	1.54

Tabella 17 - Confronto tra l'andamento dei coefficienti angolari delle rette di regressione relative alle emissioni di PM e l'andamento delle percentuali di autoveicoli alimentati a combustibile

	PM	CV 20-CV 21	CV 21 - IP-1	IP-1 – IP-2	IP-2 – IP-3
	p'_{i-j} [%]	0.200	6.620	5.693	6.948
Rispetto al tempo totale di viaggio	m'_{i-j} [%]	3.668	7.519	11.849	8.984
	m'_{i-j}/p'_{i-j}	18.32	1.14	2.08	1.29
Rispetto al ritardo medio	m'_{i-j} [%]	-6.137	5.755	14.911	8.273
	m'_{i-j}/p'_{i-j}	$m' < 0$	0.87	2.62	1.19

Tabella 18 - Confronto tra l'andamento dei coefficienti angolari delle rette di regressione relative alle emissioni di VOC e l'andamento delle percentuali di autoveicoli alimentati a combustibile

	VOC	CV 20-CV 21	CV 21 - IP-1	IP-1 – IP-2	IP-2 – IP-3
	p'_{i-j} [%]	0.200	6.620	5.693	6.948
Rispetto al tempo totale di viaggio *	m'_{i-j} [%]	-0.808	16.608	9.791	0.406
	m'_{i-j}/p'_{i-j}	$m' < 0$	2.51	1.72	0.06
Rispetto al ritardo medio	m'_{i-j} [%]	-6.137	15.005	12.163	0.487
	m'_{i-j}/p'_{i-j}	$m' < 0$	2.27	2.14	0.07

* il coefficiente m del modello di regressione lineare-logaritmico utilizzato viene considerato come coefficiente angolare di una retta riferita al logaritmo della distribuzione.

CAPITOLO 6

CONCLUSIONI

Il presente elaborato si è posto il compito di valutare l'impatto della composizione del parco veicolare sulle emissioni inquinanti prodotte in un'area, utilizzando la microsimulazione di un caso studio. È stato quindi simulato il deflusso di cinque differenti flotte di veicoli all'interno di una rete stradale extraurbana, e sono state ottenute ed analizzate differenti serie storiche riguardanti emissioni inquinanti e grandezze caratteristiche del deflusso.

Visto che i valori assoluti delle emissioni sono indubbiamente dipendenti dalle caratteristiche dell'area considerata, ci si è concentrati su di un'analisi degli andamenti.

Inizialmente è stato riscontrato che i parchi circolanti caratterizzati da percentuale di veicoli elettrici maggiore hanno evidenziato minori ritardi medi e minori tempi di viaggio totali. In particolare, è stata evidenziata una relazione logaritmica decrescente tra il ritardo medio degli autoveicoli e la percentuale di veicoli con motore elettrico caratterizzanti il parco circolante.

Successivamente, è stato valutato come l'aumento della percentuale di veicoli elettrici all'interno del parco circolante diminuisca le emissioni inquinanti prodotte dagli autoveicoli, in misura relativamente maggiore rispetto a quella dell'aumento della percentuale di veicoli con motorizzazione elettrica.

La valutazione descritta nel presente elaborato potrebbe essere estesa considerando, ad esempio, un modello di emissioni per i mezzi pesanti; oppure una maggiore variabilità nell'intensità dei flussi circolanti.

In conclusione, l'elaborato evidenzia gli effetti positivi dell'ammodernamento della flotta veicolare sulle emissioni in atmosfera di quattro specie chimiche nocive per l'uomo, quali anidride carbonica, ossidi di azoto, particolato e composti organici volatili. In riferimento agli obiettivi europei riguardanti la neutralità climatica nonché al peso del trasporto su gomma all'interno del settore, si avvalorano le misure di riduzione dei veicoli con alimentazione a combustibile già prese in considerazione.

BIBLIOGRAFIA

Bibliografia diretta

- Acuto, F., Coelho, M.C., Fernandes, P., Giuffrè, T., Macioszek, E., Granà, A., (2022). Assessing the Environmental Performances of Urban Roundabouts Using the VSP Methodology and AIMSUN. *Energies* 2022, 15, 1371.
- Alshayeb, S., Stevanovic, A., Dobrota, N., (2021). Impact of Various Operating Conditions on Simulated Emissions-Based Stop Penalty at Signalized Intersections. *Sustainability* 2021, 13(18), 10037.
- Any, A. R., Roupail, N. M., Frey, H. C., Schroeder, B., (2014). Application of AIMSUN Microsimulation Model to Estimate Emissions on Signalized Arterial Corridors. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2428, 75–86.
- Gastaldi, M., Meneguzzer, C., Rossi, R., Della Lucia, L., Gecchele, G., (2014). Evaluation of air pollution impacts of a signal control to roundabout conversion using microsimulation. *Transportation Research Procedia* 3, 1031 – 1040.
- Johnson, E., (2017). Cars and ground-level ozone: how do fuels compare? In: *European Transport Research Review*, volume 9, article 47, 1-13.
- Lakouari, N., Oubram, O., Bassam, A., Pomares Hernandez, S. E., Marzoug, R., Ez-Zahraouy, H., (2020). Modeling and simulation of CO₂ emissions in roundabout intersection. *Journal of Computational Science*, 40, 101072.
- Lu, X., Lee, J., Chen, D., Bared, J., Dailey, D., Shladover, S. E., (2014). Freeway Microsimulation Calibration: Case Study Using Aimsun and VISSIM with Detailed Field Data. In: *93rd TRB Annual Meeting, Washington, D.C., Jan. 12-16, 2014*.
- Morello, E., Toffolo, S., Magra, G., (2014). Traffic models enhancements for properly assess environmental impacts of ITS/ICT systems: generalities and eco-driving example. In: *Transport Research Arena 2014, Paris, 14–17 April 2014*.
- Pinto, J. A., Kumar, P., Alonso, M. F., Lemker Andreão, W., Pedruzzi, R., Soares dos Santos, F., Martins Moreira, D., Toledo de Almeida Albuquerque, T., (2020). Traffic data in air quality modeling: A review of key variables, improvements in results, open problems and challenges in current research. *Atmospheric Pollution Research* 11, 454–468.
- Quaassdorff, C., Borge, R., Pérez, J., Lumbreras, J., de la Paz, David., de Andrés, J. M., (2016). Microscale traffic simulation and emission estimation in a heavily trafficked roundabout in Madrid (Spain). *Science of the Total Environment* 566–567, 416–427.
- Samaras, C., Tsokolis, D., Toffolo, S., Magra, G., Ntziachristos, L., Samaras, Z., (2018). Improving fuel consumption and CO₂ emissions calculations in urban areas by coupling a dynamic micro traffic model with an instantaneous emissions model. *Transportation Research Part D* 65, 772–783.
- Smit, R., Dia, H., Morawska, L., (2009). Road Traffic Emission and Fuel Consumption Modelling: Trends, New Developments and Future Challenges. In: *Traffic Related Air Pollution and Internal Combustion Engines; Nova Publishers USA: Hauppauge, NY, USA*.
- Song, G., Yu, L., Zhang, Y., (2012). Applicability of traffic microsimulation models in vehicle emissions estimates: case study of VISSIM. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2270, 132-141.

Wu, C., Lu, X., Horowitz, R., Shladover, S. E., (2016). Microsimulation of Congested Freeway with Multiple Vehicle Classes Using AIMSUN: A Case Study on SR-99N. In: *95th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C., Jan. 10-14, 2016*.

Bibliografia indiretta

Jie, L., Van Zuylen, H., Chen, Y., Viti, F., Wilmink, I., (2013). Calibration of a microscopic simulation model for emission calculation. *Transportation Research Part C* 31, 172-184.

Oneyear, N., Hallmark, S.L., (2013). Evaluation of micro simulation model output for mobile source air quality modeling. In: *Road Safety and Simulation International Conference, Rome, Italy, 22-25 October 2013*.

Smit, R., Poelman, M., Schrijver, J., (2008). Improved road traffic emission inventories by adding mean speed distributions. *Atmospheric Environment*. 42 (5), 916–926.

Swidan, H., (2011). Integrating AIMSUN Micro Simulation Model with Portable Emissions Measurement System (PEMS): Calibration and Validation Case Study. *MS thesis at North Carolina State University, Raleigh*.

Bañon Blazquez, L., Pagan Conesa, J. I., Slides ed appunti delle lezioni del corso “Roads and Airports” all’*Universidad de Alicante*.

Meneguzzer, C., (2022). Flussi, code e reti: Elementi di analisi dei sistemi di trasporto – Seconda edizione. *CLEUP*, Padova.

Ross, S. M., Morandin, F., (2015). Probabilità e statistica per l'ingegneria e le scienze. *Apogeo Education*, Milano.

cordis.europa.eu, (2019). LOWBRASYS - a LOW environmental impact BRAke SYStem. *CORDIS - Community Research and Development Information Service*.

docs.aimsun.com, (2022) Aimsun User Manual, © *Aimsun SLU*.

ec.europa.eu, (2021). Fornire trasporti efficienti, sicuri e rispettosi dell'ambiente, *I trasporti e il Green Deal*.

ecee.org, (2022). Transportation – a third of Europe’s energy use. *European council for an energy efficient economy*.

ign.es, (2022). Iberpix – Ortofotos y cartografía. *Instituto Geográfico Nacional*.

mapas.fomento.gob.es, (2019). Mapas de tráfico de la Red de Carreteras del Estado (RCE). *Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana*.

pegv.gva.es, (2022). Estadística del Parque Nacional de Vehículos. *Institut Valencià d’Estadística*.

politicaterritorial.gva.es, (2021). Mapas de tráfico de la Comunitat Valenciana. *Consejería de Política Territorial, Obras Públicas y Movilidad de la Generalidad Valenciana*.