

Politecnico di Milano
Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



Dai conteggi di traffico alla stima delle emissioni

Valutazione di interventi sulla mobilità a Bucarest

Relatore:
prof. Roberto Maja

Correlatore:
dott. Alessandro Nanni

Tesi di Laurea Magistrale di:
Cristina Pozzi
Matr. 735654

Anno Accademico 2009-2010

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare il mio relatore, prof. Roberto Maja, per aver accettato di seguirmi in questo progetto, avermi dato fiducia e avermi lasciato molta autonomia nell'organizzazione e nello svolgimento del lavoro, senza esimersi dal darmi consigli mirati soprattutto nell'ultima fase di stesura della tesi.

Un altro ringraziamento molto sentito va al dott. Alessandro Nanni, correlatore della tesi, e prima ancora ideatore del progetto, maestro e supporto tecnico, per tutta la disponibilità dimostrata, il tempo dedicato e i consigli forniti costantemente. Insieme a lui ringrazio tutti i membri di Arianet per avermi accolto tra loro, dedicato ulteriore supporto specialistico, in particolare Pierre e Paola, e aver reso più piacevoli e leggere le mie giornate di lavoro.

Una menzione particolare spetta al dott. Paolo Confalonieri, che ha avuto l'intelligenza di consigliarmi una tesi che assecurasse i miei interessi e si è mostrato sempre pronto ad aiutarmi.

Allargando la finestra temporale non si può trascurare il fatto che questo lavoro sia il coronamento di cinque anni di studio assiduo, per cui desidero ringraziare tutti coloro che ho incontrato e hanno condiviso con me l'impegno e la vita universitaria: un pensiero particolare va a Mary e Rosy con cui ho condiviso tantissimi momenti e sono state amiche, collaboratrici ed ottimi riferimenti, ma ricordo con piacere molti altri momenti di studio e di svago passati con Nico, Dino, Matteo, Vale, Filippo, Anna, Gaia, Paolo, Gabry, Fra, Carmen, Ele, Vale, Katia, Sara, Alessandra, che insieme a tanti altri il cui nome al momento mi sfugge ci sono sempre stati e hanno reso speciali questi anni.

Ringrazio i miei genitori, per essermi sempre stati vicini, avermi sostenuto, accompagnato e sempre permesso di esser me stessa, lasciandomi la libertà di compiere le scelte che mi hanno portato ad essere quella che sono. Ringrazio i miei fratelli per la loro compagnia, in particolare Francesco per il suo punto di vista alternativo e Andrea per la sua allegria e per avermi ricordato che ogni tanto servono anche momenti di gioco, i nonni, gli zii e i parenti che non risparmiano mai un gesto di attenzione o parole di incitamento.

Vorrei ringraziare tutti gli amici che pur non avendo condiviso il mio percorso accademico hanno vissuto con me tanti altri momenti fondamentali per la mia crescita e formazione personale. Senza pretesa di completezza ricordo Lucia, con cui ho avuto la possibilità di vivere molte esperienze significative, in primis quella nella missione di Machakos, per cui ringrazio anche gli amici che ci hanno accolte, Federico, compagno di studio notturno nonché amico con cui confrontarsi, Luchino e Sara, con cui sono cresciuta, Ema, Fu, Ado, Marta, Silvia, Gambo, gli attuali 19enni e tutti gli altri che non posso nominare singolarmente ma spero capiscano che è a loro rivolto il mio grazie per tutte le gioie, le fatiche e le esperienze condivise.

Ringrazio tutti coloro che con me condividono la passione dell'arrampicata e della montagna, a cominciare dal nonno Aldo che me l'ha trasmessa, perché dopo tanto tempo passato alla scrivania c'è sempre qualcuno pronto a "farmi sicura", ad accompagnarmi per sentieri o semplicemente a parlare delle sfide affrontate e di quelle che ci aspettano.

Un pensiero speciale va a Daniele, per la sua presenza discreta ma importante nella mia vita, Cinzia, che sempre sorridente mi è stata molto vicina negli ultimi anni, e Alberto, per i suoi sforzi costanti nel ridimensionare le mie preoccupazioni e per essersi sempre dimostrato paziente, oltre che dottore.

Infine il ringraziamento più profondo è rivolto ad Alessandro, compagno, amico e consigliere prezioso, che mi è stato sempre accanto in modo singolare e ha spesso creduto nelle mie capacità più di me stessa. I miei sacrifici sono stati spesso anche i suoi, una parte dei miei meriti è da attribuire al suo coraggioso sostegno e il suo affetto profondo è sempre stato certezza.

Sommario

INDICE DELLE FIGURE.....	4
INDICE DELLE TABELLE.....	5
INDICE DEI GRAFICI.....	7
ABSTRACT.....	8
0. INTRODUZIONE.....	9
1. STRATEGIE EUROPEE PER IL CONTROLLO DELL'INQUINAMENTO ATMOSERICO	11
1.1 IL PROGETTO ROMAIR : FINALITÀ' E OBIETTIVI	17
1.1.1 Il dominio del modello.....	19
1.1.2 Tempi.....	21
1.1.3 Azioni.....	22
2. MATERIALI E METODI.....	24
2.1 ANALISI DELL'OFFERTA DI TRASPORTO	25
2.1.1 Gli elementi fisici dell'offerta.....	25
2.1.2 Le componenti funzionali.....	27
2.1.3 La rete viaria di Bucarest: scelte operative e livello di dettaglio	29
2.2 ANALISI DELLA DOMANDA DI TRASPORTO.....	39
2.2.1 Individuazione delle zone OD.....	42
2.2.2 Costruzione delle matrici	45
2.3 INTERAZIONE DOMANDA-OFFERTA: LA FASE DI ASSEGNAZIONE.....	53
2.4 ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI.....	54
3 CARUSO: IMPLEMENTAZIONE DI UN MODELLO DI ASSEGNAZIONE	57
3.1 STIMA DEL CARICO VEICOLARE SULLA RETE DI BUCAREST.....	58
3.2 AFFIDABILITÀ DELLA STIMA.....	65
3.2.1 Validazione dei risultati.....	65
4 LA STIMA DELLE EMISSIONI DA TRAFFICO VEICOLARE.....	68
4.1 LE EMISSIONI VEICOLARI A BUCAREST NEL 2006.....	71
4.2 VALIDAZIONE CON I CONSUMI LOCALI	79
5 SCENARI FUTURI E CONFRONTI.....	84
5.1 SCENARIO "BUSINESS AS USUAL" AL 2015.....	84
5.2 SCENARIO "INTERVENTI SUL TRASPORTO PUBBLICO" AL 2015.....	88
6 SINTESI E CONCLUSIONI.....	93
7 BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	95

INDICE DELLE FIGURE

<i>Figura 1. Linee guida per la qualità dell'aria per l'Europa. Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO Global update,2005)</i>	13
<i>Figura 2. Schema dell'approccio basato sui limiti di qualità dell'aria</i>	16
<i>Figura 3. Schema che esemplifica il principio di conservazione della massa in riferimento ad un'unità di volume</i>	18
<i>Figura 4. Il dettaglio della griglia che copre il dominio di primo livello con la localizzazione dell'area studiata nel secondo livello</i>	20
<i>Figura 5. Il dominio di secondo livello che copre tutta la Romania con all'interno l'area di Bucarest studiata al terzo livello di dettaglio</i>	21
<i>Figura 6. Rete stradale rumena e selezione in rosso dell'area di studio</i>	29
<i>Figura 7. Legenda tematica per categoria di strada</i>	31
<i>Figura 8. Confronto tra la rete completa e la rete che mantiene solo le categorie indicate in legenda</i>	32
<i>Figura 9. L'incrocio geometrico tra polilinee può rappresentare uno svincolo (a) o un sottopasso (b)</i>	33
<i>Figura 10. Distribuzione delle zone O/D sull'area di studio</i>	43
<i>Figura 11. Tre esempi di corrispondenza tra il potenziale di attrazione-generazione di un'area e un elemento grafico della rete (centroide rosso) attraverso cui si ipotizza possano transitare tutti gli spostamenti generati-attratti dall'area evidenziata nell'immagine</i>	44
<i>Figura 12. Distinzione tra i dati di stima e di validazione</i>	59
<i>Figura 13. Risultato del modello di traffico in termini di veicoli/ora su ciascun arco</i>	61
<i>Figura 14. Mappa delle differenze tra i flussi calcolati e misurati</i>	62
<i>Figura 15. Interfaccia utente del software di calcolo delle emissioni</i>	73
<i>Figura 16. Dettaglio dell'area studiata in cui si individuano alcune sorgenti areali per valutarne le emissioni</i> 75	
<i>Figura 17. Flussogramma relativo allo scenario 2009 con l'aumento percentuale ottenuto nel 2015</i>	85

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 . Archivio associato al grafo della rete viaria rumena.....	30
Tabella 2. Campi aggiunti all'archivio della rete stradale.....	34
Tabella 3. Archivio associato alla rappresentazione dei nodi	34
Tabella 4. Operazione di aggregazione dei dati flusso-velocità per ottenere dati orari.	35
Tabella 5. Parametri reperibili in letteratura per la stima di una curva di deflusso urbana	36
Tabella 6. Discretizzazione per coppie di punti della curva di deflusso stimata.....	37
Tabella 7. Parametri disponibili in letteratura per stimare le curve di deflusso in relazione a diverse tipologie di strada.....	38
Tabella 8. Numero medio feriale di veicoli rilevato da una stazione di misura distinto per categoria di veicoli e intervallo orario nel corso della giornata.....	55
Tabella 9. Pesi per ottenere il conteggio in veicoli equivalenti.....	56
Tabella 10. Pesi per convertire i veicoli delle singole categorie in veicoli equivalenti.....	58
Tabella 11. Risultati in termini di errore quadratico medio sui dati misurati relativi a 30 simulazioni in corrispondenza di diversi valori di coppie dei parametri (numero percorsi; rapporto tra i costi).....	60
Tabella 12. Flussi calcolati dal modello per ogni direzione di marcia di ciascun arco.....	62
Tabella 13. Esempio di arco in cui il flusso tra i sensi opposti di marcia viene da un lato sottostimato e dall'altra sovrastimato.....	63
Tabella 14. Confronto tra i dati stimati dal modello e le misure effettuate per la validazione.....	66
Tabella 15. Confronto tra il risultato del modello e il risultato della validazione	67
Tabella 16. Codici SNAP associati al settore delle autovetture	69
Tabella 17. Classificazione UN-ECE per i veicoli che riflette gli step della legislazione correlata.....	70
Tabella 18. Percentuali di ripartizione del flusso di traffico nelle varie categorie veicolari	72
Tabella 19. Estratto delle informazioni riguardanti il settore delle auto nel file del parco circolante	72
Tabella 20. Aggregazione del dato meteorologico mensile rumeno	73
Tabella 21. Dato meteorologico mensile rumeno relativo all'anno di riferimento del parco veicolare	74
Tabella 22. Alcuni record di esempio per il grafo associato al layer degli areali.....	76
Tabella 23. Valori delle percorrenze veicolari stimate per l'anno 2006	77
Tabella 24. Contributo percentuale delle sorgenti areali e lineari (2006)	77
Tabella 25. Tasso di incremento dei volumi di traffico	79
Tabella 26 Valori delle percorrenze veicolari stimate per l'anno 2009	80
Tabella 27. Incremento delle percorrenze tra gli anni 2006 e 2009	80
Tabella 28. Confronto tra le emissioni relative al 2006 e al 2009.....	81
Tabella 29. Confronto relativo al consumo di combustibile	81
Tabella 30. Contributo emissivo percentuale delle sorgenti areali e lineari (2009)	81
Tabella 31. Dato di consumo di combustibile fornito dal modello di calcolo delle emissioni.....	82
Tabella 32. Coefficienti che quantificano il traffico circolante nel week end rispetto a quello feriale	82
Tabella 33. Consumo annuale di combustibile stimato per la città di Bucarest	82
Tabella 34. Consumo nazionale di combustibile per il settore dei trasporti.....	82
Tabella 35. Numero di abitanti a Bucarest e totale della popolazione nazionale.....	83
Tabella 36. Validazione con i consumi di combustibile	83
Tabella 37. Incremento annuo del volume di traffico complessivo sulla rete urbana	84
Tabella 38. Aumento delle percorrenze tra gli anni 2009 e 2015.....	87
Tabella 39. Emissioni inquinanti per gli anni 2009 e 2015 prodotte dall'area analizzata.....	87
Tabella 40. Aumento di consumo di combustibile che si stima possa verificarsi tra il 2009 e il 2015	87
Tabella 41. Nuove linee di trasporto pubblico previste con le zone direttamente connesse.....	89
Tabella 42. Nuovi autobus previsti per soddisfare la domanda di ciascuna linea.....	89
Tabella 43. Aumento delle percorrenze tra il 2009 e il 2015 per i diversi scenari.....	90

Tabella 44. Confronto tra le emissioni stimate per il 2015 in assenza di interventi e a fronte di un incremento dei trasporti pubblici..... 90

Tabella 45. Confronto tra le emissioni del 2009 e quelle relative allo scenario 2015 con l'aumento della quota di trasporto pubblico. 91

INDICE DEI GRAFICI

Grafico 1. Curva di deflusso stimata dai dati sperimentali.....	36
Grafico 2. Confronto grafico tra risultati sperimentali e riferimenti teorici.....	37
Grafico 3. Curve di deflusso ottenute dai risultati reperiti in letteratura relative a tre differenti tipologie di strada.....	38
Grafico 4. Andamento giornaliero del traffico relativo alle singole categorie di veicoli distinte e in termini di veicoli equivalenti.....	56
Grafico 5. Le sei serie di risultati relative ad un diverso valore di percorsi ammissibili tra due zone, rappresentate al variare del rapporto massimo tra il costo del percorso <i>i</i> -esimo e quello del percorso ottimo	60
Grafico 6. Distribuzione dell'errore di stima sui dati misurati in funzione dell'entità del volume di traffico	64
Grafico 7. Andamento delle coppie di valori $((\text{sumLength})^{0.5}; C/4)$ relativi a ciascun'area	76
Grafico 8. Andamento del fattore di emissione dei VOC per automobili a benzina	78
Grafico 9. Andamento dei fattori di emissione degli NOx per automobili diesel e benzina.....	86
Grafico 10. Fattore di emissione di CO per un'automobile a benzina.....	91

ABSTRACT

Poiché nei Paesi più sviluppati l'aumento della mobilità di persone e merci risulta un fattore determinante per i livelli di qualità dell'aria si è evidenziato il ruolo che lo strumento modellistico riveste nella valutazione delle emissioni generate da questo settore.

L'obiettivo metodologico del lavoro consiste nel proporre un approccio al problema che superi la settorialità di molti studi specifici, ma cerchi di valutare l'efficacia di una successione di modelli che formalizzino le relazioni funzionali che connettono la catena di eventi dalla nascita del bisogno di effettuare uno spostamento alle conseguenze ambientali che produce la sua manifestazione.

Per valutare i volumi di traffico che interessano una rete di trasporto si propone un modello di assegnazione basato su conteggi effettuati in corrispondenza di un numero ridotto di sezioni stradali, il cui risultato permette di quantificare le emissioni lineari e areali prodotte dai veicoli circolanti attraverso la metodologia ufficiale europea Copert4.

Il metodo descritto è stato applicato e testato su un caso di studio reale riguardante i flussi di traffico che caricano la rete viaria di Bucarest, ottenendo a valle della stima delle emissioni una buona aderenza con il dato di consumo di combustibile di riferimento.

Grazie alla possibilità di poter conoscere le relazioni e i fattori che influenzano i fenomeni coinvolti è stato possibile approfondire il ruolo che il sistema modellistico integrato può rivestire nella valutazione dell'impatto ambientale del traffico sotto differenti ipotesi di scenario. Si sono così quantificati gli effetti in termini di emissioni in corrispondenza di precise evoluzioni del panorama della mobilità urbana e si è valutata la sensibilità del sistema in corrispondenza di un potenziale intervento che aumenti la quota del trasporto pubblico, evidenziando come si possano ottenere risultati soddisfacenti (circa il 30 % di riduzione) a fronte di azioni contenute.

0. INTRODUZIONE

Il problema dell'inquinamento atmosferico desta particolari preoccupazioni soprattutto nelle aree urbane, dove elevata è la produzione di inquinanti e maggiore è la popolazione esposta al rischio di danni alla salute. In particolare in questi centri, le emissioni diffuse degli scarichi del traffico autoveicolare avvengono spesso nelle condizioni peggiori (stati di inversione termica in bassa quota, funzionamento non a regime dei motori nel traffico congestionato, etc.). Ne consegue che spesso **la qualità dell'aria** all'interno delle aree urbane, ma anche su scala regionale, **è determinata in modo significativo dalla domanda di mobilità** e dal modo in cui essa viene soddisfatta dal traffico veicolare.

Attraverso questo lavoro **ci si propone di valutare le emissioni generate da questo settore** approfondendo una metodologia operativa che affronti la questione **a partire dalla modellizzazione del sistema dei trasporti**. In questo modo, concentrandosi sulla fonte del problema, si mira a quantificare il contributo di tale sorgente riconoscendone la responsabilità sul livello complessivo d'inquinamento, consentendo contemporaneamente di localizzare spazialmente gli assi che più contribuiscono al fenomeno.

L'obiettivo della tesi è rivolto a **valutare l'efficacia di un particolare sistema modellistico integrato** nel descrivere il fenomeno, attraverso lo studio delle sue caratteristiche, i punti di forza, la sensibilità mostrata nei confronti delle scelte dell'analista e la validazione dei risultati forniti.

Operativamente ci si riferisce ad un caso reale, per cui viene affrontata la **stima delle emissioni da traffico veicolare che carica la rete viaria della città di Bucarest** a partire dai conteggi di traffico su alcune sezioni stradali. Il progetto è stato condotto affiancando la società Arianet e si inserisce in un progetto europeo, a cui essa partecipa, che prende il nome di Romair, tra i cui obiettivi è prevista la realizzazione dell'inventario nazionale delle emissioni e una valutazione delle concentrazioni d'inquinanti su tutta la nazione, per cui risulta basilare conoscere il contributo e la localizzazione delle sorgenti.

Poiché il livello di qualità dell'aria è in parte legato alle scelte che riguardano i settori che direttamente o indirettamente insistono sul sistema atmosferico, dati gli strumenti a disposizione **sarà interessante confrontare i risvolti emissivi in corrispondenza di possibili scenari di mobilità urbana**, attraverso l'individuazione di precise strategie per il contenimento delle emissioni e la valutazione della loro efficacia.

L'elaborato si articola in più capitoli, nel primo dei quali viene inizialmente **inquadrata e descritta la Strategia Europea** nell'ambito del controllo dell'inquinamento, che rappresenta il panorama rispetto a cui gli sforzi rumeni tendono ad adeguarsi. In questo contesto viene descritto il progetto Romair, co-finanziato dalla Comunità europea e progettato per aiutare la città nella valutazione delle varie strategie di abbattimento dell'inquinamento atmosferico causato dal traffico, che viene qui illustrato dettagliatamente in quanto ad esso concorre il lavoro di tesi

Nel secondo capitolo sono invece presentati i metodi utilizzati per portare avanti lo **studio del sistema dei trasporti** e i materiali di cui si dispone. Si sono affrontati gli aspetti teorici alla base della sua modellizzazione, affiancati e completati dalla loro applicazione al caso di studio, seguiti dall'approfondimento degli algoritmi utilizzati nel caso specifico e dalle operazioni condotte sui **dati a disposizione** per procedere concretamente con lo studio.

Il capitolo successivo si concentra sulla stima del livello di carico sulla rete stradale della città di Bucarest, riportando i passi fondamentali del processo compiuto dalla prima fase di analisi di sensitività della soluzione al variare dei parametri, proseguendo con la descrizione delle operazioni effettuate per affinare e migliorare la soluzione fino alla validazione del risultato.

Nel quarto capitolo si è affrontato il **processo di stima delle emissioni**, introducendo la metodologia ufficiale Europea CopertIV di riferimento e le operazioni condotte per implementarla sul caso di studio, sia per valutare le emissioni lineari provenienti dalle strade principali della rete sia quelle areali che restituiscono il contributo del traffico diffuso che percorre le strade secondarie.

Il capitolo successivo riporta i **risultati in termini emissivi in relazione a precise ipotesi di evoluzione futura della realtà** analizzata. Si sono simulati gli effetti di un'evoluzione base della realtà o conseguenti ad una precisa azione d'intervento orientata a far crescere la quota di trasporto pubblico, per verificarne l'efficacia effettiva e quantificare il miglioramento che produrrebbe.

Infine l'ultimo capitolo riporta una sintesi generale del lavoro compiuto, mettendo in luce i tratti innovativi e la descrizione delle principali elaborazioni e si conclude con il suggerimento di potenziali linee di sviluppo del metodo utilizzato e dei suoi risvolti applicativi.

1. STRATEGIE EUROPEE PER IL CONTROLLO DELL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO

Nell'UE gli standard ambientali sono tra i più elevati del mondo e sono stati sviluppati nel corso dei decenni per far fronte a numerosi problemi. Le politiche attuali, a partire dal 2002, si concentrano su quattro priorità ossia combattere il cambiamento climatico, preservare la biodiversità, ridurre i problemi sanitari causati dall'inquinamento e attuare una gestione più responsabile delle risorse naturali.

Per contrastare la minaccia del cambiamento climatico l'UE sta lavorando ad un accordo globale per ridurre le emissioni di gas ad effetto serra ed ha assunto ruolo di guida con l'adozione di piani ambiziosi, come il pacchetto clima-energia stabilito nel 2008 e soprannominato "20-20-20", il cui obiettivo è ridurre di almeno il 20% i gas ad effetto serra entro il 2020 (rispetto ai livelli del 1990), portare la quota delle energie rinnovabili al 20% e diminuire il consumo generale di energia del 20% (rispetto alle proiezioni).

Oltre alla lotta contro i gas a effetto serra responsabili dei cambiamenti climatici, un obiettivo importante della legislazione ambientale è quello di migliorare la qualità atmosferica per avere un riscontro positivo in termini di salubrità dell'aria: l'inquinamento atmosferico è infatti un tema urgente per tutti i Paesi membri da quando si è riscontrata la sua evidenza sugli effetti dannosi per la salute umana e l'ambiente, in termini di aumento di patologie soprattutto respiratorie, corrosione dei materiali e danni per la produzione agricola e forestale. Il problema si mostra complesso e diffuso su un'ampia scala, generato da varie attività antropiche tra cui quelle industriali, la produzione di energia e i trasporti, dove i motori a combustione interna dei veicoli introducono gas in atmosfera attraverso il tubo di scarico. Da più di 40 anni l'Unione Europea ha cercato di contrastare la produzione di inquinanti atmosferici mediante l'attuazione di direttive che coprissero i vari settori responsabili, allo scopo di raggiungere livelli di qualità dell'aria che non facessero aumentare gli impatti negativi sull'ambiente e la salute, imponendo ai paesi membri di monitorare gran parte di queste sostanze e intervenire in caso di superamento delle soglie di sicurezza.

In letteratura per la scelta di affrontare il problema della qualità dell'aria esistono differenti criteri di approccio al suo controllo, per esempio fissando i limiti alle emissioni, oppure creando tasse di emissione o ancora limiti sulla qualità dell'aria. Tutti i metodi impiegati si

preoccupano in varia misura di salvaguardare in modo semplice e facile da controllare la qualità dell'aria impiegando risorse proporzionate alle effettive necessità di controllo. L'approccio più semplice per il controllo è rappresentato dai limiti alle emissioni, per cui si assegna ad ogni fonte di inquinamento, in base a vari criteri, un quantitativo massimo di emissione, definito spesso dalla migliore tecnologia disponibile a costi accettabili (MTDCA). In certi casi ci può essere la necessità, per indicazioni provenienti ad esempio dalle misure di qualità dell'aria, di forzare in qualche modo la tecnologia già disponibile verso migliori prestazioni. E' il caso, per esempio, dei limiti alle emissioni programmati nel tempo per l'omologazione di nuovi motori per autoveicoli (Euro 4, Euro 5). Le pressanti condizioni delle aree urbane assediate dal traffico costringono a programmare per i prossimi anni limiti di emissione per i nuovi autoveicoli sempre più stringenti, forzando così la ricerca, in questo caso quasi tutta in mano alle case automobilistiche, a farvi fronte nel tempo programmato. I punti di forza di questo criterio risiedono principalmente nella semplicità e nella facilità dell'applicazione, una volta identificata la tecnologia di riferimento e la metodologia del controllo. Può risultare invece differente l'efficacia con cui le risorse impegnate si traducono in benefici, consistente se in un'area tali emissioni si addensano o del tutto irrilevante in zone dove le stesse emissioni risultano poco presenti. Logica vorrebbe che si individuassero sottoclassi di limiti in funzione delle aree, ma questo approccio può interferire indebitamente con le regole di un libero mercato. Di norma si stabiliscono limiti di validità nazionale, con la possibilità che possano essere solo ristretti dalle autorità locali, per particolari esigenze.

Questo metodo viene implementato nella direttiva 2001/81/CE che indica i limiti nazionali di emissione di quattro sostanze (biossido di zolfo, ossidi di azoto, composti organici volatili e ammoniaca) da introdurre entro il 2010, accompagnati dagli obiettivi ambientali provvisori che si intende raggiungere. Contestualmente si chiede agli Stati membri di elaborare programmi per la progressiva riduzione delle emissioni nazionali annue nonché creare ed aggiornare annualmente inventari nazionali delle emissioni e delle previsioni di emissione per le suddette sostanze, da comunicare ogni volta alla Commissione ed all'Agenzia Europea dell'Ambiente.

Più razionale risulta essere l'approccio sui limiti di qualità dell'aria perché tutte le operazioni di controllo ed intervento sulle emissioni tendono a garantire un livello di qualità dell'aria accettabile, inteso dalle più recenti proposizioni nel senso più ampio, coinvolgente cioè tutti gli aspetti di fruizione del bene aria e non solo quello della salubrità. Il livello

accettabile di qualità dell'aria è definito di norma da concentrazioni limite di specie inquinanti rappresentative che garantirebbero la non insorgenza di effetti negativi e comunque inaccettabili sui soggetti esposti. Alla base di tali limiti sono studi epidemiologici, resoconti di esposizioni accidentali e studi su animali per effetti sulla salute, osservazioni sul campo e studi in atmosfere controllate di laboratorio per effetti su vegetazione e materiali. L'elaborazione degli innumerevoli studi e la sintesi in prescrizioni, il più possibili semplici da applicare, sono svolte di norma da Agenzie internazionali quali l'Organizzazione mondiale della sanità (OMS) con la pubblicazione periodica di aggiornamenti che vanno a costituire il riferimento per le normative dei vari Paesi o dell'Unione europea, come si può vedere nell'esempio qui di seguito riportato.

WHO AQG: Global update 2005: Summary of updated AQG values		
AQG levels recommended to be achieved everywhere in order to significantly reduce the adverse health effects of pollution		
Pollutant	Averaging time	AQG value
Particulate matter PM_{2.5}	1 year	10 µg/m ³
	24 hour (99 th percentile)	25 µg/m ³
PM₁₀	1 year	20 µg/m ³
	24 hour (99 th percentile)	50 µg/m ³
Ozone, O₃	8 hour, daily maximum	100 µg/m ³
Nitrogen dioxide, NO₂	1 year	40 µg/m ³
	1 hour	200 µg/m ³
Sulfur dioxide, SO₂	24 hour	20 µg/m ³
	10 minute	500 µg/m ³

Figura 1. Linee guida per la qualità dell'aria per l'Europa. Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO Global update,2005)

Il modo più semplice per esprimere il livello di qualità accettabile si avvale di valori limiti di concentrazione per la specie inquinante che si intende controllare. Nell'applicazione pratica il valore limite di concentrazione è definito da due elementi: il tempo di integrazione, cioè il tempo su cui è mediata la misura, e la natura statistica del parametro, quando il controllo prevede l'acquisizione di un certo numero di dati di concentrazione per un definito periodo di campionamento, tipicamente concentrazioni orarie, pluriorarie o giornaliere per il periodo di un anno. Il tempo di mediazione è regolato principalmente dal tipo di effetto dell'inquinante, che può essere di tipo acuto, cioè associato prevalentemente

ad elevati livelli di concentrazione anche di breve durata, ed in tal caso occorre rilevare l'inquinante con tempi brevi di mediazione, oppure l'effetto è di tipo cronico, cioè non sensibile all'esposizione breve ma all'accumulo dell'esposizione, ed allora l'interesse si sposta verso gli alti tempi di mediazione. Per quanto riguarda la natura statistica del limite anch'essa è legata al tipo di effetti attesi da cui deve proteggere, ma è regolata anche dalle caratteristiche statistiche dei dati di concentrazione. Ad esempio la natura fortemente aleatoria dei valori massimi, anche per effetto del malfunzionamento delle apparecchiature, può rendere poco ragionevole l'impiego di limiti basati su una concentrazione massima che non deve essere mai superata, ma diventa più accettabile l'utilizzo di un parametro più stabile quale terzo o quarto valore massimo, oppure un percentile estremo. In quest'ultimo caso se, ad esempio, il limite è riferito al 98-esimo percentile il rispetto del limite impone che non più del 2% (complemento al 98%) delle 8760 concentrazioni, rilevate nel corso di un anno, sia superiore al valore di riferimento. L'esigenza di controllare l'esposizione media ad inquinanti con effetti anche di tipo cumulativo determina l'impiego di limiti in termini di valori medi o mediani delle concentrazioni rilevate nel periodo di campionamento.

Questo secondo metodo si concretizza con la direttiva quadro per la qualità dell'aria del 1996 (96/62/CE) inquadrata nel quinto programma d'azione in materia ambientale del 1992 che insiste sulla necessità di istituire dei target sulla qualità atmosferica a livello di Unione Europea, per valutarla e migliorarla in tutti i Paesi Membri mediante l'implementazione di metodi e criteri comuni, stabilendo valori limite di concentrazione (fissato al fine di evitare, prevenire o ridurre gli effetti nocivi sulla salute umana o sull'ambiente nel suo complesso, che dovrà essere raggiunto entro un dato termine e in seguito non superato) e soglie d'allarme (oltre le quali la salute umana è a rischio per cui al loro raggiungimento è previsto un intervento immediato) e investendo gli Stati Membri della responsabilità di comunicare al pubblico le informazioni raccolte. Si invita ciascun Paese ad effettuare un controllo della qualità dell'aria ambiente sul suo territorio, da condurre con vari metodi quali la misurazione, la modellizzazione o attraverso una stima. Tale valutazione diventa obbligatoria negli agglomerati di più di 250 000 abitanti oppure nelle zone in cui le concentrazioni sono vicine ai valori limite. In caso di superamento delle soglie di allarme, gli Stati membri devono stabilire un programma accessibile alla popolazione che consenta di raggiungere i valori limite entro un termine fissato. Un altro obbligo che gli Stati sono tenuti a rispettare consiste nel fissare un elenco delle zone e dei

centri urbani in cui i livelli di inquinamento sono superiori ai valori limite, da comunicare alla popolazione e alla Commissione associando anche le informazioni riguardanti il livello registrato dell'inquinamento e la durata dell'allarme. La direttiva 2008/50/CE abroga e sostituisce la presente direttiva a partire dall'11 giugno del 2010.

Dalla 96/62/CE sono scaturite delle direttive figlie tra cui la 97/101/CE, la 1999/30/CE, la 2004/107/CE che l'hanno completata fissando dei valori limite per inquinanti specifici che si è dimostrato abbiano una consistente pressione sull'ambiente. Sempre nella direttiva madre del 2006 vengono inoltre indicate le attività per impostare secondo criteri comuni un Piano di risanamento dell'aria: esso deve prevedere una fase di rilevamento delle concentrazioni delle sostanze in aria, la realizzazione di un inventario delle emissioni e la realizzazione di un programma di modellizzazione dell'inquinamento.

Nel sesto ed ultimo Programma di Azione Ambientale, riferito al periodo 2002-2012, in cui si sono fissati i quattro settori prioritari su cui concentrare gli sforzi nazionali di miglioramento, citati all'inizio del paragrafo, si inquadrano anche le sette strategie tematiche che definiscono le azioni da intraprendere riguardo ad uno specifico settore, tra le quali si individua la strategia tematica sull'inquinamento atmosferico del 2005, risultato delle ricerche effettuate nell'ambito del programma "Aria pulita per l'Europa" (Clean Air For Europe - CAFE) e dei programmi quadro di ricerca successivi. Grazie ad essa L'unione europea fissa gli obiettivi di riduzione di taluni inquinanti e rafforza il quadro legislativo di lotta all'inquinamento atmosferico attraverso il miglioramento e l'aggiornamento della legislazione comunitaria in vigore in materia di ambiente e l'integrazione del problema "qualità dell'aria" nelle pertinenti politiche, definendo obiettivi a lungo termine da raggiungere entro il 2020.

Con l'entrata della Romania nell'Unione Europea nel 2004 è iniziato il graduale recepimento delle direttive europee nella legislazione rumena e in particolare nel luglio 2005 il Governo ha adottato una strategia nazionale per affrontare il problema del cambiamento climatico, che concentrava gli sforzi di miglioramento nel periodo 2005-2007 e stabiliva misure di adattamento fino al 2013.

Per quanto riguarda gli sforzi di adeguamento si cita in particolare che Romania non ha raggiunto la conformità con i valori limite europei di PM₁₀ in vigore dal 2005 presentando dei superamenti nel 2008. Per questo ha fatto richiesta di una proroga alla Commissione fino a marzo 2009 per l'adeguamento delle zone fuori limite.

I limiti che definiscono la qualità dell'aria diventano così il perno di un processo di gestione del problema che prevede la disponibilità di strumenti, di norma modelli matematici, in grado di correlare le emissioni, anche simulate, con le concentrazioni rilevate o attese in atmosfera, secondo lo schema di gestione qui riportato.

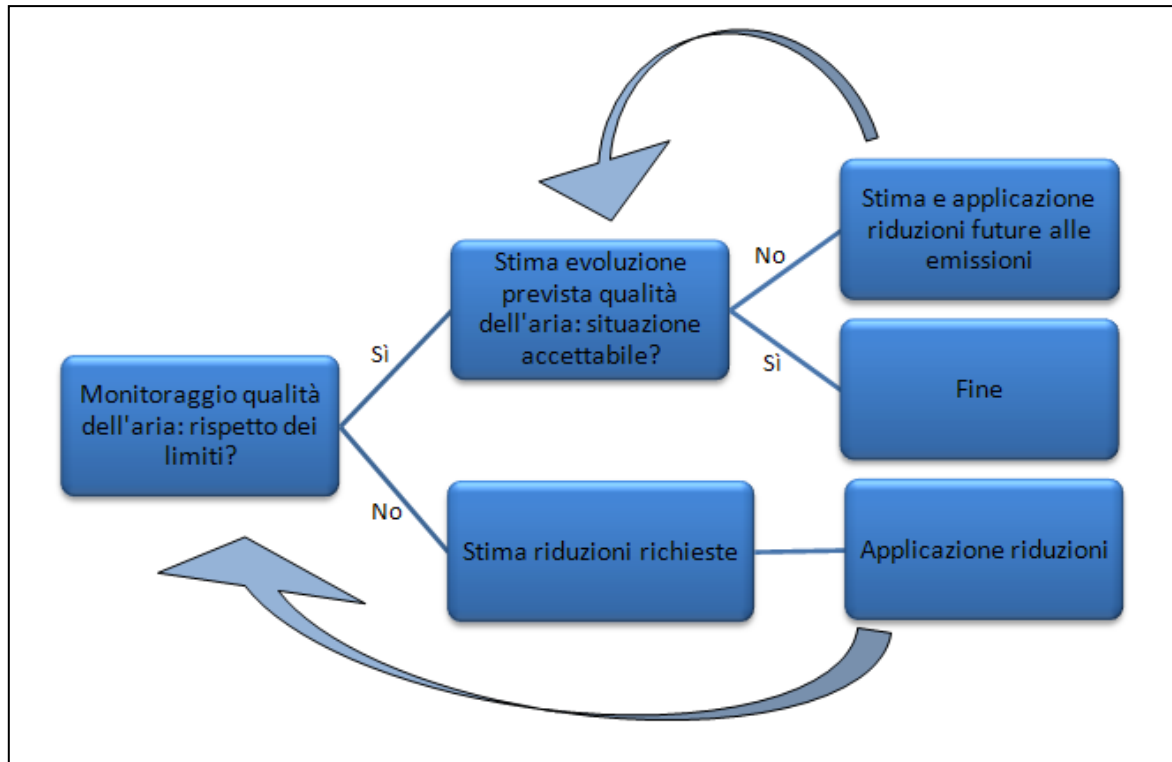


Figura 2. Schema dell'approccio basato sui limiti di qualità dell'aria

Esso risulta semplice e rigoroso sul piano concettuale ma presenta notevoli difficoltà, prima tra tutte l'individuazione del ruolo delle fonti circa il contributo ai livelli di inquinamento misurati. In aree con emissioni, meteorologia ed orografia complesse o con la necessità di controllare inquinanti secondari, cioè non direttamente correlati agli inquinanti primari emessi dalle sorgenti (tipicamente l'ozono ed il particolato fine), diventa molto difficile intervenire sulle attività inquinanti in base alle effettive necessità e responsabilità. Un tentativo di separare i livelli di responsabilità inquinante che assumono i diversi settori produttivi rumeni è affrontato nell'ambito del progetto qui di seguito descritto, da cui il presente lavoro di tesi ha preso avvio per poi svilupparsi autonomamente approfondendo e isolando il solo ruolo del settore dei trasporti.

1.1 IL PROGETTO ROMAIR : FINALITÀ' E OBIETTIVI

Il progetto Romair s'inserisce nel Programma di politica e gestione ambientale europea e nel dettaglio si occupa di modellizzare e prevedere la qualità dell'aria in Romania. Lo scopo consiste nel fornire alle autorità rumene gli strumenti e le informazioni necessarie per prendere decisioni operative orientate a migliorare la salute pubblica e la qualità della vita, limitando contemporaneamente l'impatto del paese in merito ai cambiamenti climatici. ROMAIR fornirà alle agenzie di protezione ambientale degli strumenti appropriati per i seguenti obiettivi:

- Identificare le aree e gli inquinanti più critici dal punto di vista della salute pubblica, considerando anche gli inquinanti secondari come l'ozono e il particolato;
- Implementare le leggi rumene derivanti dalle direttive europee sulla qualità dell'aria e in particolare stendere i Piani d'Azione per attuarle nei tempi decisi;
- Provare l'efficienza delle azioni proposte a vari livelli circa la qualità ambientale dell'aria prima di implementarle concretamente;
- Stabilire il legame tra le azioni volte a ridurre l'inquinamento e le emissioni di gas serra (GHGs)
- Creare un inventario iniziale su cui basare i futuri piani di riduzione di GHGs;
- Esplorare l'impatto dei cambiamenti climatici sulla salute pubblica, legata all'evoluzione delle condizioni meteorologiche sulla Romania.

Per esplorare le possibili soluzioni a questi complessi problemi la società francese ARIA Technologies ha sviluppato un sistema di modellistica integrata con cui fornire le previsioni della qualità dell'aria ed effettuare simulazioni delle alternative disponibili. La sequenza dei modelli di previsione e di simulazione utilizzati in questo sistema per la meteorologia (MM5/WRF) e la qualità dell'aria (CHIMERE) è ampiamente utilizzata dagli enti pubblici in Francia e in Europa. Per esempio in Francia, INERIS gestisce una previsione giornaliera ed utilizza i modelli per le strategie di abbattimento delle emissioni a livello europeo e a livello nazionale e nella regione di Parigi, AIRPARIF gestisce un sistema di risoluzione più elevata, con emissioni più raffinate, per lo studio della qualità dell'aria a scala urbana. Similmente il progetto ROMAIR cercherà di sviluppare una struttura simile su due livelli e di sfruttare l'esperienza e le linee guida di queste due organizzazioni. Ciò sta comportando un importante trasferimento di tecnologie a favore di Nepa, ovvero la National Environment Protection Agency che è l'agenzia nazionale pubblica specializzata nel campo della protezione ambientale. Questo ente pubblico ha espresso la sua volontà

di avere la città dotata di un monitoraggio dell'aria moderno ed efficiente sistema di previsione e di qualità. Dev'essere sottolineato che il modello CHIMERE è utilizzato anche in Belgio, Portogallo e Italia per la previsione regionale di qualità dell'aria, pertanto lo strumento risulta pienamente riconosciuto anche nel resto dell'Europa, oltre alla Francia.

Tutti gli algoritmi e le banche dati sono pertanto sviluppati in riferimento al modello euleriano di trasformazione chimica e di trasporto Chimere. In generale un modello euleriano di chimica e trasporto traduce lo stato dell'arte delle conoscenze sulla chimica e la fisica dell'atmosfera. Esso consente di simulare il trasporto e la chimica degli inquinanti su domini stabiliti nello spazio. Un dominio di simulazione è costituito da un insieme di scomparti in cui sono calcolate le concentrazioni di inquinanti ad ogni passo considerando il bilancio di termini di perdita e di produzione secondo l'equazione di conservazione della massa, come esemplificato nell'immagine sottostante.

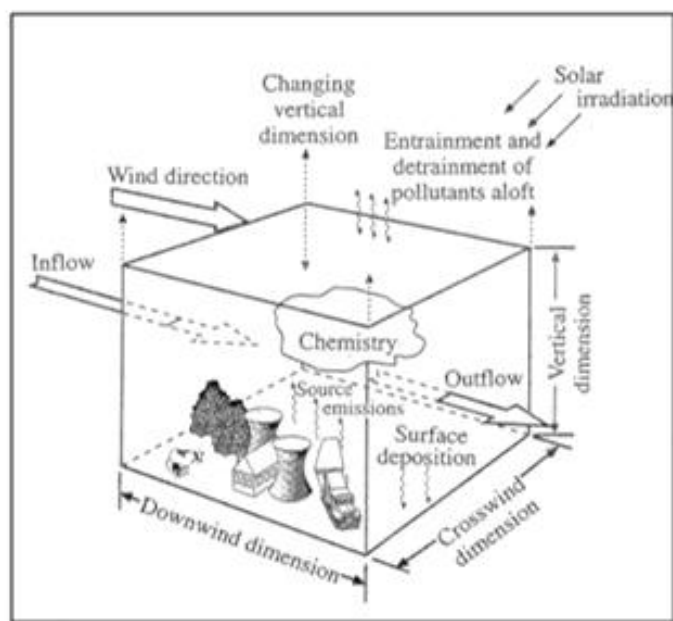


Figura 3. Schema che esemplifica il principio di conservazione della massa in riferimento ad un'unità di volume

Per analizzare la dispersione degli inquinanti in Romania sono necessari dati delle emissioni di inquinanti da traffico stradale, navale e aereo, dalle industrie e dalla popolazione, dati meteorologici e topografici. NEPA si occuperà anche di identificare le differenti sorgenti di inquinamento che saranno elencate in un Sistema Informativo Geografico (GIS) in accordo con la nomenclatura europea SNAP. Uno degli obiettivi del progetto consiste infatti nel far crescere nei cittadini la consapevolezza dell'inquinamento

atmosferico, per cui è previsto un portale di comunicazione on line con informazioni dirette sulla qualità dell'aria.

Quindi il primo passo del progetto è quello di raccogliere tutti i dati esistenti di qualità dell'aria e di emissioni inquinanti (da industrie, trasporti, fonti domestiche, l'agricoltura,..) e di raccogliere i dati meteorologici e geografici che descrivono l'ambiente. In una seconda fase, il sistema integrato di modellazione deve essere configurato con questi dati, testato e ampiamente validato, in modo che possa servire per le simulazioni sui diversi scenari, nonché per scopi di previsione. Gran parte del lavoro è dedicato a questo processo di convalida, in quanto il sistema sarà in esecuzione su un inventario delle emissioni sviluppato di recente. È prevedibile che il sistema risultante sarà migliorato e reso più specifico rispetto ai sistemi attuali in riferimento all'area su cui si concentrerà.

Il progetto di modellazione e previsione della qualità dell'aria riguarderà tutto il territorio della Romania (secondo dominio, circa 800 x 800 km). Più ampio è il dominio, più grossolana risulta la griglia, a causa dei dati di emissione disponibili e delle limitazioni della CPU: la griglia nel terzo ambito di modellazione, che coprirà la Regione Sud-Munatania e la regione di Bucarest (circa 200 x 200 km) sarà a passo più fine. Ma tutti e tre i domini nidificati concorrono al risultato, in quanto ognuno fornisce l'input per il successivo, tenendo conto della trasformazione chimica delle sostanze inquinanti, come ad esempio la produzione di ozono.

1.1.1 Il dominio del modello

Tra le caratteristiche di un modello si ritrova il dettaglio richiesto, che dipende soprattutto dalla disponibilità di dati appropriati e dallo stato dell'arte della modellizzazione. Spesso però quando l'utilizzo di modelli è funzionale ad un contesto decisionale, la precisione richiesta per costruire un modello è quella necessaria per discriminare tra un buon progetto ed uno meno buono. Nel caso di studio rientrano considerazioni riguardanti le risorse disponibili, ovvero la disponibilità dei dati emissivi e le limitazioni di calcolo imposte dalla CPU e osservazioni riguardanti il fatto che i livelli di inquinamento in città non sono interamente dovuti alle emissioni che si verificano all'interno della città stessa. Anzi la lunga vita dei precursori dei principali inquinanti primari e secondari fa sì che essi possano viaggiare per migliaia di chilometri e influire così maggiormente sulla qualità dell'aria durante episodi specifici. Per tener conto del contributo degli inquinanti di fondo "importati" da altre regioni, sono stati definiti tre domini successivi nidificati:

- il primo dominio (circa 1500 x 1500 km) coprirà l'Europa orientale, inclusa la Romania e i paesi confinanti
- il secondo (ca. 800 x 800 km) coprirà la Romania
- il terzo (circa 200 x 200 km) coprirà la Regione Sud-Munatania e la Regione di Bucarest.

Il passo della griglia viene dettato dai limiti operativi e dagli interessi di cui sopra, e il suo dettaglio, quindi l'accuratezza della soluzione, sarà maggiore passando dal primo livello ai successivi, come si può vedere nelle immagini successive. I risultati dei diversi domini saranno integrati in un unico risultato finale, in quanto ognuno fornisce l'input per il successivo, tenendo conto della trasformazione chimica delle sostanze inquinanti (ad esempio la produzione di ozono.)

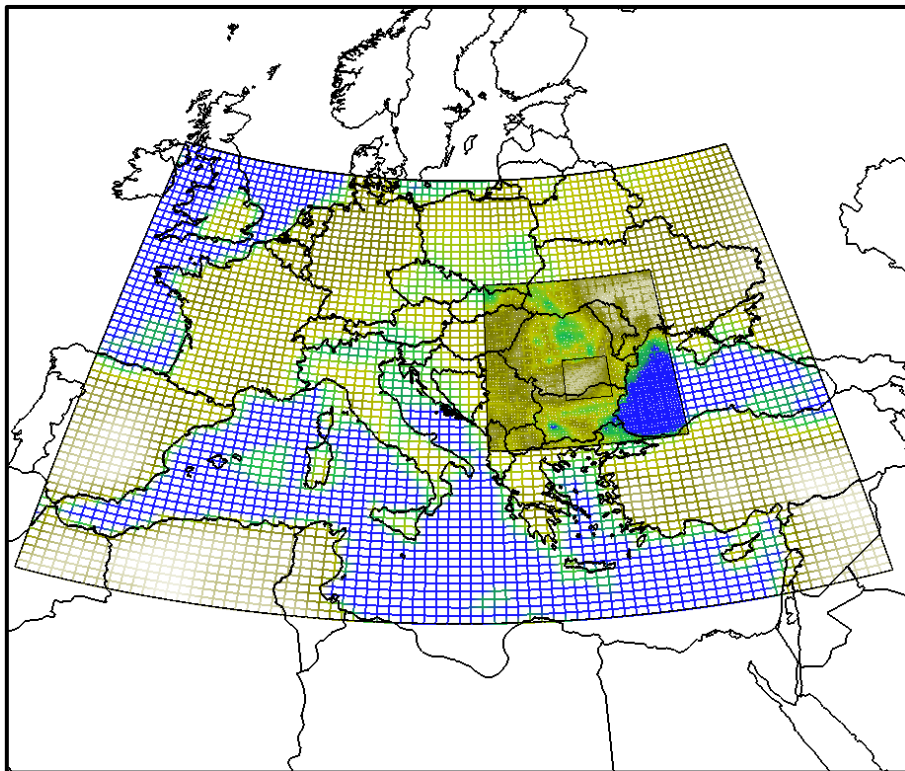


Figura 4. Il dettaglio della griglia che copre il dominio di primo livello con la localizzazione dell'area studiata nel secondo livello

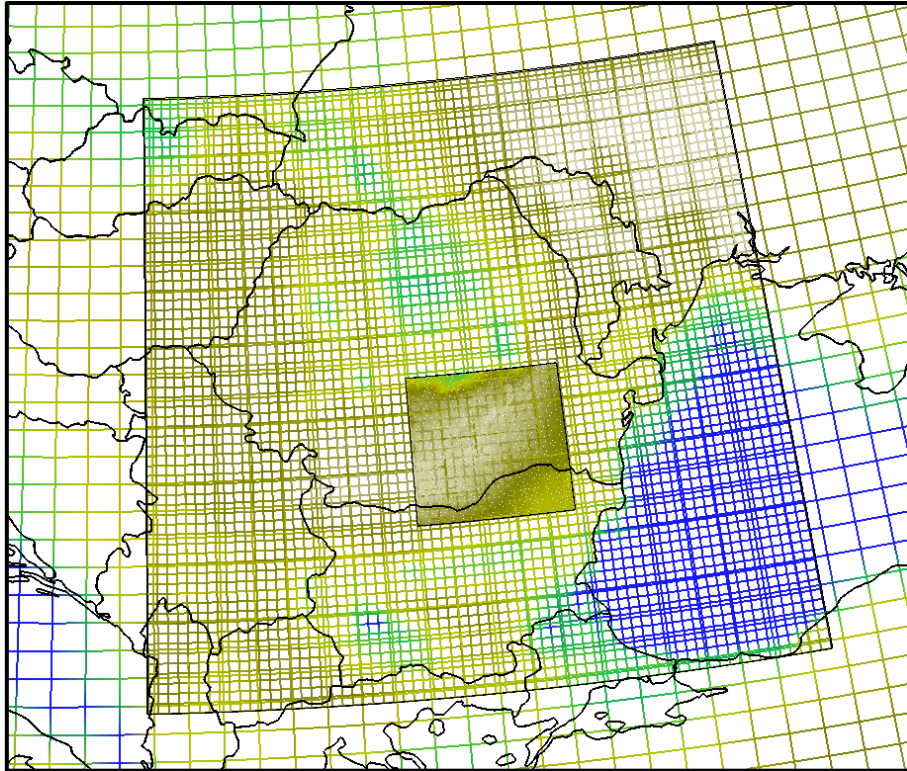


Figura 5. Il dominio di secondo livello che copre tutta la Romania con all'interno l'area di Bucarest studiata al terzo livello di dettaglio.

1.1.2 Tempi

Il progetto durerà 30 mesi durante i quali si attraverseranno tre fasi principali:

- La raccolta di dati di emissione e dispersione degli inquinanti, sia da sorgenti industriali unite a quelle della popolazione che da sorgenti di traffico.
- L'implementazione dei modelli meteorologici e previsionali accompagnati da esperimenti sul campo con strumenti di monitoraggio che ne permettano la calibrazione.
- Lo sviluppo di scenari che tengano conto di interventi di pianificazione strategica in campo ambientale per la Romania.

Tutto questo iter porterà come risultato ad avere un inventario di emissioni inserito in un GIS, un modello meteorologico e di dispersione degli inquinanti primari e secondari alla scala Europea, nazionale e regionale e la conoscenza dello stato di qualità futura dell'aria in corrispondenza di vari scenari.

1.1.3 Azioni

I risultati attesi direttamente, che possono essere considerati come obiettivi a breve termine e che sono indipendenti dalle decisioni politiche, potrebbero essere sintetizzati primariamente nella realizzazione di un inventario delle emissioni (compresi GHGs) inseriti in un sistema informativo geografico reso disponibile e pubblico. Gli obiettivi quantificati in questo ambito comprendono l'inclusione di 15.000 tratti viari da valutare nel modello di traffico (per metà del 2012 - entro la fine del progetto) e lo studio di 16 categorie SNAP da prendere in considerazione nel modello di emissione (per metà del 2012 - entro la fine del progetto). In secondo luogo è previsto un modello meteorologico e un modello di dispersione di inquinamento sia per gli inquinanti primari che secondari su scala europea, nazionale e regionale, gestita su base giornaliera. In seguito verranno implementati alcuni strumenti applicativi con la disponibilità di personale qualificato quali un bilancio dei gas serra a livello nazionale e regionale, la disponibilità di informazioni sulla salute pubblica nel GIS, la possibilità di simulare le condizioni climatiche future sopra la Romania. Infine sarà effettuata una valutazione della qualità dell'aria in scenari diversi (di emissioni e di cambiamento climatico). Come riferimento riguardo agli scenari si prevede di realizzarne 3 da testare ogni anno, a partire dal 2013 fino al 2018 - dopo il completamento del progetto. Per concorrere all'obiettivo finale ambientale del progetto che come detto consiste in un miglioramento della qualità dell'aria nel territorio della Romania, con le relative conseguenze sulla salute dei suoi abitanti, arrivando a una situazione di rispetto delle direttive UE di qualità dell'aria sono stati fissati obiettivi quantificati di medio termine che possono essere soddisfatti:

- Eliminazione del 20% degli episodi di ozono (valori superiori a $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$) osservata in Romania (2012 - entro la fine del progetto)
- Riduzione del 10% del numero elevato di episodi NO_2 a Bucarest (2012 - entro la fine del progetto)

Per la riduzione della quantità di gas serra emessi dal paese, che è rivolta a ridurre l'impatto sul cambiamento climatico si ritrovano altri esempi di obiettivi quantificati quali:

- Riduzione del 5% dei gas serra rilasciati dal settore dell'energia (2012 - entro la fine del progetto)

- Riduzione del 3% dei gas serra rilasciati dal settore dei trasporti (2012 - entro la fine del progetto)

Analogamente spostando il focus su scadenze a lungo termine si trovano analoghi esempi di obiettivi quantificati come l'eliminazione del 50% degli episodi di ozono (valori superiori a $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$) osservata in Romania (2015 - dopo il completamento del progetto) o la riduzione del 30% del numero elevato di episodi NO_2 a Bucarest (2020 - dopo il completamento del progetto), mentre nell'ambito del discorso di riduzione della quantità di gas serra emessi dal paese si legge una riduzione del 12% dei gas serra rilasciati dal settore petrolifero e dell'energia (2015 - dopo il completamento del progetto) o una riduzione del 10% dei gas serra rilasciati dal settore dei trasporti (2018 - dopo il completamento del progetto).

2. MATERIALI E METODI

Nell'ambito della modellizzazione dei trasporti si sono avuti importanti sviluppi tecnici a partire dagli anni settanta, inizialmente celebrati soprattutto dalle riviste accademiche ma negli ultimi anni considerati anche dai pianificatori. Questo perché il modello può definirsi come una rappresentazione semplificata del mondo reale e può concentrarsi solo su certi elementi considerati importanti ai fini delle analisi nonché rappresentare un terreno comune oggettivo di discussione per analizzare con obiettività i problemi in questione. Tradizionalmente lo studio delle caratteristiche del traffico è sempre stato finalizzato alla pianificazione degli investimenti ed al miglioramento delle condizioni di circolazione, soprattutto in ambito urbano. In tempi recenti, si è sentita da più parti l'esigenza di estendere le finalità tradizionali della pianificazione dei trasporti alle problematiche connesse con la tutela dell'ambiente e con il miglioramento della qualità della vita, come accade nel caso in esame. Con un grado di dettaglio differente a seconda dell'obiettivo, per arrivare a simulare una rete di trasporto è necessario possedere una conoscenza teorica del meccanismo di funzionamento del sistema dei trasporti presente in una data porzione di territorio. Esso è influenzato dalla presenza e dalla distribuzione spaziale delle fonti di utilità a disposizione degli individui ma contemporaneamente non segue delle leggi di funzionamento stabilite che restituiscano una soluzione univoca in termini di traffico circolante poiché nella realtà s'innescano complessi fenomeni d'interdipendenza tra domanda di trasporto e offerta di servizio, in base al quadro conoscitivo delle opportunità che ciascun soggetto possiede riguardo alle sue condizioni di accessibilità, che corrispondono all'offerta di infrastrutture e di servizi di trasporto.

Simulare una rete di trasporto prevede quindi di tradurre le caratteristiche fisiche e funzionali della rete stessa in opportuni modelli matematici interconnessi, suscettibili di facilitare la rappresentazione quantitativa della distribuzione spaziale e temporale dei flussi di traffico sulla rete con l'impiego dei mezzi di calcolo automatico disponibili attualmente. Per procedere con la simulazione di un sistema di trasporto si devono definire alcuni elementi che permettono di ottenere la rappresentazione formale e analitica dei componenti di offerta e domanda del sistema di trasporto e che quindi sono predisposti alla successiva analisi quantitativa del sistema, con la determinazione delle caratteristiche dei flussi.

2.1 ANALISI DELL'OFFERTA DI TRASPORTO

L'offerta è rappresentata da un archivio informatizzato e georeferenziato contenente le informazioni quantitative dei suoi elementi fisici, funzionali e organizzativi. I dati contenuti nell'archivio sono visualizzati dal grafo della rete di trasporto, che consiste in una rappresentazione schematica della configurazione della rete stradale. Con il termine grafo si intende una configurazione grafica, associata a elementi numerici, che rappresenta la struttura e le caratteristiche di una rete di trasporto, simulando la rete effettiva di trasporto esistente nella realtà. La rete rappresentata da un grafo può riferirsi a un qualunque modo di trasporto, alle sue infrastrutture o ai servizi su di essa offerti. Dovendosi occupare in questa sede di un caso di simulazione del traffico stradale è stato sufficiente riportare la configurazione delle infrastrutture, cioè le strade, di varia tipologia, con le loro caratteristiche geometriche (lunghezza, ecc) e funzionali (velocità, capacità, ecc.): inizialmente ci si è occupati della sola rappresentazione del grafo scarico. Al contrario si definisce grafo carico o grafo assegnato il grafo di una rete sul quale sono rappresentati anche i flussi di traffico che percorrono i suoi archi, solitamente rappresentati con flussogrammi aventi colori e dimensioni proporzionali ai flussi stessi. Si riporta un breve approfondimento teorico sulle componenti fisiche e funzionali associate ad un grafo, seguito dalla descrizione delle fasi e dei parametri utilizzati per la costruzione del grafo della città di Bucarest.

2.1.1 Gli elementi fisici dell'offerta

Per "archi" si intendono gli elementi lineari di un grafo che riproducono i tratti elementari delle infrastrutture o dei servizi di trasporto di una rete. Dal punto di vista trasportistico, un arco di un grafo rappresenta il collegamento tra una coppia di "nodi", che si definiscono invece come gli elementi puntuali di un grafo. Per questo motivo spesso un arco non è identificato da un codice numerico proprio, bensì dal codice dei suoi due nodi estremi. Altre volte invece può accadere che venga associato all'arco anche un codice suo proprio, come nel caso in esame.

Generalmente i nodi sono georeferenziati, cioè corrispondono a punti reali ben definiti e identificati da coordinate spaziali. Tra gli elementi di una rete rappresentabili mediante nodi si possono trovare ad esempio i punti particolari, quali piazze, incroci o intersezioni, stazioni, dalle quali si diramano tre o più strade o linee di trasporto. Nella costruzione di un grafo, a ciascun nodo è associato un codice numerico, pertanto ogni nodo è identificato

univocamente da un numero i . I nodi fisici sono caratterizzati dalla proprietà di non attrarre né generare domanda, pertanto la differenza tra il totale dei flussi entranti in un nodo e il totale dei flussi uscenti da esso è nulla. Mediante gli archi si possono rappresentare invece altri elementi reali di una rete, ad esempio un'infrastruttura di trasporto come una strada, una ferrovia o la metropolitana. Ad essi sono associati attributi numerici che ne rappresentano il comportamento agli effetti degli spostamenti che su di essi si manifestano. Ad esempio si può esprimere la direzionalità di un arco inteso a due sensi di marcia se il senso di percorrenza non è specificato, altrimenti a senso unico se è associata una direzione. Oppure in altri casi una strada a doppio senso è rappresentata con due archi paralleli a sensi unici opposti. Altri elementi fondamentali per la descrizione dell'offerta sono i centroidi, ovvero quei nodi che corrispondono all'inizio e al termine di uno spostamento che si manifesta su una rete. Nel caso di studio si sono individuati molti centroidi di zona che rappresentano i punti fittizi interni a una zona nei quali iniziano e terminano gli spostamenti di persone o veicoli; per esempio un centroide di zona può rappresentare l'insieme dei quartieri residenziali o l'insieme delle fabbriche e degli uffici. Altre tipologie di centroidi esistenti ma di cui non ci si è occupati sono quelli di cordone, che rappresentano i luoghi attraverso i quali transitano gli spostamenti che entrano o escono nell'area di studio e quelli esterni che rappresentano i luoghi situati all'esterno dell'area di studio, dai quali si ipotizza che provengano gli spostamenti entranti e verso i quali siano diretti gli spostamenti uscenti.

I centroidi generalmente sono nodi fittizi, privi cioè di una corrispondenza fisica nella realtà, che rappresentano l'insieme dei punti interni a una zona nei quali può iniziare o terminare uno spostamento. Assume un ruolo fondamentale invece il nodo, o i nodi, ai quali si connette ogni centroide, perché attraverso di esso si manifesta la corrispondenza tra il modello di offerta e il modello di domanda, tra il grafo e i punti generatori o attrattori di domanda. Normalmente i centroidi sono contemporaneamente generatori e attrattori, per cui la differenza tra il totale dei flussi entranti in un centroide e il totale dei flussi uscenti da esso è diversa da zero. A ciascun elemento fondamentale che compone graficamente il grafo è associata una banca dati nella quale sono contenute le informazioni numeriche che lo caratterizzano quantitativamente. La banca dati dell'offerta è solitamente gestita da un cosiddetto archivio o data-base relazionale, cioè uno strumento informatico che permette l'archiviazione, l'estrazione, l'elaborazione e la sintesi degli elementi in esso memorizzati per ottenere la preparazione dei dati necessari per le simulazioni. Nel corso degli ultimi anni la disponibilità di archivi georeferenziati gestibili mediante strumenti GIS è

aumentata e ciò ha facilitato enormemente le operazioni preparatorie dei grafi perché permette di disporre di una rappresentazione cartografica degli elementi territoriali a cui sono associati i record del database. Tra le informazioni qui contenute alcune sono definite fisiche o geometriche poiché sono determinabili con semplici operazioni di misura dei corrispondenti elementi reali, per esempio la lunghezza e il numero di corsie della strada rappresentata da un arco, mentre altre informazioni sono definite funzionali perché non rappresentano elementi fisici concreti, bensì fenomeni o fattori astratti, ma comunque quantificabili, che caratterizzano gli elementi del grafo dal punto di vista del loro funzionamento, per esempio la velocità di deflusso e la capacità. Molte caratteristiche funzionali possono essere quantificate a partire dalle caratteristiche geometriche, altre devono essere rilevate e campionate in modo statistico.

2.1.2 Le componenti funzionali

Alcune caratteristiche funzionali assumono un interesse rilevante nel processo di simulazione perché permettono di descrivere il comportamento di una rete di trasporto a fronte delle proprie caratteristiche di offerta e della domanda di trasporto alla quale è sottoposta. Nel seguito si è scelto di descrivere e definire brevemente quelle che sono risultate più interessanti nel corso dell'analisi eseguita, riferendosi al caso del grafo che modella la rete di trasporto stradale di Bucarest.

Tra queste, un dato importante che può caratterizzare il funzionamento di un'infrastruttura è il massimo numero di veicoli o di utenti o di merce che essa riesce a sopportare nell'unità di tempo, cioè la sua capacità di smaltire il flusso di traffico al quale è sottoposta. La capacità di un'infrastruttura si esprime in termini di flusso massimo, cioè di veicoli, di utenti o di merci che possono transitare nell'unità di tempo attraverso una sua sezione. Essa può variare in funzione di alcune caratteristiche geometriche dell'infrastruttura, per esempio il numero e la larghezza delle corsie, la tortuosità, la pendenza, la presenza di accessi laterali, oppure per la composizione del flusso, in particolare la presenza di veicoli pesanti.

Ogni arco di un grafo è anche caratterizzato dal costo di trasporto che deve essere sostenuto per compiere uno spostamento attraverso esso dal nodo iniziale i al nodo finale j . È importante precisare che si tratta di un costo generalizzato, inteso cioè non come costo prettamente monetario, ma come un generico impiego di risorse che rappresenta l'onere che l'utente deve sostenere per spostarsi lungo una certa via di trasporto. Pertanto il costo generalizzato è composto da vari termini, alcuni dei quali rappresentano

effettivamente costi monetari come quello sostenuto per l'acquisto del carburante, per i pedaggi autostradali, o per la sosta a pagamento, mentre altri riproducono le cosiddette disutilità, che nello specifico caso del trasporto individuale possono comprendere il tempo di percorrenza, di ricerca del parcheggio o trascorso in coda e i rischi di incidente, l'incertezza della durata del viaggio o l'eventuale disagio riscontrato nello spostamento. Tra le componenti di costo di un arco citate si evidenzia che alcune sono indipendenti dalla sua lunghezza e sono denominate costi fissi, per esempio il tempo perso per la ricerca del parcheggio, mentre la maggior parte di esse dipende dalla lunghezza dell'arco e in questo caso si parla di costi additivi, come il costo monetario del carburante o il tempo di viaggio. Può anche accadere che il costo di percorrenza dell'arco dipenda dal flusso che vi transita, nel caso in cui esso superi una certa soglia per cui al crescere della densità veicolare aumenta il tempo di percorrenza. Per rappresentare questo fenomeno ci si serve di funzioni di costo che esprimono per ogni arco il tempo di percorrenza in funzione del flusso.

Un'altra caratteristica funzionale degna di nota per un arco è la sua velocità, che risulta molto efficace per rappresentarne le prestazioni e per effettuare confronti tra archi aventi lunghezza differente oppure per identificare le condizioni di funzionamento rispetto a un valore di riferimento. Tra le tante possibili definizioni di velocità di un arco si evidenziano quelle considerate direttamente ai fini dell'analisi, ovvero la velocità di libero deflusso che rappresenta la velocità di un veicolo circolante in modo indipendente dalla presenza e dalle condizioni di marcia degli altri veicoli e la velocità media che risulta dal rapporto tra la distanza percorsa e il tempo totale impiegato per percorrerlo; essa è pertanto influenzata dai rallentamenti e dalle fermate effettuate lungo il percorso, per esempio in corrispondenza di intersezioni semaforiche. Per mettere in relazione la velocità di deflusso, che varia a seconda delle interazioni reciproche tra i veicoli, con la densità veicolare si utilizzano le cosiddette curve di deflusso. Per valori bassi di densità, espressa come rapporto tra flusso e capacità, la velocità di deflusso coincide con la velocità a vuoto. Al crescere del rapporto F/C la velocità di deflusso cala fino ad assestarsi su valori nulli in condizioni di congestione ($F/C \geq 1$). Ricordando la definizione di capacità, cioè il massimo numero di veicoli che può transitare attraverso una sezione stradale nell'unità di tempo, può sembrare strano che si considerino in ascissa valori del rapporto flusso/capacità superiori a 1. Questo avviene perché i modelli che effettuano l'operazione di assegnazione dei flussi alla rete la caricano con un processo iterativo in cui, soprattutto nelle prime iterazioni, alcuni archi possono presentare un numero di veicoli maggiore rispetto alla loro

capacità. In letteratura sono presenti differenti valori per i parametri che definiscono la curva risultanti da diversi processi di calibrazione. Si è scelto di considerarli per alcune tipologie di strade mentre per altri tratti si è ricavata una curva ad hoc sulla base dei dati disponibili, come verrà illustrato nel paragrafo relativo alla rete della città studiata.

Infine rientra tra queste caratteristiche anche il livello gerarchico di una strada, che offre un'informazione sul suo grado di rilevanza e sulla funzione che essa svolge all'interno della rete.

2.1.3 La rete viaria di Bucarest: scelte operative e livello di dettaglio

L'operazione preliminare e fondamentale che ha preceduto qualsiasi elaborazione riguardante il caso di studio è stata la definizione della rete viaria della città di Bucarest, sulla quale si sono basate poi tutte le analisi e le considerazioni del caso. Si disponeva inizialmente di uno shape file contenente tutti i tipi di connessioni stradali presenti in Romania mappato con il sistema GPS, in formato compatibile con il software Map Info. Quest'ultimo permette di visualizzare in ambiente Gis (Geographic Information System) lo strato cartografico ed effettuare operazioni direttamente sull'archivio associato, generando in uscita nuovi livelli informativi rappresentabili.

Con il supporto del software si sono quindi compiute inizialmente delle scelte di dettaglio areale sull'intera rete, andando a selezionare con un ragionevole margine l'area che comprendesse l'intera estensione della città.

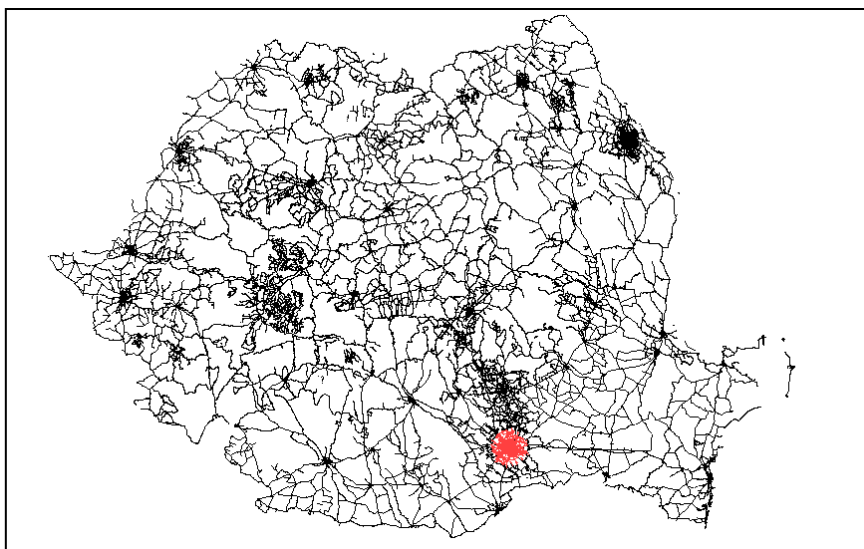


Figura 6. Rete stradale rumena e selezione in rosso dell'area di studio.

Accanto alla mappatura geometrica delle strade il file conteneva altre informazioni sulle caratteristiche quantitative e funzionali delle stesse. Come specificato in precedenza la banca dati dell'offerta è solitamente gestita da un data-base relazionale, per cui è stato relativamente semplice accedere con lo strumento informatico alla sintesi delle informazioni raccolte ed utilizzarle per l'elaborazione del dato. Si riporta un dettaglio della tabella associata al grafo, in cui i primi tre campi come spesso accade riportano l'identificativo dell'elemento, il nome e un riferimento quando presenti, mentre gli altri tre riportano indicazioni più specifiche per la caratterizzazione stradale. Tra questi il campo "oneway" può assumere valori booleani e precisamente 1 se la direzionalità dell'arco è univoca, 0 nel caso che l'arco sia percorribile in entrambi i versi. La colonna "max speed" contiene invece la velocità ad arco scarico, riferita cioè alla situazione di libero deflusso in cui la densità dei veicoli è abbastanza bassa da non comportare la loro reciproca influenza in termini di condizioni di marcia. Il suo valore era fornito solo in corrispondenza di alcuni record, per cui si sono aggiunti i dati mancanti prendendo come riferimento indicativo il limite di velocità per ciascuna tipologia di strada.

ID	NAME	RIF	TYPE	ONEWAY	MAX speed
1915	Bulevardul Camil Ressu		primary	1	60
2160		DN21	trunk	0	90
2955804	Strada Câmpia Libertății		tertiary	0	40
3026943			primary_link	0	50
3026944	Bulevardul Nicolae Grigorescu		primary	1	60
3039872	Soseaua Ianului		primary	0	60
3039873	Bulevardul Biruintei	DN3	primary	1	60
3043515	Bulevardul Ghencea		primary	1	60
3043519	Calea Rahovei	DN6	trunk	1	90
3043520	Strada Mihail Sebastian		secondary	1	50
3043521	Strada Vasile Topliceanu		residential	0	30

Tabella 1 . Archivio associato al grafo della rete viaria rumena

Ai fini dell'analisi è risultata fondamentale la classificazione topologica della strada, riportata nel campo "type" e basata su una ventina di categorie qui riportate in un elenco

completo per dare un'idea dell'elevato livello di dettaglio cui arriva il grafo, essendo presente il ventaglio di realtà compreso tra le autostrade e i sentieri pedonali.

constructing	(1)
construction	(7)
crossing	(2)
local	(1)
motorway	(31)
motorway_link	(26)
path	(1)
primary	(495)
primary_link	(121)
reidential	(1)
residential	(6571)
road	(46)
secondary	(419)
service	(502)
tertiary	(631)
track	(389)
trunk	(93)
trunk_link	(43)
unclassified	(420)
undefined	(1)
unsurfaced	(158)

Figura 7. Legenda tematica per categoria di strada

Ai fini dello studio da compiere si è scelto di selezionare e mantenere tra tutte soltanto le strade rientranti negli 8 livelli gerarchici superiori, che corrispondono alle 8 categorie principali dal punto di vista della consistenza del flusso veicolare (autostrade, collegamenti autostradali, tangenziali e connessioni relative, strade di attraversamento, primarie e secondarie). È stato scelto di basarsi su questo criterio per effettuare la semplificazione della rete in modo da eseguire un'operazione trasparente e riproducibile. Il risultato della scelta compiuta viene messo a confronto graficamente con la rete iniziale in riferimento ad un'area centrale della città, per mostrare come sia ancora individuabile lo scheletro della viabilità principale pur avendo drasticamente diminuito la densità stradale.



Figura 8. Confronto tra la rete completa e la rete che mantiene solo le categorie indicate in legenda

Ciò consente di disporre delle connessioni più rappresentative ai fini del progetto, perché esse costituiscono gli assi principali che permettono gli spostamenti tra le varie parti della città, e di raggiungere un grado di dettaglio più coerente con l'analisi della consistenza dei flussi, dato che si dispone di dati di misura relativi ai soli assi principali mantenuti.

Si sono successivamente compiute delle operazioni di affinamento della rete ottenuta andando a verificare graficamente la reale connessione tra tutti gli archi mantenuti. In tale frangente si sono aggiunti manualmente archi laddove erano presenti discontinuità o

eliminati quando si presentavano come tratti isolati, probabilmente frutto di errori di classificazione. Si è verificato che tutte le operazioni eseguite rispettassero la corrispondenza con la rete reale della città di Bucarest attraverso l'utilizzo del software Google Earth, che si è rivelato uno strumento di visualizzazione della città molto efficace per individuare anche successivamente le possibili discordanze tra i dati acquisiti e la realtà. Si sono semplificati gli svincoli più complessi, cercando di rispettare le reali possibilità di svolta trascurando il dettaglio geometrico dei raccordi. La rete stradale risultata da questa serie di operazioni contiene circa 1100 collegamenti stradali, per una lunghezza totale di 680 km, che corrisponde a circa il 20% della lunghezza totale delle strade carrozzabili inizialmente presenti.

Geometricamente gli archi sono rappresentati mediante polilinee, formate da vertici singolarmente modificabili con gli strumenti di elaborazione grafica corrispondente, visualizzabili come quadratini neri lungo l'arco selezionato in rosso. In corrispondenza di uno svincolo è necessario che la strada che si immette in esso abbia un vertice (interno o finale) esattamente in sua corrispondenza (figura a), poiché in caso contrario la configurazione geometrica coincide con una sovrapposizione di strade senza possibilità di raccordo, come accade ad esempio in corrispondenza di un sottopasso (figura b).

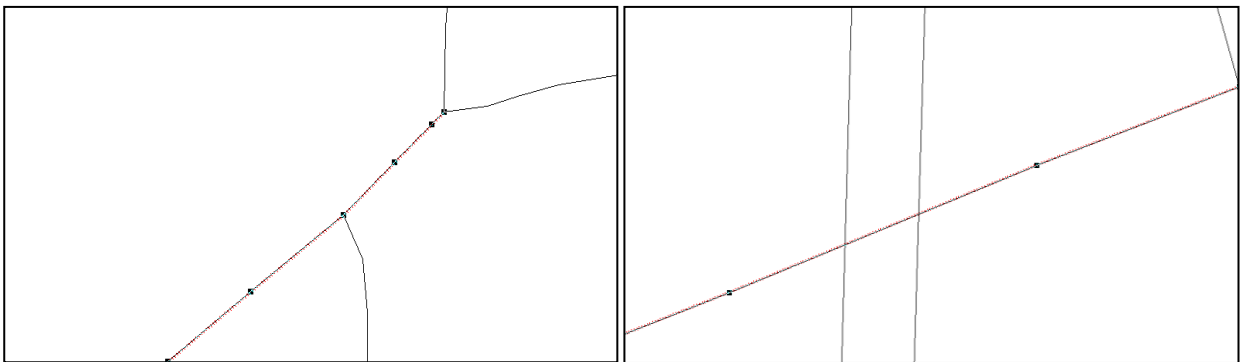


Figura 9. L'incrocio geometrico tra polilinee può rappresentare uno svincolo (a) o un sottopasso (b)

Analizzata la corrispondenza reale di questi casi, si è proceduto con la conversione del file della rete in un formato compatibile con il software Caruso dedicato allo studio del carico veicolare presente su di essa. Il programma di preprocessamento utilizzato spezza le polilinee secondo il criterio illustrato poco fa, introducendo un nodo in corrispondenza di ogni intersezione fisica, e restituisce i file degli archi e dei nodi risultanti, anche in formato adatto per esser importato nuovamente in Map Info nel caso si voglia procedere con ulteriori aggiustamenti della rete composta ora dai semplici elementi puntuali e lineari. La

tabella relativa agli archi è stata completata con l'aggiunta dei seguenti campi che si affiancano a quelli già illustrati per la rete:

LENGHT	TOT TGM	TOT TGM 2	CAPACITY	FLOW NR
665.312	0	0	0	0
595.034	0	0	0	0

Tabella 2. Campi aggiunti all'archivio della rete stradale

La lunghezza degli archi calcolata in metri rappresenta una delle caratteristiche geometriche fondamentali per caratterizzare un arco, utile anche per le analisi seguenti. Gli altri due campi chiamati "tottgm" e "tottgm2" sono stati introdotti per associare le misure dirette e inverse di traffico all'arco, quando disponibili. Infine gli ultimi campi si riferiscono ad altre due fondamentali caratteristiche funzionali dell'arco, ovvero la sua capacità misurata in veicoli/ora e il codice di richiamo alla curva di deflusso specifica che sarà assegnata in relazione alla tipologia di strada.

Per quanto riguarda il database associato al grafo dei nodi, esso è molto più semplice e contiene i due campi seguenti:

CODICE	ZONA_OD
533	0
539	1

Tabella 3. Archivio associato alla rappresentazione dei nodi

Nel primo è presente un codice identificativo dell'elemento corrispondente, l'altro è un campo che può assumere valori booleani 1 o 0 a seconda che il nodo corrisponda o no ad una zona origine/destinazione degli spostamenti, argomento di cui si parlerà più dettagliatamente nel capitolo relativo all'analisi della domanda.

Si affronta ora il discorso delle curve di deflusso relative agli archi, il cui andamento è stato dedotto dagli studi presenti in letteratura o ricavato da elaborazioni di dati reali ove disponibili. In questo caso si son messi in relazione i dati di flusso e velocità rilevati ad intervalli di 5 minuti in corrispondenza di alcuni tratti urbani classificati come primari. Dopo aver selezionato tra questi una strada collocata in zona centrale priva di elementi

particolari che possano far pensare ad un caso eccezionale, la prima operazione è consistita nell'aggregare i dati rilevati per ottenere dati orari che spalmino su un intervallo più ragionevole l'effetto di rallentamenti o arresti della circolazione dovuti alla presenza di semafori o al casuale attraversamento dei pedoni, sommando i valori di flusso sull'ora e mediando i valori di velocità.

Intervallo	Flusso (veicoli/5')	Velocità (km/h)	Intervallo	Flusso (veicoli/h)	V media (km/h)
30/11/2009 10.55	50	7	30/11/2009 10.00-10.55	561	31.75
30/11/2009 10.50	50	7			
30/11/2009 10.45	52	29			
30/11/2009 10.40	44	40			
30/11/2009 10.35	48	40			
30/11/2009 10.30	57	14			
30/11/2009 10.25	45	47			
30/11/2009 10.20	37	50			
30/11/2009 10.15	44	47			
30/11/2009 10.10	52	43			
30/11/2009 10.05	48	32			
30/11/2009 10.00	34	25			

Tabella 4. Operazione di aggregazione dei dati flusso-velocità per ottenere dati orari.

Si sono scelti i dati riferiti ad una settimana feriale "tipo", dalle 00.00 del lunedì alle 23.55 del venerdì e da uno studio a disposizione si è considerato un valore di 800 veicoli/h per la capacità della strada con una velocità di libero deflusso di 65 km/h. Si è dunque passato al calcolo dei valori di densità veicolare, rapportando il flusso alla capacità, per proseguire con un confronto grafico delle coppie di valori (F/C; velocità media oraria) che viene qui riportato.

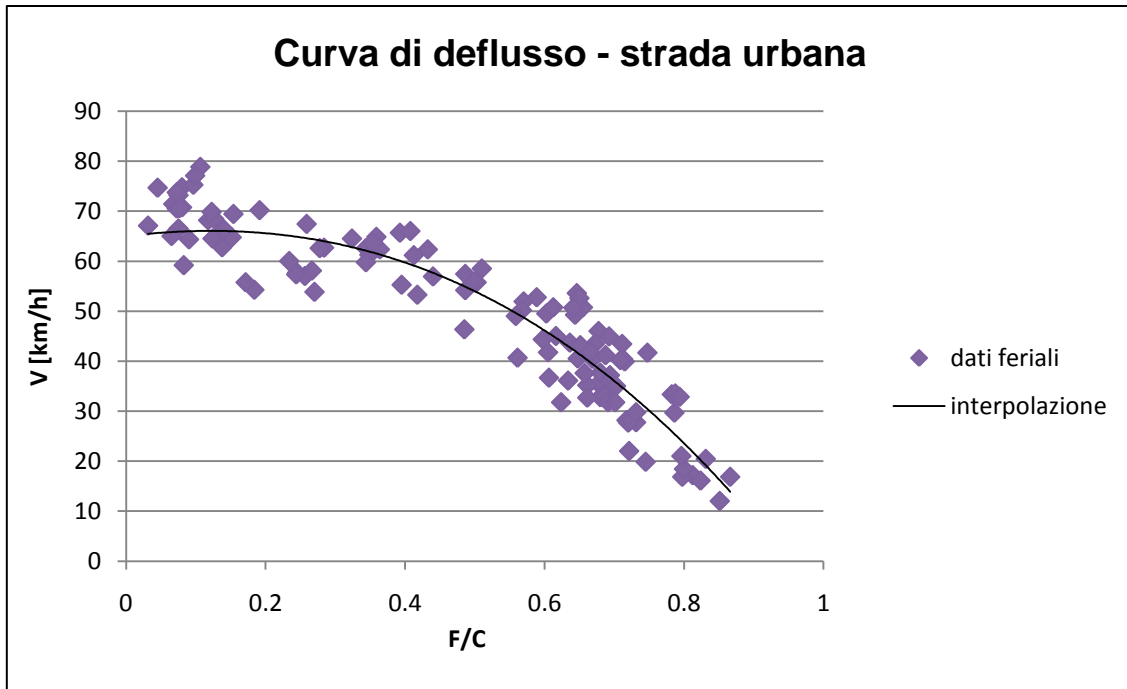


Grafico 1. Curva di deflusso stimata dai dati sperimentali

Si è voluto a questo punto valutare la significatività di questo risultato mediante il confronto con i dati disponibili in letteratura. Normalmente l'andamento della curva di deflusso è descritto da un'equazione del tipo:

$$V = \frac{V_0}{1 + \alpha \left(\frac{F}{C}\right)^\beta}$$

per cui si trovano varie combinazioni di parametri (α, β) stimate da vari autori in relazione alle diverse tipologie di strada. Per il caso in esame, ovvero una strada urbana primaria i valori proposti risultano:

Autore	α	β
C.I.Su.T.- S.T.A., 1999	1	3

Tabella 5. Parametri reperibili in letteratura per la stima di una curva di deflusso urbana

Dopo aver posto una velocità ad arco scarico $V_0 = 65$ km/h la curva risultante rappresentata in blu assume il seguente andamento:

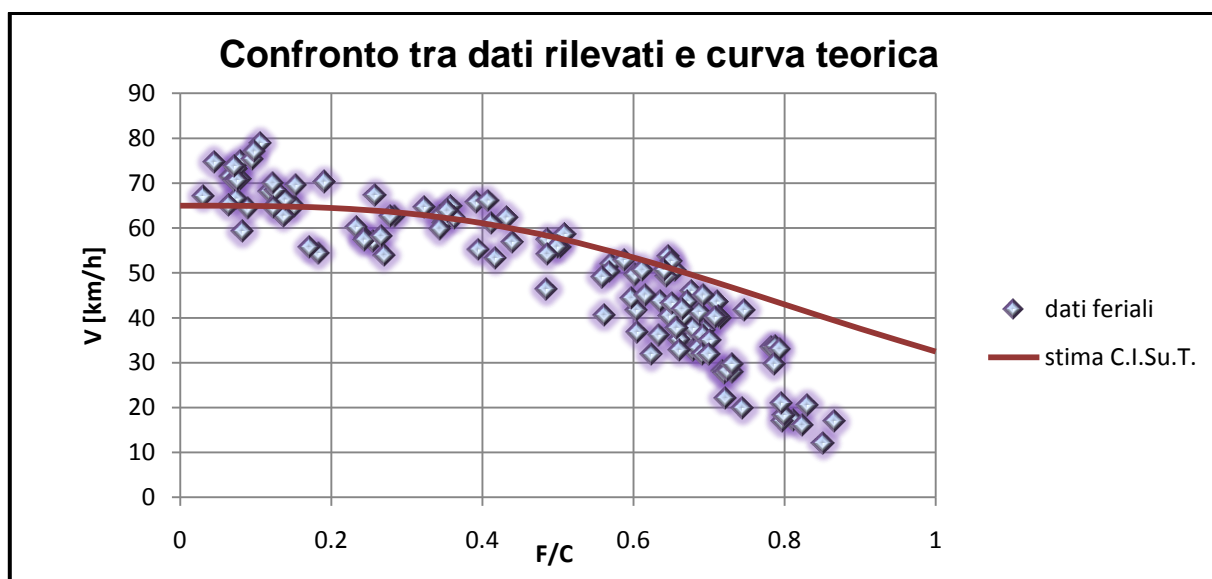


Grafico 2. Confronto grafico tra risultati sperimentali e riferimenti teorici

Si nota come secondo i dati sperimentali la velocità decresca seguendo un andamento coerente con la curva teorica fino a valori del rapporto flusso/capacità pari a circa 0.4, dopodiché si scosta seguendo una decrescita più marcata. Non avendo altre informazioni sull'affidabilità degli approcci, si è ritenuto più ragionevole per l'applicazione al caso di studio basarsi sui dati reali e rispettare il loro andamento, descritto dalla curva interpolante rappresentata in precedenza. Essa per poter essere utilizzata dal software dev'esser descritta per punti e rappresentata nel piano (F/C, V/V₀), pertanto il risultato finale dell'elaborazione risulta:

F/C	V/V ₀
0.05	1.00
0.1	1.00
0.15	1.00
0.2	1.01
0.25	0.99
0.3	0.98
0.35	0.95
0.4	0.92
0.45	0.88
0.5	0.83
0.55	0.77
0.6	0.71
0.65	0.64
0.7	0.55
0.75	0.46
0.8	0.36
0.85	0.25
0.9	0.13
0.95	0.00
1	0.00

Tabella 6. Discretizzazione per coppie di punti della curva di deflusso stimata

La forma ottenuta è stata poi generalizzata a tutte le strade appartenenti alla stessa tipologia.

Per i tipi di strade per cui non sono stati reperiti dati utili (autostrade, tangenziali, strade di scorrimento e strade secondarie locali) l'andamento è stato dedotto dai valori dei parametri disponibili in letteratura, che vengono qui di seguito riportati con la rappresentazione delle curva relativa nel piano (F/C , V/Vo), poi trasformata in un formato di serie di punti per esser utilizzata dal programma di simulazione del traffico:

Tipologia stradale	Autore	α	β
Autostrada e tangenziale	Ferrari, 1992	0.364	2.52
Strada di scorrimento	C.I.Su.T.- S.T.A., 1999	1	7,5
Strada urbana locale	C.I.Su.T.- S.T.A., 1999	1	2

Tabella 7. Parametri disponibili in letteratura per stimare le curve di deflusso in relazione a diverse tipologie di strada

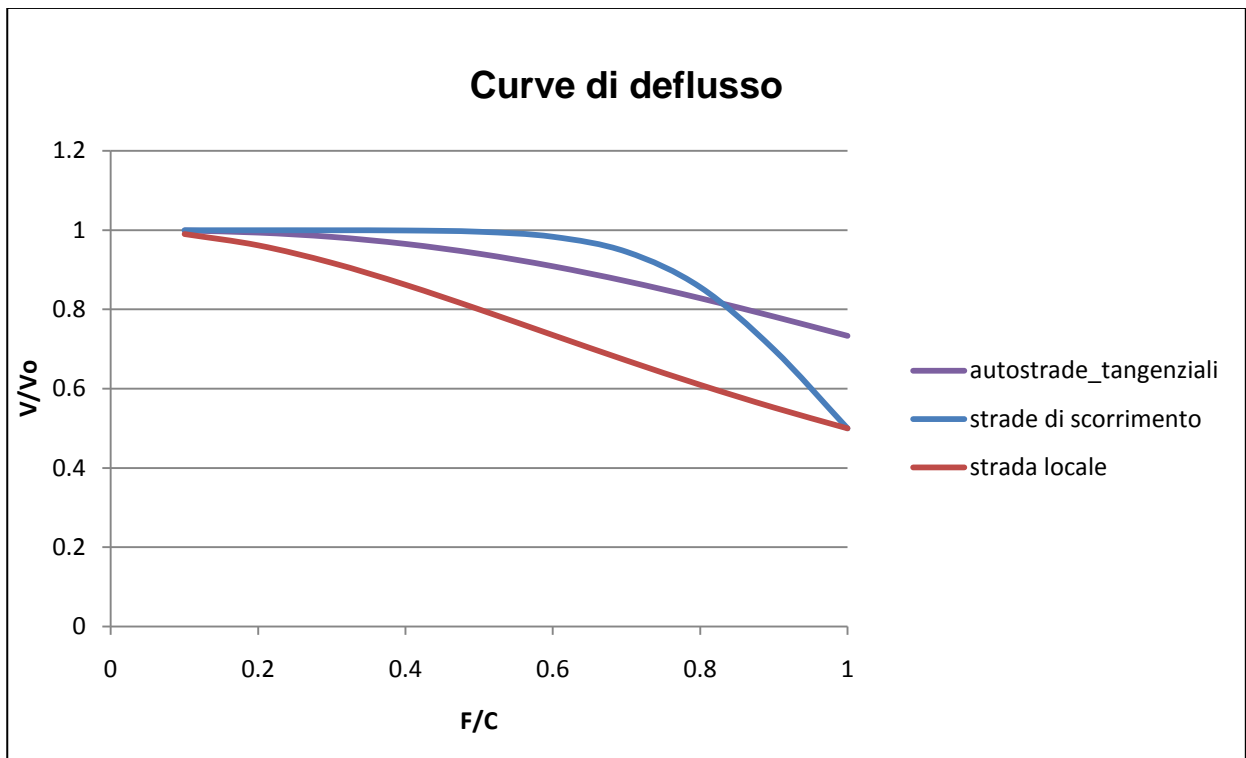


Grafico 3. Curve di deflusso ottenute dai risultati reperiti in letteratura relative a tre differenti tipologie di strada.

Conclusa l'analisi dell'offerta, per arrivare alla costruzione del modello di simulazione del sistema dei trasporti si deve affrontare l'analisi della domanda, fase più delicata del processo perché mira a conoscere il numero, le esigenze e le aspettative degli utenti attuali, futuri e potenziali dei servizi di trasporto che, spostandosi tra le zone nelle quali può essere suddivisa un'area urbana, percorrono le varie vie della rete stradale generando traffico. Di seguito verranno analizzati rapidamente i classici metodi di analisi della domanda, che mirano a conoscerne gli elementi caratterizzanti, evidenziando i limiti operativi di questi procedimenti. Successivamente si discuteranno alcuni tra i metodi alternativi esistenti per la stima delle matrici OD che superano le difficoltà descritte in precedenza e che rappresentano gli algoritmi implementati concretamente dai software utilizzati.

2.2 ANALISI DELLA DOMANDA DI TRASPORTO

Solitamente si cerca di descrivere la domanda in funzione di alcuni parametri tipici che la caratterizzano in modo esaustivo. Essi possono essere identificati con particolari elementi denominati segmenti di domanda tra i quali si ritrova l'origine dello spostamento, normalmente indicata con o , la destinazione dello spostamento, normalmente indicata con d , la categoria i di utente che compie lo spostamento da cui dipende il motivo del viaggio, il motivo s dello spostamento, l'unità di tempo nella quale avviene lo spostamento, normalmente indicata con h , la modalità di trasporto utilizzata per effettuare lo spostamento, per esempio stradale, ferroviario, individuale, collettivo, indicata con m , il percorso k seguito utilizzato nella rispettiva modalità di trasporto, la ricorrenza dello spostamento che può essere pendolare o occasionale, la frequenza dello spostamento, l'attualità dello spostamento che può essere elevata se si sta verificando nel momento nel quale si sta analizzando la domanda di trasporto, potenziale se sussistono solamente le condizioni perché esso avvenga oppure futuro se si suppone che esso possa manifestarsi soltanto in un riferimento temporale successivo a quello attuale e in presenza di determinate condizioni.

Nell'analisi degli spostamenti se si definiscono tutti i segmenti sopra evidenziati che caratterizzano la domanda essa può essere definita generale, altrimenti, se ci si limita a studiarne solamente alcuni, si dice che l'analisi è settoriale, come nel caso in esame. Infatti per analisi settoriale si intende quella che interessa solamente un determinato gruppo di spostamenti e nello studio effettuato si sono considerati solo i modi che

utilizzano la sede stradale promiscua, escludendo così quelli effettuati con il trasporto collettivo su ferro il cui contributo ai fini della valutazione delle emissioni sulla rete della viabilità urbana è stato considerato irrilevante. Pertanto il primo obiettivo del progetto consiste nel simulare il carico veicolare di ogni tratto della rete stradale, risultato della presenza di mezzi privati e pubblici che vi transitano contemporaneamente. Inoltre in questo caso non verranno esplorati né il motivo né la categoria di utente che compie lo spostamento, giudicati elementi di scarso interesse ai fini del lavoro nonché risultati di una ricerca per cui non si dispongono sufficienti mezzi e informazioni.

Dato per scontato che non è opportuno modellizzare il comportamento di ogni singolo utente indicandone anche il luogo esatto di partenza e quello di arrivo, ne consegue che si procede suddividendo il territorio in zone, cioè si opera in modo tale da discretizzare gli elementi diffusi presenti con continuità sul territorio e i dati a essi associati aggregandoli in un numero di unità rappresentative molto più ridotto rispetto al numero degli utenti totali che compongono la domanda. Per analizzare quest'ultima, la prima operazione da compiere è perciò la suddivisione del territorio in zone OD, dove O sta per origine e D destinazione, che costituiscono le porzioni elementari del territorio dalle quali si suppone che abbiano origine e nelle quali si suppone che abbiano destinazione gli spostamenti.

Per la rappresentazione della domanda invece ci si serve di una tabella denominata matrice origine-destinazione, o matrice OD, contenete il numero degli spostamenti attuali o potenziali che si manifestano tra le varie zone del territorio, denominati flussi di domanda, la cui entità dipende dal sistema delle attività presenti sul territorio che generano/atraggono gli spostamenti di persone e merci. Ogni elemento od della matrice rappresenta il flusso relativo ad una coppia OD, cioè il numero di spostamenti che partono dalla zona origine e sono diretti alla zona destinazione, per cui la zona O d'origine corrisponde alla riga dell'elemento, e la zona D di destinazione corrisponde alla colonna dell'elemento. La somma degli elementi di una riga fornisce il totale degli spostamenti che hanno origine nella zona corrispondente a quella riga. Analogamente, la somma degli elementi di una colonna fornisce il totale degli spostamenti che hanno destinazione nella zona corrispondente. L'unità di misura degli spostamenti è solitamente un'unità di trasporto, cioè veicoli, persone, tonnellate di merce, riferita all'unità di tempo h che, di volta in volta, si ritiene opportuna: nel caso di una rete stradale come quello studiato si usano i veicoli/ora. Procedendo con le fasi della modellazione risulta efficace associare il numero

di spostamenti corrispondente a una coppia OD alle infrastrutture di trasporto modellizzate dal grafo che le collegano. Se questa operazione ha senso per gli spostamenti OD per i quali risulta $o \neq d$, denominati spostamenti interzonal, non è possibile per gli spostamenti intrazonali INZ, rappresentati dagli elementi posti sulla diagonale principale della matrice, per i quali risulta $o = d$. Infatti in questo caso dato che la zona origine coincide con la zona destinazione non esistono elementi del grafo ai quali possa essere assegnata la domanda intrazonale per cui nella pratica gli elementi posti sulla diagonale principale sono solitamente posti pari a zero. Questa convenzione porta a compiere un errore nella rappresentazione del fenomeno reale perché così facendo si sottodimensiona il risultato in termini di percorrenze veicolari che comporterà una sottostima delle emissioni totali.

Occupandoci ora della delimitazione delle zone essa condiziona la struttura della domanda stessa e mentre si cerca di definirle contemporaneamente si deve considerare il loro dimensionamento ottimale: è necessario definire il numero e quindi le dimensioni delle zone in funzione del livello di dettaglio dello studio, dell'errore che si ammette di compiere e delle risorse che si intende investire per la realizzazione dell'analisi; infatti, quanto maggiore è il numero delle zone OD, e quindi quanto minori sono le loro dimensioni, tanto maggiori saranno il livello di precisione dello studio e il numero di dati da acquisire, che spesso si misura con la quantità di risorse finanziarie da spendere. Schematicamente a ogni zona corrisponde un centroide, cioè un punto rappresentativo degli elementi di una zona: esso viene direttamente collegato ad un nodo opportuno del grafo mediante un arco connettore, o come nel caso in esame può coincidere con il nodo stesso per semplificare la rappresentazione.

Non esistono criteri unici, definiti e consolidati per eseguire l'operazione della zonizzazione in modo opportuno e congruo con le esigenze dello studio in atto. Solitamente ci si attiene ad alcune indicazioni che comprendono la destinazione del suolo e le caratteristiche dei residenti di ogni zona in modo tale che questi elementi siano il più possibile uniformi all'interno di ciascuna zona, oppure si seguono le linee di discontinuità fisica, adottate come confini di zona. Inoltre il numero e dimensioni delle zone deve risultare come compromesso tra la precisione e il dettaglio dell'analisi, la rappresentazione dei flussi intrazonali, i tempi di calcolo, la quantità dei dati da acquisire. A proposito del numero e delle dimensioni delle zone è importante ricordare che, data la struttura "quadrata" della rappresentazione dei flussi OD, attraverso una matrice che verrà descritta nel paragrafo successivo, se il numero delle zone è n , il numero delle relazioni tra di esse, dal quale

dipende la complessità dello studio, è n^2 . Come detto in precedenza gli spostamenti intrazonali vengono trascurati per cui l'entità del sottodimensionamento delle percorrenze dipende dalle dimensioni delle zone. Questo problema si aggiunge alle accortezze da tenere nella fase di zonizzazione, per cui è bene considerare che più piccole sono le dimensioni delle zone, minore è l'effetto dell'annullamento dei flussi intrazonali, ma maggiore diventa la complessità dell'analisi.

Si illustra di seguito brevemente il risultato dell'operazione di zonizzazione effettuata sulla città di Bucarest e di seguito si riportano i metodi usati solitamente per costruire una matrice OD: iniziando con qualche accenno a quelli classici normalmente usati si approfondirà il metodo effettivamente utilizzato nel caso in esame che viene implementato dal software impiegato.

2.2.1 Individuazione delle zone OD

Dopo le considerazioni fatte si evidenziano le particolarità riscontrate del caso di studio e a seguire il risultato dell'operazione. Si premette che lo studio delle caratteristiche del traffico è qui funzionale soltanto al monitoraggio dell'impatto emissivo di questo sulla qualità dell'aria urbana, per cui viene descritto un metodo di simulazione molto semplificato che non pretende di esser adatto per uno studio della pianificazione degli investimenti o per ottimizzare la circolazione, obiettivi più spesso propri dei classici studi del sistema. Le matrici O-D che si ottengono verranno costruite sulla base di conteggi del traffico perché non si ha conoscenza di quelle esistenti. Pertanto la zonizzazione dell'area urbana non si è servita della struttura di dette matrici e data la mancata conoscenza di ulteriori dati specifici di uso del suolo o di censimenti Istat, si è eseguita un'operazione sulla base di una semplice lettura aerea del territorio. La conoscenza "in remoto" di quest'ultimo è stata approfondita mediante software che mettesse a disposizione immagini e mappe della città, per cui la complessità reale è stata sicuramente sottovalutata in virtù dell'obiettivo finale di spiegare la presenza di flussi misurati sugli archi. Si riporta qui di seguito la rete da simulare con evidenziate in rosso le zone scelte, che rispettano il criterio di densità gradualmente decrescente dal centro alla periferia dell'area di studio, per effettuare un'assegnazione del traffico quanto più corretta all'interno delle aree centrali che si sono verificate essere le più trafficate.

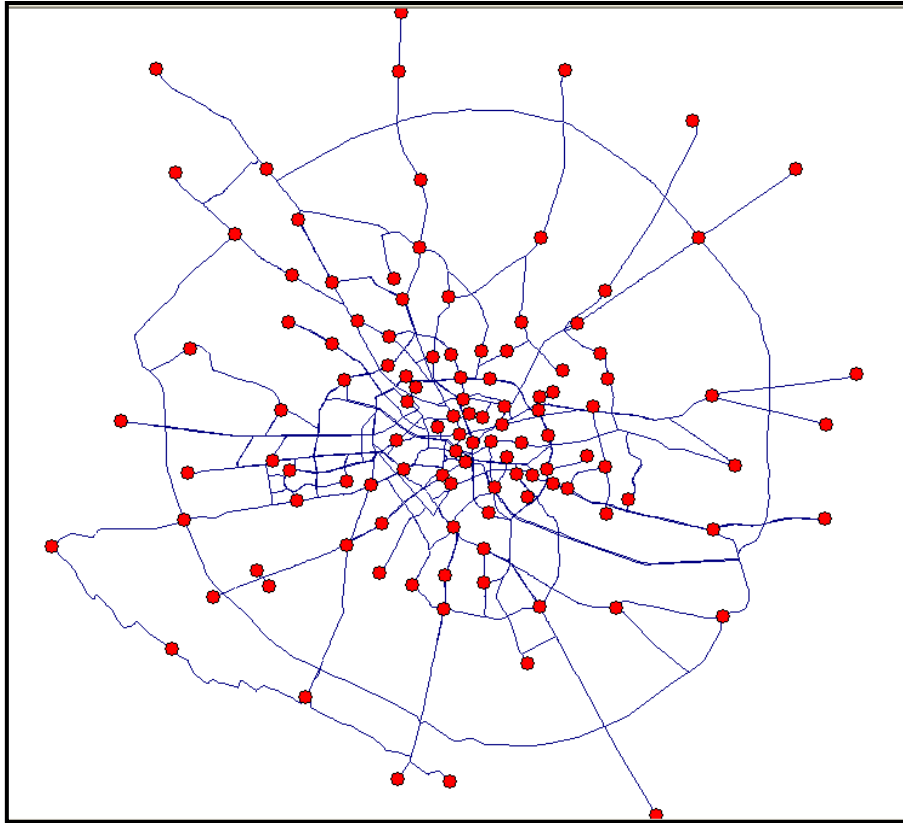


Figura 10. Distribuzione delle zone O/D sull'area di studio

Si è cercato di rispettare una distribuzione abbastanza omogenea e di definire una nuova zona ogni qual volta fosse presente una specifica tipologia edilizia che potesse corrispondere ad una specifica destinazione d'uso, come un quartiere residenziale individuabile dalla presenza di una griglia regolare di fitte strade locali o industriale dalla presenza di grossi fabbricati dall'aspetto inequivocabile o ancora commerciale e di servizio nel caso si individuino estese superfici adibite a parcheggio. Questi specifici ambienti urbani rappresentano dei significativi poli di attrazione e generazione di domanda, per cui è sembrato sensato procedere in questo modo nella lettura del territorio in esame, dati i limitati strumenti a disposizione, nella consapevolezza che la soluzione ottenuta non rifletta probabilmente la situazione reale in modo ottimale ma vi si avvicini il più possibile. Qui di seguito si riportano alcuni dettagli dell'area studiata caratterizzati dalla concentrazione di una specifica tipologia urbanistica: al loro interno si presume si svolgano varie attività omogenee, il cui potenziale di generazione e attrazione di traffico viene riconosciuto mediante l'individuazione di una zona OD in corrispondenza. La struttura definitiva della rete e la proposta di definizione delle zone effettuata in questo lavoro è stata validata e confermata dai due principali Enti locali rumeni che si stanno occupando di

coordinare il progetto, NEPA e RAR, i quali hanno confermato la buona aderenza di queste alla realtà rappresentata.

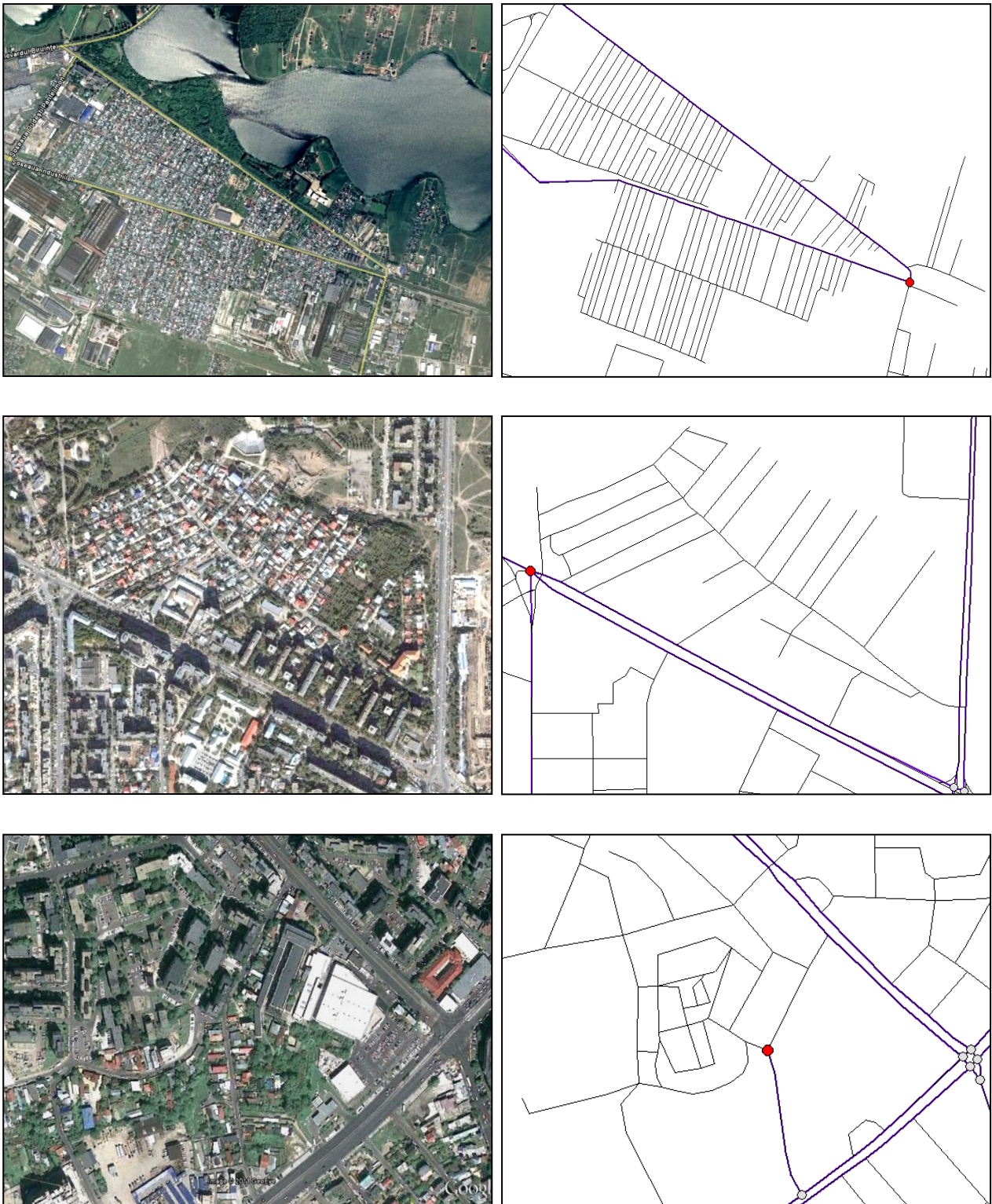


Figura 11. Tre esempi di corrispondenza tra il potenziale di attrazione-generazione di un'area e un elemento grafico della rete (centroide rosso) attraverso cui si ipotizza possano transitare tutti gli spostamenti generati-attratti dall'area evidenziata nell'immagine.

2.2.2 Costruzione delle matrici

Costruire una matrice OD, cioè quantificarne i suoi elementi, è un'operazione che si può compiere seguendo modalità differenti in funzione degli obiettivi dello studio, delle informazioni disponibili e delle risorse utilizzabili per la raccolta dei dati e per la loro elaborazione.

Il metodo concettualmente più semplice prevede di eseguire delle indagini disaggregate che consistono in interviste ad un campione di utenti per ottenere informazioni riguardanti le loro esigenze di spostamento. Tra tutte le risposte che si possono raccogliere deve essere presente almeno l'indicazione della zona di origine e di quella di destinazione di ogni spostamento. Questa tecnica è l'unica modalità di osservazione che permetta la costruzione di matrici OD aderenti alla realtà, perché consente l'identificazione diretta dei vari segmenti della domanda citati prima.

In alternativa si utilizza la tecnica della modellizzazione, in cui gli elementi della matrice sono definiti con una serie di equazioni che rappresentano le relazioni causa/effetto esistenti tra la domanda e il valore delle variabili esplicative indipendenti che ne rappresentano la causa, per esempio le caratteristiche socio-economiche degli abitanti di un territorio o le caratteristiche dei sistemi di trasporto presenti. Questo metodo è esclusivamente analitico e porta a determinare le matrici mediante delle pure elaborazioni matematiche ma si avvale anch'esso di indagini per effettuare la calibrazione dei parametri. I modelli di domanda sono però sempre delle rappresentazioni schematiche, semplificate e approssimate di una realtà molto complessa, quale il comportamento di scelta degli individui. Essi consentono di quantificare alcune relazioni esistenti fra le variabili rilevanti ma è poco lecito attendersi da essi una riproduzione completa e fedele della realtà in questione. Inoltre esiste un ampio spettro di modelli distinti che descrivono la stessa situazione reale, secondo diversi gradi di precisione e di complessità: al crescere di quest'ultima si richiede un maggiore impiego di risorse e di dati, tempo per la specificazione e la calibrazione, tempi di calcolo, che deve essere giustificato dall'importanza dell'applicazione per cui sono progettati. Pertanto si ritiene che queste due modalità, se impostate correttamente, risultino troppo onerose in termini di tempi, risorse e incompatibili con le finalità del progetto. La raccolta dei dati necessaria dovrebbe o prevedere l'esecuzione di apposite analisi della realtà da modellizzare, soluzione inaccessibile con i mezzi a disposizione per il progetto, o limitarsi all'acquisizione di dati già raccolti da altri soggetti, che purtroppo risultano non reperibili.

Una terza alternativa praticata per ottenere una matrice OD significativa è la tecnica dell'aggiornamento, che prevede di definire gli elementi della matrice attuale aggiornando una matrice già disponibile ma non più realistica; l'operazione avviene con appositi modelli probabilistici che realizzano un confronto tra i flussi di traffico derivanti dall'assegnazione della matrice obsoleta e i flussi di traffico reali rilevati in alcune sezioni della rete stradale conducendo indagini aggregate. Queste ultime raccolgono informazioni che descrivono indirettamente il comportamento degli utenti, rilevando le conseguenze di alcune loro azioni. Si può quindi eseguire un conteggio del traffico, che significa misurare il numero di veicoli o di utenti che transitano attraverso sezioni di misura poste in corrispondenza di alcuni tratti della rete, la cui scelta in termini di numero e distribuzione risulta un'operazione delicata frutto di ragionamenti di cui si parlerà in seguito. La tecnica del conteggio offre ovviamente un contenuto informativo molto più ridotto rispetto alle indagini disaggregate, ad esempio non permette di conoscere le zone di origine e destinazione dei veicoli rilevati. Tuttavia i rilievi aggregati presentano alcuni interessanti vantaggi operativi che riguardano il costo, molto contenuto e, in generale, notevolmente inferiore rispetto a quello da sostenere per eseguire le interviste, e le modalità di rilevamento, con possibilità di installare stazioni di misura automatica permettendo di organizzare indagini continue, sistematiche, che consentano la valutazione delle fluttuazioni della domanda in periodi differenti.

Questi sono i motivi principali che hanno portato per il caso in esame a far ricadere la scelta riguardante la tecnica di costruzione della matrice su un metodo che utilizza i conteggi di traffico: non essendo disponibile però una matrice obsoleta non è risultato possibile attuare la tecnica dell'aggiornamento appena illustrata. Pertanto si è proceduto con una fase di approfondimento in letteratura alla ricerca di soluzioni meno consuete ma che potessero risolvere il problema della stima della matrice O/D, che non sia considerata un dato di base del modello, quanto un dato da stimare, a partire dalla descrizione della rete di trasporto e da rilievi di flussi di traffico su alcune sezioni di particolare interesse.

2.2.2.1 Il modello di Willumsen per la sintesi della matrice OD

Si ricorda che i dati di input ai modelli di stima della matrice, come nel caso dell'aggiornamento, possono essere di due tipi ovvero i dati di traffico nelle sezioni e una matrice O/D di riferimento, che fornisce uno strumento per andare a selezionare, tra tutte le matrici O/D che soddisfano i conteggi di traffico, quella più vicina ad una stima iniziale,

basata ad esempio su un vecchio censimento. È possibile dare diversi gradi di attendibilità ai dati di traffico ed alla stima iniziale, in modo da determinare la matrice O/D che media tra questi opposti riferimenti. Per tener conto di queste due distinte fonti d'informazione una proposta per la stima della matrice O/D è derivata da (Willumsen, 1979), (Van Zuylen et al, 1980), (Yang et al., 1992), e viene denominato modello di Willumsen, dal nome del primo autore che lo ha proposto. Il modello di Willumsen è un metodo per la stima delle matrici O/D a partire dai flussi di traffico in una rete non congestionata. E' basato sul principio dell'entropia, postulando che, tra tutte le matrici O/D che soddisfano i conteggi di flussi di traffico (o che minimizzano l'errore su tali sezioni di censimento, qualora non esista nessuna soluzione che soddisfi tali limiti), quella ottimale massimizza anche l'entropia dei movimenti. La misura dell'entropia dei movimenti è ottenuta come produttrice di tutti gli elementi della matrice O/D, ovvero i movimenti tra ogni coppia di zone. La formulazione matematica di questo problema è la seguente:

$$\min_t \gamma \sum_{w \in W} t_w \left\{ \log \left(\frac{t_w}{t_w^*} \right) - 1 \right\} + (1 - \gamma) \sum_{a \in A} v_a \left\{ \log \left(\frac{v_a}{v_a^*} \right) - 1 \right\}$$

soggetto ai vincoli:

$$v_a = \sum_{w \in W} t_w p_{aw}$$

$$t_w \geq 0$$

Dove t_w rappresenta l'elemento stimato della matrice T relativo alla coppia w di zone O/D, t_w^* l'elemento della matrice T^* inizialmente disponibile, γ il coefficiente del livello di affidabilità della stima iniziale della matrice, w una coppia di zone O/D, W l'insieme di tutte le coppie di zone, a un arco della rete, A l'insieme di tutti gli archi, v_a il flusso di traffico calcolato relativo all'arco a, v_a^* il flusso misurato relativo all'arco a, p_{aw} la percentuale di viaggi della coppia w che utilizza l'arco a.

Questo metodo tiene conto del fatto che i conteggi di traffico possono essere visti come il risultato della combinazione di una matrice di viaggi e di uno schema di scelta del percorso. Pertanto essi forniscono informazioni dirette circa la somma di tutte le coppie O-D che utilizzano gli archi conteggiati. Il coefficiente γ può assumere valori compresi tra 0 e

1 e analizzando il caso particolare di assenza della matrice iniziale il suo valore sarà assunto pari a zero. Per arrivare a comprendere meglio la formulazione finale e la liceità di quanto detto, si deve procedere con ordine, iniziando a precisare che la fase più importante per la stima di un modello di domanda di trasporto dai conteggi di traffico è l'identificazione dei percorsi seguiti dagli spostamenti per ogni origine e destinazione. La variabile p_{aw} è utilizzata per definire la proporzione degli spostamenti relativi alla coppia w che transitano per l'arco a , e può essere ottenuta utilizzando varie tecniche di assegnazione dei viaggi che vanno da quella semplice "tutto o niente" a quelle più complicate dell'assegnazione di equilibrio. Robillard (1975) classificò formalmente questi metodi distinguendoli nei gruppi di assegnazione proporzionale e non proporzionale. Nel primo caso si assume che la proporzione di guidatori che scelgono ogni percorso sia indipendente dai livelli di flusso, come nel caso "tutto o niente" citato prima in cui p_{aw} può assumere i valori seguenti:

$$p_{aw} = \begin{cases} 1 & \text{se gli spostamenti interni alla coppia } w \text{ usano l'arco } a \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Nella pratica significa considerare delle reti non congestionate, come quelle a cui si applica il modello di Willumsen, per cui si considera che nel decidere quale percorso utilizzare per compiere il tragitto dalla zona di origine a quella di destinazione, gli utenti della rete scelgono quello a minor costo, intendendo con esso sia la lunghezza chilometrica che il tempo impiegato, che qualsiasi altra forma di quantificazione del costo di ogni singolo tratto stradale.

All'aumentare del flusso su un'arteria, aumenta però anche il tempo di percorrenza. Questa variazione risulta significativa solo qualora si raggiungano livelli di congestione della rete vicini alla saturazione. In tale caso non risulta più valida l'assunzione precedente ma si deve considerare la rete congestionata, in cui i problemi da affrontare crescono notevolmente, sia come complessità intrinseca che come onere computazionale. La gestione di questo tipo di fenomeno viene approcciata in letteratura adottando il principio dell'equilibrio di Wardrop, il quale postula che, per ogni coppia di zone O/D, i tempi di percorrenza delle strade effettivamente utilizzate sono uguali o inferiori a quelle non utilizzate. In altri termini, all'equilibrio nessun utente ha vantaggi a cambiare il percorso intrapreso. Vedendo il problema in questa prospettiva per assegnare i flussi di traffico ad una rete con condizioni di equilibrio si presuppone che la matrice O/D sia nota e in secondo luogo, dal punto di vista matematico, il problema viene risolto con un

procedimento iterativo, che porta ad assegnare una quota parte del flusso ed a ricalcolare il costo di ogni arco in funzione del flusso già assegnato.

Esistono inoltre anche approcci intermedi tra i due proposti, che consentono di alleviare i fenomeni di congestione, distribuendo su più percorsi alternativi il flusso tra ogni coppia di zone O/D. Essi ricadono sempre nel gruppo dei metodi proporzionali, ma qui p_{aw} può anche assumere valori intermedi tra 0 e 1 per riflettere un metodo di assegnazione puramente stocastico. Quest'approccio è anche giustificato dal fatto che utenti diversi possono avere una diversa scelta del percorso ottimo, sia perché utilizzano parametri diversi (costo economico, temporale, spaziale), sia perché, a parità di criterio, forniscono valutazioni differenti. Per lo studio del caso esame si segue quest'approccio intermedio, in quanto considerare una rete congestionata sarebbe stato infattibile a livello di onere computazionale e d'indisponibilità di una matrice iniziale per assegnare i flussi alla rete. Inoltre risulta forzato anche pensare che tutti gli utenti che si spostano da una zona origine a una zona destinazione seguano indistintamente lo stesso percorso a costo minimo, ma al contrario si pensa che possano seguire più percorsi alternativi, finché il costo medio di questi ultimi rapportato a quello del percorso a costo minimo non superi un certo rapporto fissato a priori.

Proseguendo con l'analisi delle variabili, quella che descrive il flusso v_a relativo all'arco a risulta dalla somma dei contributi di tutti gli spostamenti tra le zone che lo utilizzano. Matematicamente esso può essere espresso come segue:

$$v_a = \sum_w t_w p_{aw}$$

Date tutte le p_{aw} e tutti i conteggi di traffico osservati v_a^* ci saranno N^2 valori incogniti di t_w , con N numero delle zone, che saranno stimati da un insieme di L equazioni lineari simultanee dove L è il numero totale di conteggi di traffico.

In linea generale, per determinare univocamente la matrice di viaggi T sono necessari N^2 conteggi di traffico indipendenti e coerenti. Nella pratica, il numero di conteggi osservati è molto minore rispetto al numero delle incognite t_w . Perciò è impossibile determinare un'unica soluzione per il problema della stima della matrice. In genere ci sarà più di una matrice di viaggi che, quando caricata sulla rete, soddisferà i conteggi di traffico. Ci sono due approcci base per risolvere questo problema: i metodi strutturati e quelli non strutturati. Nel caso di metodi strutturati, l'analista vincola lo spazio disponibile per la stima

della matrice imponendo una particolare struttura che è normalmente fornita da un modello di viaggio esistente, ma nel nostro caso non è stata seguita questa strada in quanto non si disponeva di ulteriori informazioni. L'approccio non strutturato si basa, invece, su principi generali, come la massima verosimiglianza o la massimizzazione dell'entropia, per fornire il minimo delle informazioni addizionali necessarie per stimare una matrice.

Si cerca ora di introdurre in modo più approfondito l'approccio della massimizzazione dell'entropia che risulta fondamentale per comprendere più a fondo il funzionamento del modello.

Si consideri un sistema costituito da un numero elevato di elementi distinti. Una sua descrizione completa richiede una completa specificazione dei suoi micro stati, in quanto ogni stato è distinto e separabile. Concretamente essi corrispondono per esempio ad identificare ogni individuo che effettua un viaggio, con la sua origine, destinazione, modo, tempo dello spostamento. Tuttavia, per la maggior parte degli scopi pratici, può essere sufficiente lavorare su una base più aggregata definita specificazione *meso* stato; ad esempio un meso stato può semplicemente specificare il numero di viaggi tra ciascuna origine e ciascuna destinazione. In generale, vi possono essere numerosi e differenti micro stati che possono produrre lo stesso meso stato, come nel caso che due individui abitanti nella stessa zona si scambino la loro destinazione, generando due micro-stati differenti senza variazione del meso-stato. Vi è sempre anche un livello di aggregazione superiore, definito macro stato, relativo per esempio al numero totale di spostamenti su particolari archi o al numero totale di spostamenti generati e attratti da ciascuna zona. Solitamente è più facile osservare un fenomeno e disporre di informazioni a questo livello di aggregazione, per esempio la popolazione per zone. La base del metodo consiste nell'accettare che, a meno che non si disponga di informazioni contrarie, tutti i micro stati coerenti con le nostre informazioni circa i macro stati hanno uguale probabilità di verificarsi. Questa, di fatto, è una ipotesi abbastanza ragionevole se si considera che non si conoscono i meso e micro stati. Un buon modo per imporre la coerenza con ciò che si conosce sui macro stati consiste nell'esprimere le informazioni sotto forma di vincoli di uguaglianza in un programma matematico. Poiché si è interessati alla descrizione dei meso stati del sistema, si devono identificare quei meso stati che sono più probabili, dati i vincoli circa i macro stati.

Wilson (1970) mostra che il numero di micro stati $W\{T_{ij}\}$ associati al meso stato T_{ij} è dato da:

$$W\{T_{ij}\} = \frac{T!}{\prod_{ij} T_{ij}!}$$

Si tratta ora di identificare i valori di $\{T_{ij}\}$ che massimizzino questa funzione, perché si sta cercando il meso stato più probabile, ovvero quello che può essere generato in un numero maggiore di modi avendo supposto che tutti i micro stati siano ugualmente probabili. Si massimizza pertanto il $\log W$, il cui massimo coincide con quello della funzione precedente e si ottiene :

$$\log W = \log \frac{T!}{\prod_{ij} T_{ij}!} = \log T! - \sum_{ij} \log T_{ij}!$$

A cui si può applicare l'approssimazione breve di Stirling che consiste in :

$$\log X! = X \log X - X$$

Per ottenere un'espressione di $\log W$ più facile da ottimizzare, che quindi risulta:

$$\log W = \log T! - \sum_{ij} (T_{ij} \log T_{ij} - T_{ij})$$

Dove il termine $\log T!$ è una costante e quindi può essere omissa nel problema di ottimizzazione perché ininfluente. La restante parte dell'equazione è invece quella che generalmente viene definita funzione d'entropia e assume la forma:

$$\log W' = - \sum_{ij} (T_{ij} \log T_{ij} - T_{ij})$$

La massimizzazione del $\log W$, soggetta ai vincoli corrispondenti alla nostra conoscenza del macro stato, ovvero i conteggi di traffico nel nostro caso, consente di generare modelli per la stima dei più probabili meso stati che, sempre nel nostro caso, corrisponde alla stima della più probabile matrice T. Essa risulterà semplice, minimamente distorta e coerente con le informazioni disponibili espresse come vincoli di un problema di massimizzazione.

Questa idea fu utilizzata da Willumsen (1978) per derivare un modello per stimare le matrici dei viaggi dai conteggi di traffico. La disponibilità di una matrice vecchia, o semplicemente di una matrice stimata o acquisita da un altro studio potrebbe essere

sfruttato in modo vantaggioso, perché corrisponde ad avere informazioni addizionali circa la forma a priori dei meso stati ma non risulta indispensabile. La forma della funzione obiettivo disponendo di questa matrice t di partenza si modificherebbe nel modo seguente:

$$\max \quad \log W'' = - \sum_{ij} \left(T_{ij} \log \frac{T_{ij}}{t_{ij}} - T_{ij} + t_{ij} \right)$$

soggetta agli stessi vincoli espressi in precedenza. Questa funzione obiettivo è naturalmente convessa e il termine t_{ij} essendo una costante è presente solo per convenienza e può essere eliminato dalla derivazione del modello. Invertendo il segno e passando ad un problema di minimizzazione si ottiene la forma della prima parte del modello di Willumsen precedentemente illustrato, in cui le variabili sono state leggermente modificate nella simbologia per rispettare la scrittura prima descritta ma senza modifiche di significato :

$$\min_t \sum_{w \in W} t_w \left\{ \log \frac{t_w}{t_w^*} - 1 \right\}$$

Esso è espresso nella sola variabile t_w ma se s'introducono i conteggi del traffico si può scrivere un'analoga funzione d'entropia e introdurre la variabile v_a di flusso di traffico relativo all'arco a , dando pesi relativi differenti γ e $(1 - \gamma)$ ai dati della matrice O/D iniziale in relazione ai dati di misura dei flussi di traffico. Si ottiene perciò un'unica formulazione matematica finale nelle due variabili t_w e v_a che risulta:

$$\min_t \gamma \sum_{w \in W} t_w \left\{ \log \frac{t_w}{t_w^*} - 1 \right\} + (1 - \gamma) \sum_{a \in A^*} v_a \left\{ \log \frac{v_a}{v_a^*} - 1 \right\}$$

Esso è un problema di ottimizzazione vincolata che presenta una soluzione esprimibile in forma esplicita attraverso le seguenti equazioni:

$$\begin{cases} t_w = t_w^* \exp \left(- \sum_{a \in A^*} \lambda_a p_{aw} \right) \\ v_a = v_a^* \exp \left(\gamma \lambda_a / (1 - \gamma) \right) \end{cases}$$

Ove le incognite λ_a sono determinate dal sistema di equazioni prima chiamate vincoli:

$$\sum_{w \in W} p_{aw} t_w - v_a = 0 \quad , \quad a \in A^*$$

che risulta essere non lineare in λ_a e pertanto risolto con un procedimento iterativo.

2.3 INTERAZIONE DOMANDA-OFFERTA: LA FASE DI ASSEGNAZIONE

Avendo teoricamente a disposizione la stima della matrice O/D modale relativa al transito veicolare e avendo rilevato le caratteristiche fisiche e funzionali delle infrastrutture, per concludere l'analisi della domanda si dovrebbe procedere con un modello di scelta del percorso che fornisca la frazione dei veicoli che per spostarsi tra o e d utilizzano il percorso k, in quanto a livello concettuale si considera che l'utente disponga di più alternative di percorso tra il centroide di origine e il centroide di destinazione e tra tutte scelga quella a costo percepito inferiore. Solo se si riesce a riprodurre il comportamento dei singoli utenti nella scelta del percorso si può procedere con la fase di assegnazione che permette di giungere alla quantificazione dei flussi che impegnano i singoli archi della rete, realizzando il processo di interazione domanda/offerta. Secondo la teoria modellistica dato che per la scelta del percorso risulta molto rilevante l'effetto delle caratteristiche del sistema dei trasporti, si distinguono tra esse degli elementi invariabili, come la lunghezza degli archi, e altri dipendenti dalle condizioni di caricamento della rete, come la velocità di percorrenza degli archi o altre limitazioni al transito. Si può comprendere perciò come in condizioni di congestione l'assegnazione sia il risultato di un processo iterativo che consiste nella scelta preventiva dei percorsi minimi seguita da una prima assegnazione dei flussi, a fronte della quale si ricalcola il costo generalizzato di ogni arco in funzione del suo flusso che determina una nuova scelta del percorso, fino a giungere a una condizione di convergenza che rappresenta l'equilibrio.

Il modello utilizzato in questo caso però non tratta casi di reti congestionate, per cui il problema della scelta del percorso viene in questo caso affrontato preventivamente, sulla base del minimo costo di percorso generalizzato determinato dalla somma del costo generalizzato degli archi che lo compongono, inteso come tempo impiegato per lo spostamento dato dal rapporto tra la lunghezza dell'arco e la sua velocità di percorrenza. Per simulare la possibilità che una quota di utenti possa scegliere un percorso diverso da quello a costo minimo, perché non è realistico pensare che tutti gli individui si comportino nello stesso modo o dispongano delle stesse informazioni e per tenere in considerazione la possibilità che si manifestino situazioni di congestione, si sceglie di distribuire su più

percorsi alternativi il flusso tra ogni coppia di zone percentualmente secondo una funzione di distribuzione entro un limite di costo relativo.

Operativamente nel metodo di soluzione utilizzato il problema di ripartire ed assegnare i flussi di domanda sui vari archi viene risolto contestualmente al problema di stima della matrice O/D, secondo un procedimento iterativo interno all'esecuzione del modello che raggiunge la soluzione risolvendo alternativamente i problemi principale e secondario con un metodo di soluzione a due livelli.

Vista la potenzialità degli strumenti a disposizione è come se si fosse studiato il classico problema di modellizzazione di un sistema di trasporto in modo opposto, per cui si è rilevata direttamente l'entità dei flussi di traffico in alcune sezioni della rete, risultato dell'assegnazione e delle scelte di percorso effettuate dagli utenti, e da queste informazioni, mediante un processo iterativo che cerca di minimizzare l'errore sui dati misurati e contemporaneamente massimizzare il prodotto tra tutti gli elementi della matrice stimata, si è ottenuto il dato di base in termini di flussi di domanda che siano in grado di originare quel carico sugli archi rilevati della rete (la matrice O/D iniziale) e la stima dei flussi stessi su ogni tratto della rete. Pertanto, avendo illustrato i concetti generali su cui si basa il processo di assegnazione del traffico che si andrà ad analizzare, si può ritenere concluso l'approfondimento teorico preliminare e procedere con la simulazione del processo di caricamento della rete mediante l'acquisizione dei dati di conteggio veicolare e la loro elaborazione.

2.4 ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI

Il Registro Automobilistico Rumeno (RAR), in quanto Ente deputato dal governo alla gestione del settore automotive, ha coordinato e svolto una campagna di misura per acquisire i dati di traffico da implementare successivamente nel modello che carica la rete. I conteggi sono stati effettuati in corrispondenza di 250 sezioni stradali localizzate precisamente sulla rete, mediante l'utilizzo di centraline di misura che rilevano il passaggio del veicolo mediante un sensore "a spira doppia". Questo sistema consiste in un filo avvolto posto in un taglio sull'asfalto, collegato ad un sensore che lo alimenta elettricamente e che rileva variazioni di induttanza quando una massa metallica ci passa sopra: essendo le spire a lunghezza nota, in funzione del tempo che intercorre fra i due fronti d'onda di un veicolo che transita si ottiene la velocità, e di conseguenza la

lunghezza. In base alla lunghezza del veicolo si procede alla classificazione, che nel caso in esame ha portato alla distinzione in tre categorie di veicoli ossia auto, commerciali leggeri e commerciali pesanti. I conteggi risultanti sono stati elaborati dal RAR e forniti come valori medi stagionali aggregati per ogni stazione sugli intervalli orari nel corso della giornata distinti nelle tre categorie, come risulta nella tabella riportata che si riferisce alla stazione “Bvd. Bucurestii Noi 2”:

Bvd. Bucurestii Noi 2			
Hourly Interval	Traffic Flow (vehicles/h)		
	Passenger Cars	Light-Duty Vehicles	Heavy-Duty Vehicles
00 - 01	238	0	8
01 - 02	143	11	16
02 - 03	88	53	8
03 - 04	95	32	32
04 - 05	156	85	48
05 - 06	476	180	40
06 - 07	1177	222	120
07 - 08	2850	498	136
08 - 09	2394	509	208
09 - 10	2564	731	279
10 - 11	2598	795	152
11 - 12	2686	763	96
12 - 13	2516	869	96
13 - 14	2428	858	168
14 - 15	2380	837	96
15 - 16	2591	583	112
16 - 17	2863	636	136
17 - 18	2530	498	80
18 - 19	2163	360	72
19 - 20	1564	170	40
20 - 21	1217	201	16
21 - 22	809	117	32
22 - 23	578	74	32
23 - 24	394	11	16
TOTAL (vehicles/day)	37500	9090	2035

Tabella 8. Numero medio feriale di veicoli rilevato da una stazione di misura distinto per categoria di veicoli e intervallo orario nel corso della giornata.

I conteggi costituiranno l'ingresso per il modello che determina la matrice della domanda di trasporto, la quale nella realtà non si mantiene costante nel tempo, ma presenta variazioni anche notevoli tra le diverse frazioni di ore di una stessa giornata, tra i giorni della

settimana, tra i vari periodi dell'anno. Questa circostanza comporterebbe la costruzione di un numero eccessivamente elevato di matrici, per rappresentare il valore istantaneo della domanda, per esempio nell'arco di una giornata lavorativa. Tuttavia ai fini pratici di effettuare qualsiasi simulazione, la domanda pur essendo notevolmente variabile durante la giornata può essere ritenuta costante in un arco di tempo sufficientemente ridotto. Data la presenza di dati aggregati ad intervalli orari risulta stabilita la durata del più piccolo intervallo all'interno del quale si può ritenere costante la domanda, per cui tutta l'analisi successiva sarà riferita all'arco di tempo di un'ora. Si sono effettuate delle elaborazioni sui dati autunnali e si è calcolata la media quadratica tra tutte le stazioni per evidenziare quale fosse l'ora di punta, effettuata separatamente per le categorie e successivamente aggregata in veicoli equivalenti, secondo l'utilizzo dei seguenti pesi:

Class	Pass. cars	Light-duty	Heavy-duty
Weights	1	1.5	3.5

Tabella 9. Pesi per ottenere il conteggio in veicoli equivalenti

Come viene riportato nella figura l'andamento del traffico nell'area urbana in esame presenta il classico andamento a "M" con le due punte più marcate e distinte: il picco assoluto si presenta in corrispondenza dell'intervallo 9-10, per cui le analisi successive si faranno in riferimento ad esso.

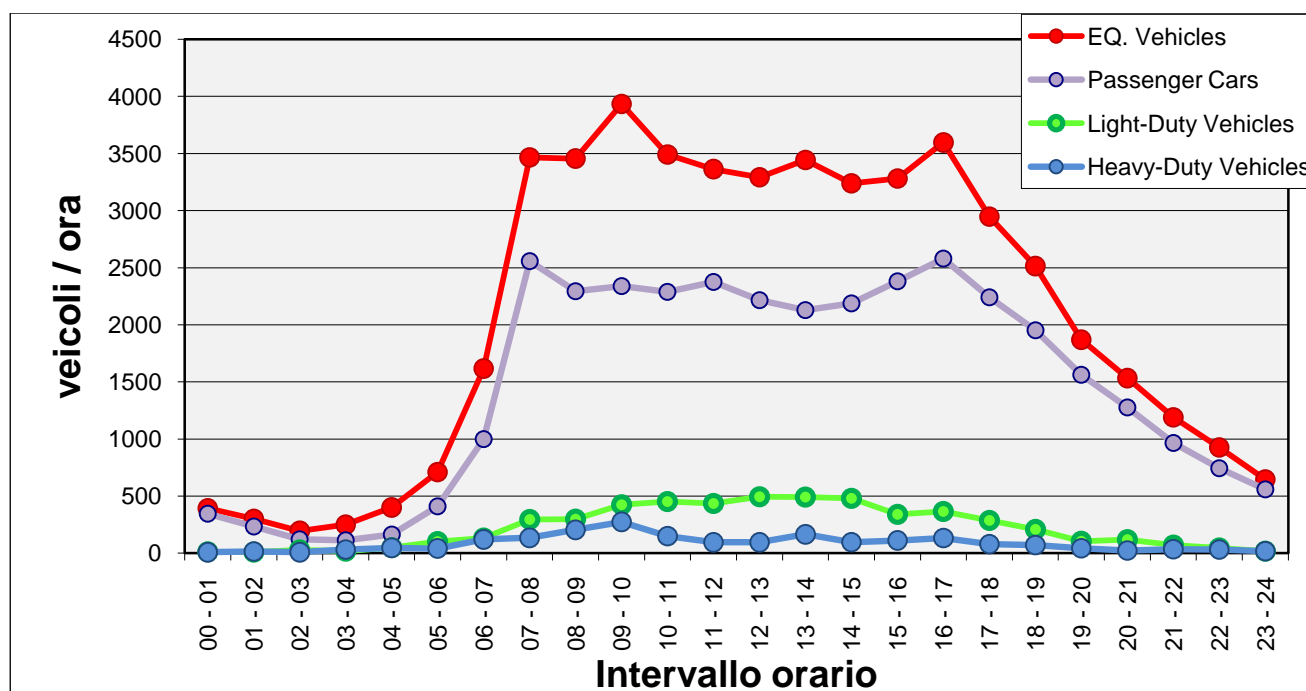


Grafico 4. Andamento giornaliero del traffico relativo alle singole categorie di veicoli distinte e in termini di veicoli equivalenti.

3 CARUSO: IMPLEMENTAZIONE DI UN MODELLO DI ASSEGNAZIONE

I dati di flusso di traffico come visto sono disponibili solo su un numero limitato di sezioni della rete stradale (circa il 25% del totale) mentre il flusso sulle restanti sezioni deve essere stimato, utilizzando un modello di traffico. Nel caso in esame il problema è stato risolto grazie al supporto del software CARUSO (“CAR Usage System Optimization”) che implementa il modello di Willumsen descritto in precedenza per effettuare la sintesi della matrice origine/destinazione (O/D) relativa a una rete trasportistica, unita a un modello di assegnazione dei flussi veicolari.

Il codice calcola i flussi e le velocità dei veicoli sui singoli archi, nonché i percorsi di minimo costo e i percorsi alternativi più probabili, a partire dalle misure sperimentali di traffico e dalla caratterizzazione della rete stradale fornita per gli archi in termini di lunghezza, velocità massima, senso di percorrenza, capacità, curva di deflusso e per i nodi in termini di individuazione delle zone O/D e degli incroci.

Il modello si basa sull'ipotesi di rete non congestionata la quale porta a dire che, nel decidere quale percorso utilizzare per compiere il tragitto dalla zona di origine a quella di destinazione, gli utenti della rete scelgono quello a minor costo, inteso in senso generalizzato come la disutilità legata ad un certo percorso, che dipende dalla sua lunghezza e dal tempo impiegato per percorrerlo in funzione della velocità teorica degli archi che lo compongono. Si trascura perciò il fatto che aumenti il tempo di percorrenza al crescere del flusso su un'arteria, ma si cerca di considerare il fenomeno di congestione distribuendo su più percorsi alternativi il flusso tra ogni coppia di zone O/D, finché il rapporto tra il costo di questi percorsi e quello del percorso ottimo non superi una certa soglia limite.

Il principio base per la stima della matrice O/D a partire dai flussi di traffico è quello dell'entropia, il quale postula che, tra tutte le matrici O/D che soddisfano i conteggi di flussi di traffico (o che minimizzano l'errore su tali sezioni di censimento, qualora non esista nessuna soluzione che soddisfi tali limiti), quella ottimale massimizza anche l'entropia dei movimenti. La misura di quest'ultima è ottenuta come produttrice di tutti gli elementi della matrice O/D, ovvero i movimenti tra ogni coppia di zone.

Si riporta di seguito una descrizione delle fasi che hanno accompagnato l'implementazione del modello sulla rete di Bucarest, divise in una fase preparatoria di scelta e considerazioni

sui parametri, nella presentazione dei risultati ottenuti e nelle operazioni di ottimizzazione condotte per migliorare la soluzione.

3.1 STIMA DEL CARICO VEICOLARE SULLA RETE DI BUCAREST

Avendo effettuato la caratterizzazione della rete, come descritto nel capitolo dell'analisi dell'offerta, prima di procedere con la simulazione del caso reale in esame si sono effettuate delle elaborazioni sui dati di flusso disponibile e sono state compiute delle scelte riguardanti l'impostazione di vari parametri di ottimizzazione coinvolti, la cui scelta dipende dalla sensibilità dell'analista.

Per quanto riguarda i dati si sono aggregati i conteggi orari relativi alle tre diverse categorie di veicoli conteggiati, ottenendo una sola classe di veicoli equivalenti per valutare il flusso complessivo dell'arco, secondo l'utilizzo dei seguenti pesi:

Autovetture	Commerciali leggeri	Commerciali pesanti
1	1.5	3.5

Tabella 10. Pesi per convertire i veicoli delle singole categorie in veicoli equivalenti

Successivamente è stata effettuata una selezione tra i dati che distinguesse tra una porzione da utilizzare per una prima stima del carico della rete e un'altra per poter effettuare la fase di validazione dei risultati. Le misure atte a questa seconda operazione sono state scelte casualmente sulla base di una distribuzione spaziale omogenea in un numero corrispondente al 10% del totale, ovvero 25 su 250 misure a disposizione. Si riporta qui di seguito una mappa con evidenziata la distribuzione delle postazioni cui le misure si riferiscono, in cui sono segnalate in rosso quelle a cui corrispondono i dati considerati per la fase di validazione.

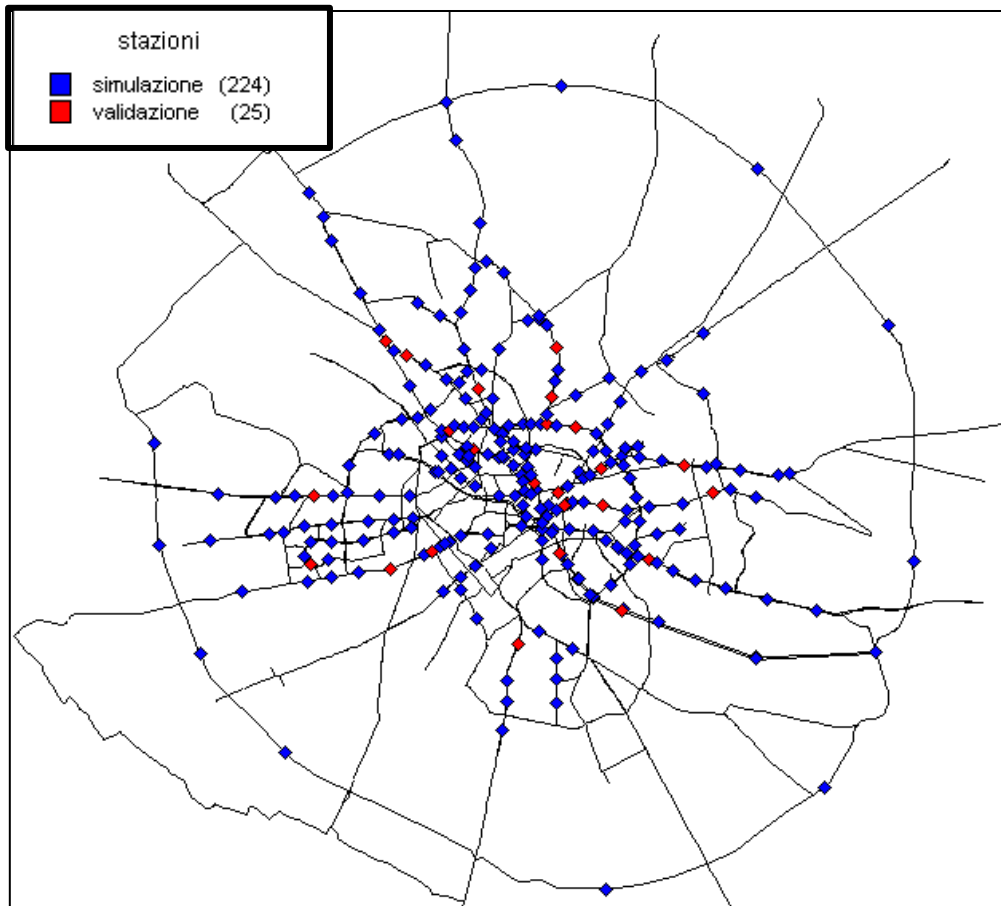


Figura 12. Distinzione tra i dati di stima e di validazione

Si è associato ogni conteggio al codice dell'arco corrispondente e in caso di archi bidirezionali si è scelto di ripartire equamente il dato nella componente di flusso diretto e inverso, non disponendo di altre informazioni relative alla reale distribuzione.

Le scelte sui parametri sono state condotte sulla base di un'analisi di sensitività effettuata sui risultati di varie simulazioni condotte su un caso test di dimensioni e complessità minori, riferito ad un'altra città europea già studiata per gli stessi scopi. Per ottimizzare l'esecuzione si sono valutati i risultati in termini di Minimo Errore Quadratico sui dati di traffico misurato, in modo da valutare quando la soluzione del modello aderisca maggiormente alla realtà osservata facendo variare il numero massimo di percorsi da considerare tra ogni coppia di zone e il rapporto tra il costo del percorso alternativo scelto e il costo del percorso ottimo. Il flusso totale tra due zone viene poi ripartito sui percorsi possibili che rispettino i criteri appena esposti mediante una formula che riflette un diverso principio di assegnazione. La formula utilizzata è di tipo polinomiale ed è possibile farne variare il coefficiente a seconda che si voglia effettuare un'assegnazione proporzionale ai costi dei percorsi (coefficiente = 1) o privilegiare maggiormente il fatto che la scelta da

parte degli utenti ricada sul percorso a costo minimo (coefficiente > 1) . Questo secondo caso riflette meglio le situazioni prive di congestione e di univocità della scelta da parte degli utenti e pertanto si è scelto di fissare il coefficiente ad un valore = 1 per introdurre l'aleatorietà del fenomeno che si verifica e la possibilità che si seguano realmente percorsi diversi riducendo o evitando la congestione del percorso a costo ottimo. Si sono quindi effettuate 30 simulazioni facendo variare il numero massimo di percorsi che collega una coppia di zone O/D da 1 a 6 e il massimo rapporto tra i costi tra 1.1 a 1.5. Per valutare la bontà di ciascuna simulazione ed effettuare un confronto relativo tra di esse, viene considerato come indice statistico complessivo l'errore medio quadratico valutato per misure di traffico, che viene di seguito riportato in forma tabellare e in forma grafica, dove si evidenzia in rosso il minimo valore ottenuto e la combinazione di parametri per cui si ottiene, che ha rappresentato la scelta definitiva per settare le simulazioni successive (numero di percorsi= 2, rapporto tra i costi= 1.1)

maxRapp\Npath	1	2	3	4	5	6
1.1	323.5196	272.1251	342.5076	349.1885	355.966	354.8924
1.2	323.5196	275.2316	346.7058	358.6177	332.0443	333.9017
1.3	323.5196	276.5495	348.7038	364.3002	342.9924	348.0123
1.4	323.5196	277.2058	350.3089	367.8928	350.2371	357.8523
1.5	323.5196	277.5776	351.6104	369.9045	355.4033	365.013

Tabella 11. Risultati in termini di errore quadratico medio sui dati misurati relativi a 30 simulazioni in corrispondenza di diversi valori di coppie dei parametri (numero percorsi; rapporto tra i costi)

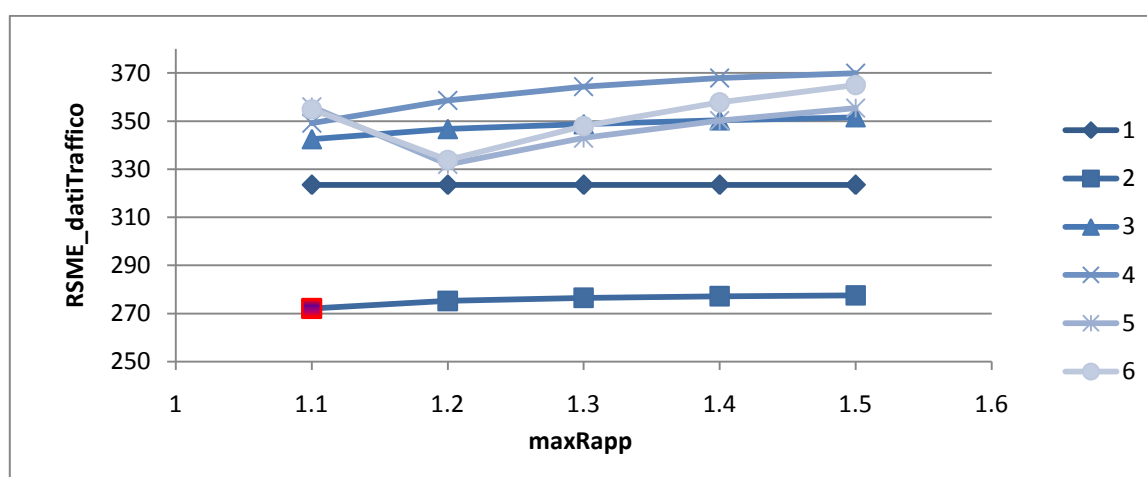


Grafico 5. Le sei serie di risultati relative ad un diverso valore di percorsi ammissibili tra due zone, rappresentate al variare del rapporto massimo tra il costo del percorso i-esimo e quello del percorso ottimo.

Si è ritenuto opportuno a questo punto procedere con una prima esecuzione del modello, per procedere successivamente ad una lettura critica dei risultati ottenuti. Sulla base di questi ultimi si potranno eseguire eventuali raffinamenti successivi per migliorare le prestazioni del modello soprattutto in corrispondenza delle sezioni più rappresentative.

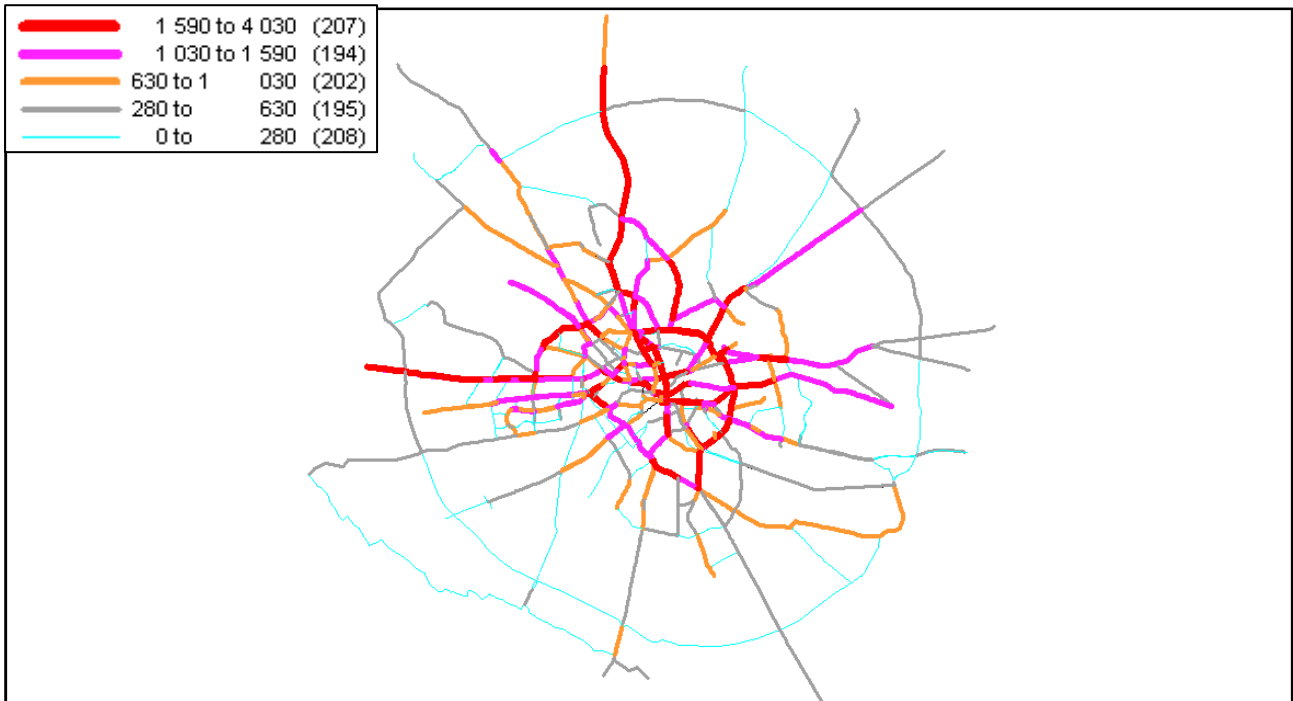


Figura 13. Risultato del modello di traffico in termini di veicoli/ora su ciascun arco

Come si può vedere dal flussogramma riportato, il modello mostra come i maggiori volumi di traffico siano concentrati nel centro dell'area e vadano progressivamente diminuendo verso l'esterno, con una marcata disomogeneità di caricamento tra le direttrici radiali. Come indice dell'incertezza della simulazione, valutato in corrispondenza delle sezioni di conteggio di traffico e paragonato con il flusso medio di traffico calcolato dal modello, si considera l'errore quadratico medio che risulta pari a 373.03 veh/h che in termini percentuali rispetto alla media delle misure corrisponde ad un errore del 34,35%. Questo valore potrebbe sembrare elevato ma bisogna considerare tutti i limiti del modello che si sta utilizzando e le approssimazioni finora considerate, per esempio riguardanti l'equa ripartizione dei conteggi tra i due sensi di marcia che probabilmente non riflette la vera distribuzione e sarà pertanto oggetto di un affinamento successivo.

Si è anche studiata la distribuzione e l'entità delle differenze tra i flussi misurati e calcolati sugli archi i cui conteggi sono stati utilizzati per la stima; i contributi più significativi si sono riscontrati nella zona centrale dell'area, pertanto si riporta uno zoom di quest'ultima con evidenziati in rosso gli archi più critici in termini di differenze assolute.

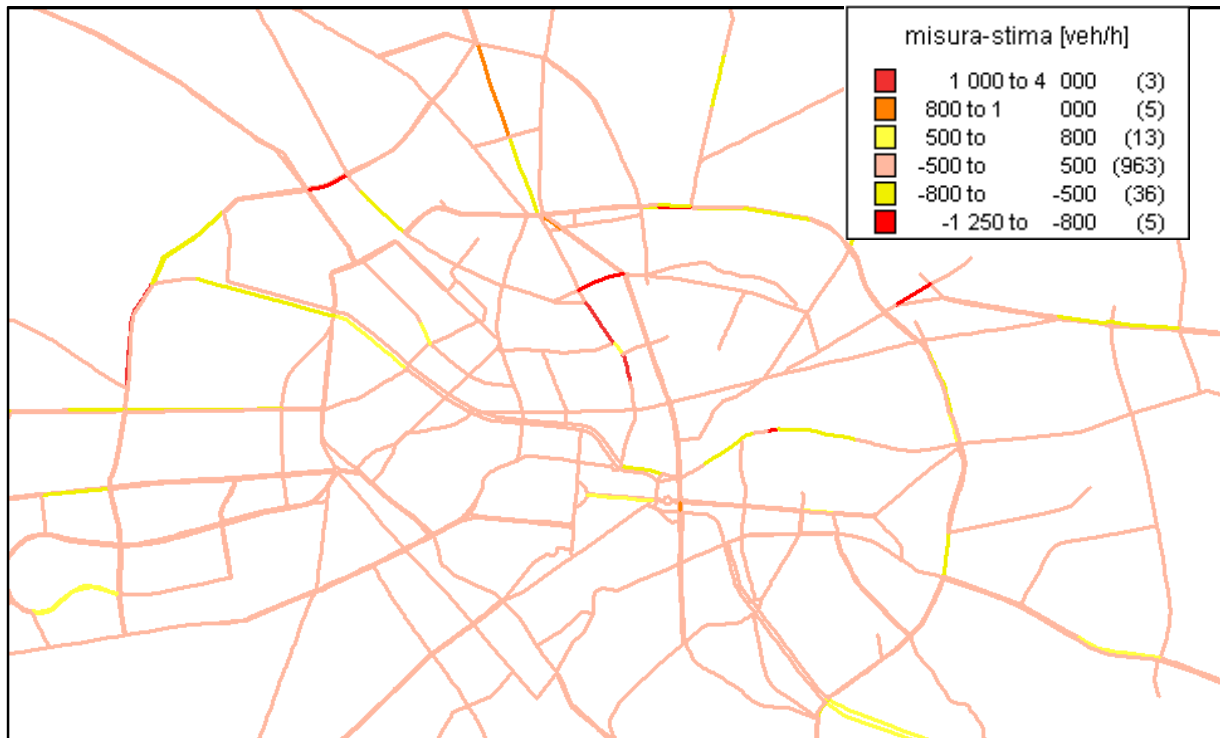


Figura 14. Mappa delle differenze tra i flussi calcolati e misurati

Per ridurre le differenze di flusso più significative si è pensato di agire sia sulla configurazione dell'offerta sia sui conteggi misurati in ingresso. Nel primo caso si è proceduto con la modifica , supportata e confermata dai tecnici di NEPA di alcuni valori di velocità relativi ad alcuni archi per ottimizzare localmente la soluzione. La velocità di percorrenza influenza direttamente il costo di quell'arco e cambiandone il valore si ottiene una distribuzione locale del traffico più coerente con la reale situazione di caricamento degli assi. Utilizzando poi l'informazione che il modello restituisce in termini ripartizione del flusso calcolato tra i due sensi di marcia opposti di un arco si è individuata per alcuni di essi una distribuzione più sensata da attribuire ai flussi misurati in ingresso al modello relativi allo stesso arco. Tra le uscite del modello si dispone di un file che per ogni arco riporta il flusso calcolato per ogni direzione di marcia:

nodol	nodoF	arco	FLUXdir	FLUXinv	Vo	Vdir/Vo	Vinv/Vo
39	40	20	117	1486	50	1	0.83
43	44	22	292	411	40	0.99	0.98
47	48	24	843	-1	50	0.78	0
49	52	26	437	357	40	0.98	0.98

Tabella 12. Flussi calcolati dal modello per ogni direzione di marcia di ciascun arco

Come si può notare in alcuni casi (archi 20 e 21) le direzioni di marcia vengono caricate in modo molto differente, per cui risulta più coerente con l'effettiva situazione di marcia rispettare in parte questa distribuzione anche per i dati misurati.

Inoltre visualizzando nuovamente le differenze tra flussi calcolati e misurati si può notare che in alcuni casi il valore del flusso su uno stesso arco viene sottostimato in una direzione e sovrastimato dall'altro. Analogamente al ragionamento fatto in precedenza si utilizza questa informazione per migliorare la ripartizione dei conteggi tra i due sensi di marcia per fornire dei dati in ingresso più corretti e migliorare la soluzione del modello.

PROG	MEASURED	COMPUTED	DIFFERENCE
64	576	647	-71
65	576	545	31

Tabella 13. Esempio di arco in cui il flusso tra i sensi opposti di marcia viene da un lato sottostimato e dall'altra sovrastimato

Dopo aver apportato le modifiche necessarie al file dei conteggi che il modello prende in ingresso è stata effettuata una seconda simulazione che ha mostrato un sensibile miglioramento dell'errore quadratico medio valutato sui dati misurati, il cui valore è ora sceso a 293.54 veh/h che in termini percentuali rispetto alla media dei conteggi corrisponde ad un errore del 27.32%, evidenza di un sostanziale miglioramento della soluzione. Non si è riscontrata una sostanziale variazione in termini di entità delle differenze assolute tra flussi misurati e calcolati, quindi è sembrato interessante valutare l'errore percentuale di misura sugli archi, ottenuto come

$$\frac{F_{mis} - F_{calc}}{F_{mis}}$$

per vedere se questo fosse più consistente in corrispondenza di volumi di traffico elevati o contenuti.

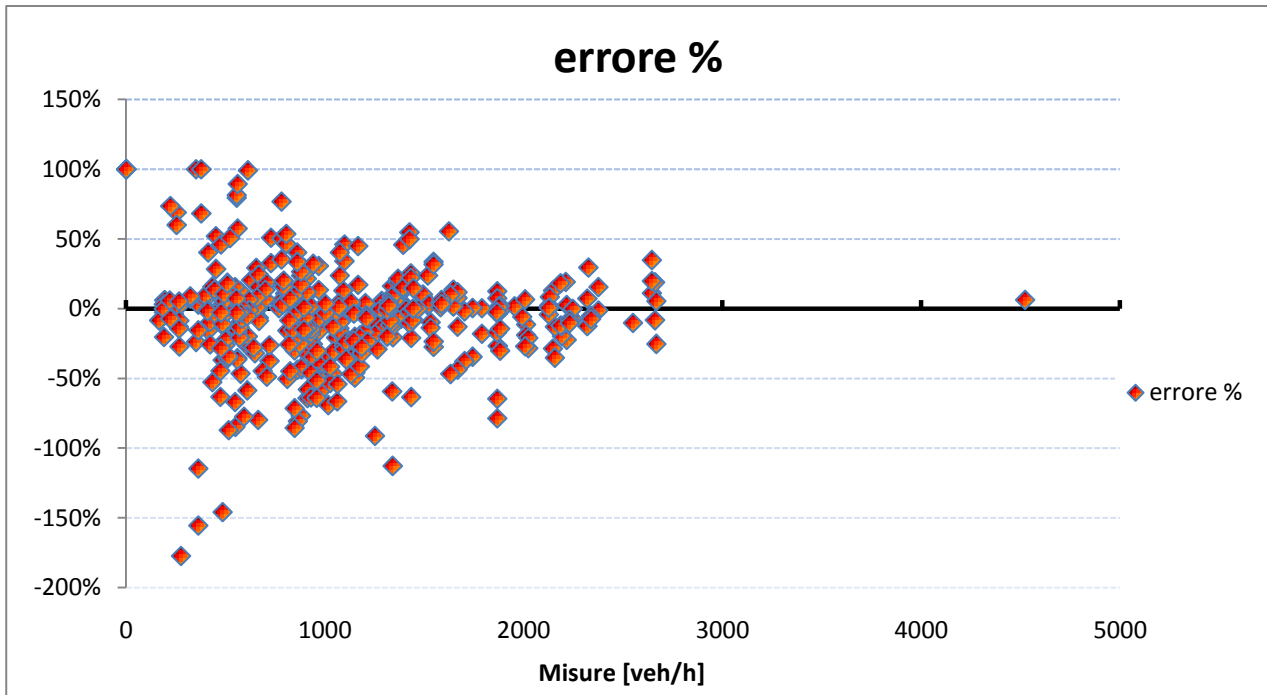


Grafico 6. Distribuzione dell'errore di stima sui dati misurati in funzione dell'entità del volume di traffico

Dalla distribuzione si possono ricavare delle informazioni interessanti tra cui la prima riguarda la forma della “nuvola di punti” assimilabile ad una campana sdraiata: essa mostra una dispersione maggiore in corrispondenza di bassi valori di flusso, mentre per alti valori l'errore risulta molto più contenuto. Questa proprietà della soluzione risulta apprezzabile soprattutto in funzione degli scopi del progetto, perché per le emissioni che successivamente verranno calcolate risulteranno più aderenti a quelle reali soprattutto laddove il volume di traffico misurato è più consistente. In secondo luogo si può notare la simmetria della distribuzione degli errori rispetto all'asse delle ascisse: nonostante il modello compia degli errori di stima essi complessivamente risultano ininfluenti in termini di volume di traffico circolante complessivo, dato che risulta sottostimare il carico della rete in corrispondenza di alcuni archi (errori % > 0) e sovrastimarlo in altri (errori % < 0). Pertanto, sempre ragionando nei termini dell'obiettivo del lavoro, si può definire soddisfacente il risultato ottenuto.

Si sono a questo punto valutate le percorrenze complessive sull'area di studio, per avere un dato sintetico che rappresenti il volume di traffico globale circolante nell'ora di punta feriale, moltiplicando i flussi calcolati sui vari archi per la lunghezza di ciascuno di essi.

$$Percorrenze_{9-10} [veh \times km] = \sum_{archi} flusso_i \left[\frac{veh}{h} \right] \times lung_h_i [km]$$

Numericamente si è ottenuto un valore di 681702 [veh*km].

Si potrebbero effettuare molte altre analisi riguardanti i risultati restituiti dal modello, e sulla base di questi apportare anche delle modifiche strutturali alla rete laddove sembrerebbe più sensato affinare la sua descrizione. In vista però dell'obiettivo dello studio e sulla base della confidenza di cui si dispone nei confronti dei dati in ingresso si ritiene di aver raggiunto un compromesso soddisfacente da sottoporre in ultima analisi al test di validazione.

3.2 AFFIDABILITÀ DELLA STIMA

Molti autori si sono posti il problema dell'affidabilità della stima della matrice O/D, ottenute con metodi di sintesi, a partire dai conteggi di traffico. Una prima considerazione che dev'essere fatta è che esistono più soluzioni, cui corrispondono gli stessi flussi di traffico sulle arterie stradali. Ciò implica che, in generale, non è possibile arrivare ad una stima univoca del carico reale sulla rete e della matrice O/D, partendo solo dai dati di traffico. Ciò premesso, è possibile comunque proporre alcuni metodi che possono essere di aiuto nel valutare se il particolare problema che si sta esaminando consenta o meno una stima attendibile della situazione reale. Inizialmente si effettuerà la validazione della soluzione confrontando i dati finora non utilizzati con i risultati forniti dal modello in corrispondenza dei medesimi archi. In secondo luogo a valle del calcolo delle emissioni della rete verrà confrontato il risultato ottenuto con il valore noto dei consumi di carburante.

3.2.1 Validazione dei risultati

Come anticipato in precedenza nel processo di stima del carico veicolare non sono stati considerati tutte le misure di flusso disponibili ma una quota parte pari al 10% scelta su base casuale è stata tralasciata per effettuare successivamente grazie ad essa una prova di validazione del risultato del modello, ovvero la verifica della capacità di quest'ultimo di riprodurre la realtà con i dati disponibili. Il risultato dell'assegnazione fornisce dati di flusso calcolato per ogni arco della rete in ogni senso di marcia ed è stato calcolato l'errore quadratico medio delle differenze tra essi e i valori misurati. Tale valore è stato confrontato poi con l'errore quadratico medio fornito dal modello in base alla minimizzazione complessiva degli errori di stima compiuti rispetto a tutte le altre misure disponibili. Esso, abbreviato con l'acronimo RSME che sta per Root Square Mean Error, è una misura statistica della grandezza di una quantità variabile, in questo caso le differenze tra i dati

calcolati e misurati che possono essere sia positive che negative. Si riporta uno schema che illustra limitatamente ai tre archi migliori e peggiori i passaggi effettuati per compiere l'elaborazione appena esposta:

Risultato Stima Modello			Dati Validazione		Errore	Errore ²
arco	Flusso DIR	Flusso INV	Misura DIR	Misura INV		
5	824	-1	530	-1	294	86436
38	1777	-1	1811	-1	-34	1156
38	-1	1777	-1	1839	-62	3844
121	824	-1	409	-1	415	172225
152	586	-1	1354	-1	-768	589824
152	-1	586	-1	1562	-976	952576
153	709	-1	1354	-1	-645	416025
153	-1	709	-1	1562	-853	727609
327	478	-1	457	-1	21	441
327	-1	478	-1	354	124	15376
344	1049	-1	1595	-1	-546	298116
344	-1	1049	-1	1221	-172	29584
682	2437	-1	2393	-1	44	1936
762	2437	-1	2525	-1	-88	7744
825	1411	-1	1660	-1	-249	62001
825	-1	1411	-1	1324	87	7569
858	223	-1	457	-1	-234	54756
858	-1	223	-1	354	-131	17161
864	1882	-1	1401	-1	481	231361
864	-1	1882	-1	1577	305	93025
873	367	-1	686	-1	-319	101761
887	2668	-1	3296	-1	-628	394384
888	2604	-1	2543	-1	61	3721
893	1443	-1	1396	-1	47	2209
895	1147	-1	1194	-1	-47	2209
902	1076	-1	943	-1	133	17689
902	-1	1076	-1	762	314	98596
904	642	-1	268	-1	374	139876
904	-1	642	-1	301	341	116281
906	267	-1	268	-1	-1	1
906	-1	267	-1	301	-34	1156
908	517	-1	697	-1	-180	32400
910	517	-1	1007	-1	-490	240100
924	2232	-1	2579	-1	-347	120409
926	2232	-1	2393	-1	-161	25921
934	1064	-1	664	-1	400	160000
936	572	-1	622	-1	-50	2500

Tabella 14. Confronto tra i dati stimati dal modello e le misure effettuate per la validazione

Dopo aver calcolato la radice della media degli errori al quadrato relativi alle 25 stazioni si è confrontato il risultato ottenuto con la corrispondente statistica della simulazione relativa alla differenza tra il risultato della stima e i dati iniziali nelle sezioni corrispondenti, ovvero la bontà del modello nella riproduzione dei dati iniziali. Si è confrontato sia il valore in termini assoluti che il valore in termini percentuali rispetto alla media delle misure mantenute. Pertanto risulta:

RSME_stima	RSME_validazione
293.5363	375.422
27.3 %	30.5%

Tabella 15. Confronto tra il risultato del modello e il risultato della validazione

La differenza contenuta tra gli errori viene presa come conferma della buona capacità del modello di riprodurre i valori misurati, pertanto la stima ottenuta viene considerata una base affidabile per il successivo calcolo delle emissioni.

4 LA STIMA DELLE EMISSIONI DA TRAFFICO VEICOLARE

Si tratta ora di studiare in modo sufficientemente affidabile la reale correlazione tra le sorgenti mobili analizzate e gli inquinanti rilevabili nell'aria, andando a stimare con maggior precisione possibile il contributo relativo attribuibile al traffico veicolare.

La direttiva madre europea 96/61/CE relativa alla prevenzione e alla riduzione dell'inquinamento indica tre attività basilari per impostare un Piano di risanamento dell'aria: l'esecuzione di rilevamenti della qualità dell'aria, un programma di modellistica diffusionale e l'inventario delle sorgenti di emissione. Per realizzare quest'ultimo le emissioni possono essere direttamente conteggiate come nel caso di grandi impianti per alcune categorie di inquinanti, o più in generale stimate, soprattutto per quanto riguarda le emissioni diffuse o alcune sostanze per cui risulta difficoltoso il processo di misura. I risultati devono essere poi divisi per attività, secondo la classificazione europea per macrosettori, combustibile e comune o provincia di riferimento. Nel caso in esame, come già accennato, ci si sta focalizzando sulla valutazione del contributo emissivo derivante dal settore del traffico urbano relativo all'area metropolitana di Bucarest. Trattandosi di emissioni diffuse esse vengono stimate tramite dati statistici, ovvero si valuta che l'emissione possa esser valutata come:

$$Emissione = A \times F.E.$$

Il fattore A rappresenta un indicatore di attività, che per il traffico veicolare può essere rappresentato dal consumo di combustibile o dalla percorrenza totale dei veicoli, mentre F.E. sta per "fattore di emissione" ovvero un coefficiente che quantifica l'inquinante emesso per unità di attività della sorgente.

Nel caso di studio ci si è occupati di quantificare sia le emissioni da traffico lineare per le principali arterie stradali, considerando come indicatore di attività i risultati in termini di percorrenze forniti dal modello di traffico descritto nel capitolo precedente, sia quelle da traffico diffuso studiando l'effetto aggregato della viabilità minore all'interno di aree a densità viaria omogenea.

Per quanto riguarda i fattori di emissione utilizzati si è fatto riferimento alla metodologia Corinair Copert IV definita dall'Unione Europea che ha stabilito valori differenti dei F.E. in funzione della velocità media relativi alle categorie Copert di veicoli distinti sulla base della cilindrata, del combustibile e della tecnologia implementata. Il Centro comune di ricerca

della Commissione Europea ha coordinato lo sviluppo del software Copert IV che implementa la metodologia ai fini di fornire uno strumento liberamente fruibile per chi si occupa di stimare le emissioni prodotte dagli scarichi dei veicoli stradali per la compilazione degli inventari nazionali su base annua e che possa essere al servizio della ricerca scientifica o delle applicazioni accademiche.

Gli inquinanti trattati comprendono tutti i contributi più rilevanti delle emissioni da trasporto su strada: i precursori dell'ozono (CO, NO_x, COVNM, questi ultimi distinti in 68 sottoclassi), i gas serra (CO₂, CH₄, N₂O), le sostanze acidificanti (NH₃, SO₂), il particolato (PM) distinto a seconda delle diverse dimensioni delle particelle, le specie cancerogene (IPA e POP), le sostanze tossiche (diossine e furani) e metalli pesanti. Le emissioni stimate sono distinte in tre fonti a seconda che siano prodotte durante il funzionamento del motore (emissioni a caldo), che si verifichino durante l'avviamento del motore (emissioni a freddo) o in termini di COVNM (emissioni evaporative dal carburante).

La produzione delle sostanze viene associata alle diverse categorie di veicoli distinti inizialmente in autovetture, veicoli commerciali leggeri, veicoli pesanti, ciclomotori e motocicli. Un'ulteriore classificazione interna a ciascuna classe appena citata viene effettuata sulla base del tipo di combustibile, del processo di combustione e della cilindrata del motore e a questo livello sono associati diversi codici snap, come viene riportato nell'esempio riferito alla categoria delle autovetture.

SNAP-like code	Activity
07 01	PASSENGER CARS
07 01 01	Gasoline <1.4 l
07 01 02	Gasoline 1.4 – 2.0 l
07 01 03	Gasoline >2.0 l
07 01 04	Diesel <2.0 l
07 01 05	Diesel >2.0 l
07 01 06	LPG
07 01 07	Two Stroke Gasoline
07 01 08	Hybrids

Tabella 16. Codici SNAP associati al settore delle autovetture

Poi si effettua una distinzione sulla base della tecnologia implementata, perché in funzione di questa cambieranno le caratteristiche dei motori, il combustibile utilizzato e i dispositivi di post-trattamento. Essa si riferisce alla classificazione ufficiale UN-ECE che riflette i successivi step tecnologici o legislativi che si sono verificati in Europa negli ultimi 40 anni.

Legislation
PRE ECE
ECE 15/00-01
ECE 15/02
ECE 15/03
ECE 15/04
Improved Conventional
Open Loop
Euro 1 - 91/441/EEC
Euro 2 - 94/12/EC
Euro 3 - 98/69/EC Stage 2000
Euro 4 - 98/69/EC Stage 2005
Euro 5 – EC 715/2007
Euro 6 – EC 715/2007

Tabella 17. Classificazione UN-ECE per i veicoli che riflette gli step della legislazione correlata

Le informazioni che devono essere ora raccolte riguardano l'effettivo utilizzo dei veicoli, ad esempio la percorrenza annuale media di ciascuna categoria. Viene successivamente considerato anche il regime di guida tenuto dal singolo veicolo in funzione del tipo di strada su cui transita, per cui si identifica il tipo di via scegliendo tra le categorie urbana, rurale e autostradale: esso influenzerà la stima dei microinquinanti e dei macroinquinanti per le emissioni a freddo. Per la valutazione delle emissioni evaporative si dovrebbero raccogliere anche informazioni riguardanti la capacità dei serbatoi dei veicoli e i sistemi di iniezioni presenti. Tutte questi dati verranno elaborati dal software e associati ai fattori di emissione correlati in termini di coefficienti moltiplicativi.

La procedura seguita è il risultato di un continua revisione metodologica del sistema iniziale implementato per realizzare l'inventario delle emissioni CORINAIR del 1985, che nella sua versione più recente del 2007 è stata incorporata nello strumento software COPERT4. Essa nel corso degli anni è stata completata con nuovi temi inizialmente non trattati, contiene la correzione di alcuni valori secondo i risultati delle ricerche più recenti e include nuovi parametri in riferimento alle nuove tecnologie utilizzate o alle nuove

sostanze annoverate tra gli inquinanti. In particolare si cita il contributo fornito dal progetto Artemis (2006) coordinato dalla Commissione Europea che si è occupato della valutazione dell'inventario e dello studio dell'affidabilità dei modelli di emissione per il settore dei trasporti, sviluppando un nuovo database di fattori di emissione per i gas inquinanti ad esso correlati. I risultati di questo studio in termini di cicli guida di omologazione e reali elaborati sono stati presi come riferimento per l'implementazione del software Trefic, di cui ci si è serviti nel caso in esame per il calcolo della stima delle emissioni da traffico. L'uso di uno strumento software per calcolare le emissioni dei trasporti su strada permette di disporre di una procedura trasparente e standardizzata, che sia coerente e fornisca risultati comparabili in termini di tempo, spazio ed efficacia degli interventi, in conformità con le disposizioni delle Convenzioni e dei Protocolli internazionali formulati nella Legislazione UE.

Nel presente elaborato ci si è avvalsi di tale strumento per effettuare inizialmente la stima delle emissioni reali della rete nell'ora di punta in un giorno medio feriale autunnale, in conformità alle percorrenze precedentemente calcolate in riferimento alle medesime condizioni. In seguito verranno elaborati degli scenari di possibile evoluzione della realtà urbana esaminata in relazione a diverse politiche o interventi da implementare: essi avranno riscontri differenti sul panorama emissivo la cui entità verrà valutata e confrontata preventivamente grazie ai risultati forniti dal software.

4.1 LE EMISSIONI VEICOLARI A BUCAREST NEL 2006

Per quantificare le emissioni ci si è serviti del software TREFIC, il cui acronimo sta per "TRaffic Emission Factor Improved Calculation" che calcola le emissioni inquinanti dei veicoli secondo la metodologia ufficiale europea COPERT 4. Disponendo della classificazione del parco circolante in termini di età, cilindrata, tipo di alimentazione, il codice utilizza i flussi e le velocità dei veicoli, eventualmente calcolati con un modello di traffico come è accaduto in questo caso attraverso i risultati forniti dal software CARUSO, per ricavare la quantità di ciascuna categoria d'inquinante emessa da ogni arco stradale.

Procedendo con una spiegazione più dettagliata delle operazioni compiute si è realizzato un file relativo al grafo della rete in cui ad ogni arco fosse associata la sua lunghezza, la velocità media di percorrenza calcolata dal modello di traffico, la categoria di strada a cui appartiene, lo stato di qualità del suo strato superficiale in quanto influenza il risollevarimento delle polveri, la pendenza e infine i dati di flusso veicolare stimati in

precedenza ripartiti però nelle quattro macrocategorie motocicli, autoveicoli, commerciali leggeri e commerciali pesanti sulla base di una percentuale che incrocia i pesi utilizzati per ottenere i veicoli equivalenti a partire dai conteggi effettuati e le informazioni derivate dal parco circolante. In questo modo è stato possibile estrapolare delle informazioni riguardo alla percentuale di motocicli circolanti, non considerati nel modello di traffico data l'assenza dei conteggi relativi, il cui contributo è stato aggiunto come un'extra quota di flusso sulla base della loro rilevanza all'interno del Parco.

ID_arco	FLUSSO traffico	Flux moto	Flux auto	Flux com_leg	Flux com_pes
xx	Tot	0.6% Tot	80.5% Tot	15.1% Tot	4.4% Tot

Tabella 18. Percentuali di ripartizione del flusso di traffico nelle varie categorie veicolari

Per quanto riguarda il parco veicolare circolante rumeno, esso è stato fornito dal R.A.R. relativamente all'anno 2009. Si presenta sottoforma di tabella in cui nel primo campo è contenuto un codice associato alla sottoclasse riferita ad una specifica cilindrata per ciascuna categoria UN-ECE per ciascun tipo di veicolo mentre nei campi successivi è riportato il dato di percorrenza in veicoli x km associato ad una specifica tipologia di strada (urbana, rurale, autostrada) anche in termini di percentuale rispetto alla percorrenza totale dell'intera classe di veicoli su quel tipo di strada.

code	activity	UN-ECE	urban (veh*km)	% car_urb	rural (veh*km)	% car_rur	highway (veh*km)	% car_hig
9	gasol<1400cc	EURO 2	682009965	6.54	238162210	4.31	162383325	4.13
10	gasol<1400cc	EURO 3	474296960	4.55	178833280	3.24	124405760	3.17
11	gasol<1400cc	EURO 4	1856221920	17.8	828670500	15	629789580	16.03
12	gasol<1400cc	EURO 5	25256880	0.24	5357520	0.1	7653600	0.19

Tabella 19. Estratto delle informazioni riguardanti il settore delle auto nel file del parco circolante

Si sono quindi importate nel software di calcolo tutte le informazioni finora raccolte per procedere con una prima simulazione della produzione di emissioni veicolari. Prima di lanciare l'esecuzione del codice si è dovuto stabilire il valore di alcuni parametri in ingresso, mediante l'utilizzo dell'interfaccia utente sotto riportata che ne ha permesso una comoda impostazione.

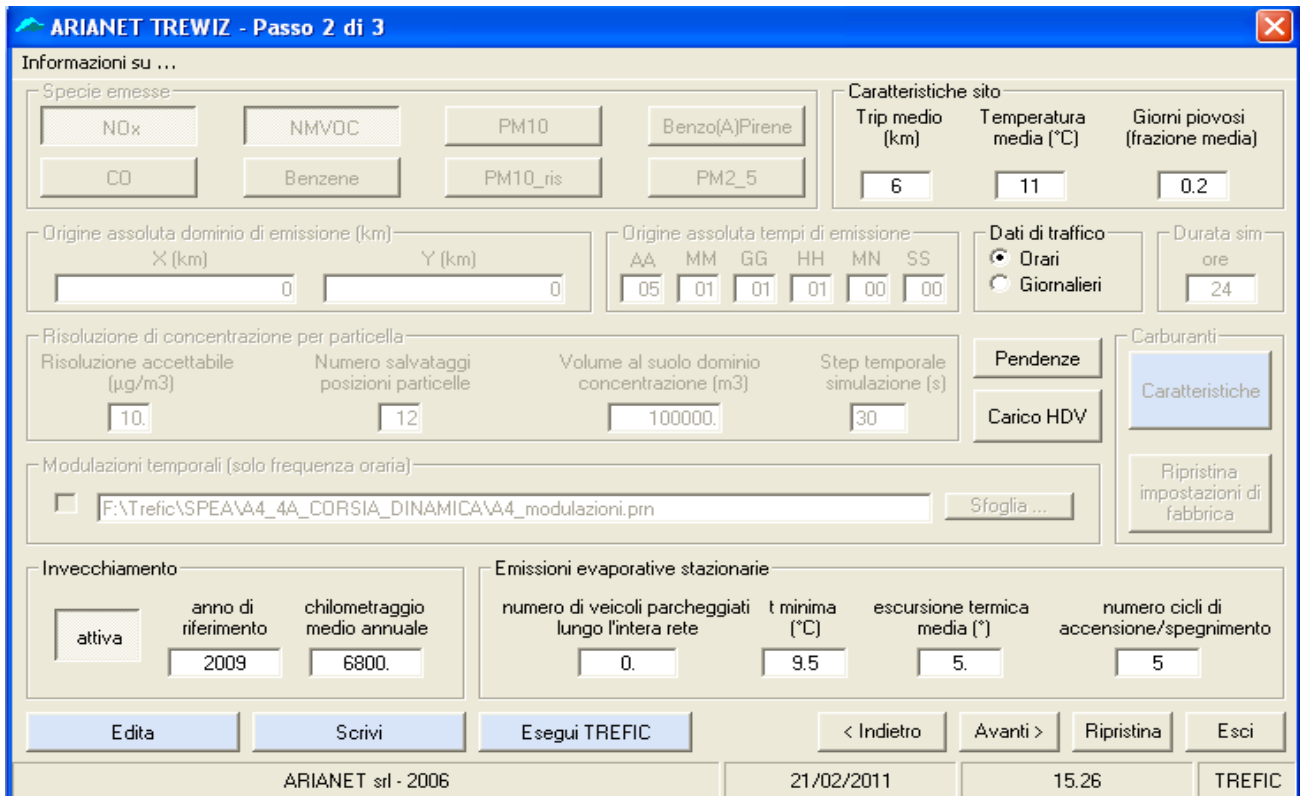


Figura 15. Interfaccia utente del software di calcolo delle emissioni

Inizialmente si è impostato il valore della lunghezza del viaggio medio considerato come il cammino percorso dal momento dell'accensione a quello dello spegnimento del motore, che serve per calcolare la frazione di veicoli che vanno a motore freddo, per i quali verrà attivato l'algoritmo per il calcolo delle relative emissioni a freddo. Non disponendo di un dato specifico per il caso di Bucarest si sono confrontati i valori di "trip medio" relativi ad altre città europee, associando il valore più aderente in relazione all'estensione areale della città.

Per quanto riguarda la temperatura media e la frazione annuale di giorni piovosi si è aggregato il dato mensile individuato sul portale dell'organizzazione meteorologica mondiale qui riportato relativamente alla Romania.

dato medio annuale	
T [°C]	gg piovosi
11	72

Tabella 20. Aggregazione del dato meteorologico mensile rumeno

Mese	Temperatura Media Giornaliera		Numero medio di giorni con precipitazione
	Minima	Massima	
<i>Gen</i>	-5.5	1.5	6
<i>Feb</i>	-3.3	4.1	6
<i>Mar</i>	0.3	10.5	6
<i>Apr</i>	5.6	18	7
<i>Mag</i>	10.5	23.3	6
<i>Giu</i>	14	26.8	6
<i>Lug</i>	15.6	28.8	7
<i>Ago</i>	15	28.5	6
<i>Set</i>	11.1	24.6	5
<i>Ott</i>	5.7	18	5
<i>Nov</i>	1.6	10	6
<i>Dic</i>	-2.6	3.8	6

Tabella 21. Dato meteorologico mensile rumeno relativo all'anno di riferimento del parco veicolare

Infine il modello tiene conto anche dello stato d'invecchiamento dei veicoli sulla base dell'anno solare a cui il parco si riferisce e al kilometraggio medio annuale di un veicolo a benzina. Infatti i veicoli relativi ad ogni categoria UN-ECE sono stati immessi in circolazione nell'intervallo di tempo compreso tra la data d'introduzione di questa e la data di introduzione della categoria successiva. Pertanto considerando un anno medio all'interno dell'intervallo temporale a cui associare le età di tutti i veicoli della stessa categoria risulta semplice calcolarne l'età media sulla base dell'anno di riferimento del Parco e lo stato di invecchiamento dei suoi elementi considerando il dato di percorrenza medio annuale.

Questo parametro è direttamente legato ai fattori di emissione [mg/km], che si presentano come curve in funzione della velocità calcolati su cicli di omologazione e cicli reali di un veicolo che abbia già percorso 30000 km. Il dato di percorrenza medio annuale serve quindi per modulare il fattore di emissione con un coefficiente <1 o >1 a seconda che il veicolo non abbia o abbia già raggiunto il kilometraggio di riferimento.

Come accennato all'inizio di questo capitolo per limitare la sottostima delle emissioni con cui inevitabilmente ci si deve confrontare per il fatto di aver considerato soltanto gli assi principali di viabilità urbana si è scelto di approfondire una metodologia per la stima aggregata delle emissioni diffuse generate dalla viabilità minore.

Facendo qualche accenno alle scelte di modellizzazione effettuate per il grafo della rete, avendo selezionato le strade principali sulla base di una classificazione gerarchica si era ottenuto il risultato di eliminare tutte le strade di livello inferiore, per esempio le vie residenziali o locali, che all'interno della configurazione della città analizzata corrispondono spesso a interi quartieri compatti, il cui contributo emissivo dev'essere in qualche modo considerato. Nella logica del modello di traffico tutti i flussi di domanda generati o attratti dalle varie attività comprese in queste aree vengono associati ad un unico centroide nelle immediate prossimità di ciascuna di esse, trascurando pertanto le percorrenze che nella realtà i veicoli compiono per connettersi a quel punto ideale. Il contributo del traffico diffuso che si genera, che non è altro che la quota di flusso di traffico interzonale interno alla zona d'origine/destinazione, viene attribuito in termini complessivi a sorgenti areali a densità stradale uniforme che aggregano i flussi O/D totali di una o più zone O/D. L'operazione è stata condotta identificando in totale 63 poligoni corrispondenti ciascuno ad un'area territoriale a densità omogenea di strade carreggiabili a cui è stato associata la somma dei flussi O/D totali delle zone comprese nell'area. Ad ogni area è stato poi associata la lunghezza del percorso medio interno e le percorrenza totale dei veicoli come prodotto tra il flusso O/D per il viaggio medio.

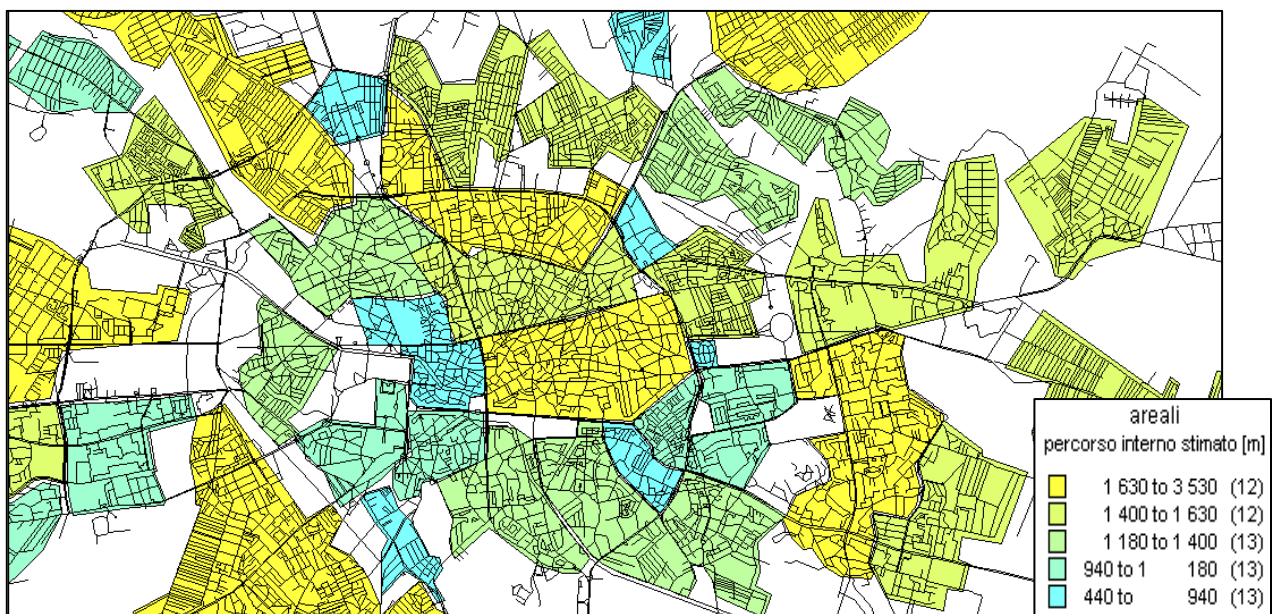


Figura 16. Dettaglio dell'area studiata in cui si individuano alcune sorgenti areali per valutarne le emissioni

Come si è osservato da altri progetti analoghi condotti in riferimento ad altre realtà urbane analizzate seguendo lo stesso procedimento, per esempio Kaliningrad (Calori et al., 2009) si considera come valore convenzionale per la stima della lunghezza del percorso medio un quarto della lunghezza della circonferenza di un cerchio avente la stessa area del poligono. Tuttavia questa convenzione non considera la densità di strade interna ad esso, altro parametro che influenza il viaggio medio in quanto rappresenta la rete stradale secondaria, per la quale viene calcolata una variabile rappresentativa come radice della somma della lunghezza delle strade.

ID	Name	SumLength	C/4	Area	ODsum
3	"Pantelimon"	41978.17	503.36	3182342	818.07
4	"Voluntari"	160031.33	968.427	11779416	2500.45
5	"Cretuleasca"	20409.37	493.846	3063188	789.32
6	"Tunari"	27090.95	466.147	2729196	559.57
7	"Otopeni"	27050.35	497.149	3104293	1896.45
8	"Buciumeni"	26259.67	707.166	6281044	1038.85

Tabella 22. Alcuni record di esempio per il grafo associato al layer degli areali

Se si rappresenta in un grafo la coppia dei valori ($(\text{sumLength})^{0.5}$; $\text{circ}/4$) si ottiene una dispersione di punti che approssima una retta. Interpolando quest'ultima si ottiene una funzione grazie alla quale è possibile stimare il percorso medio interno a ciascuna area.

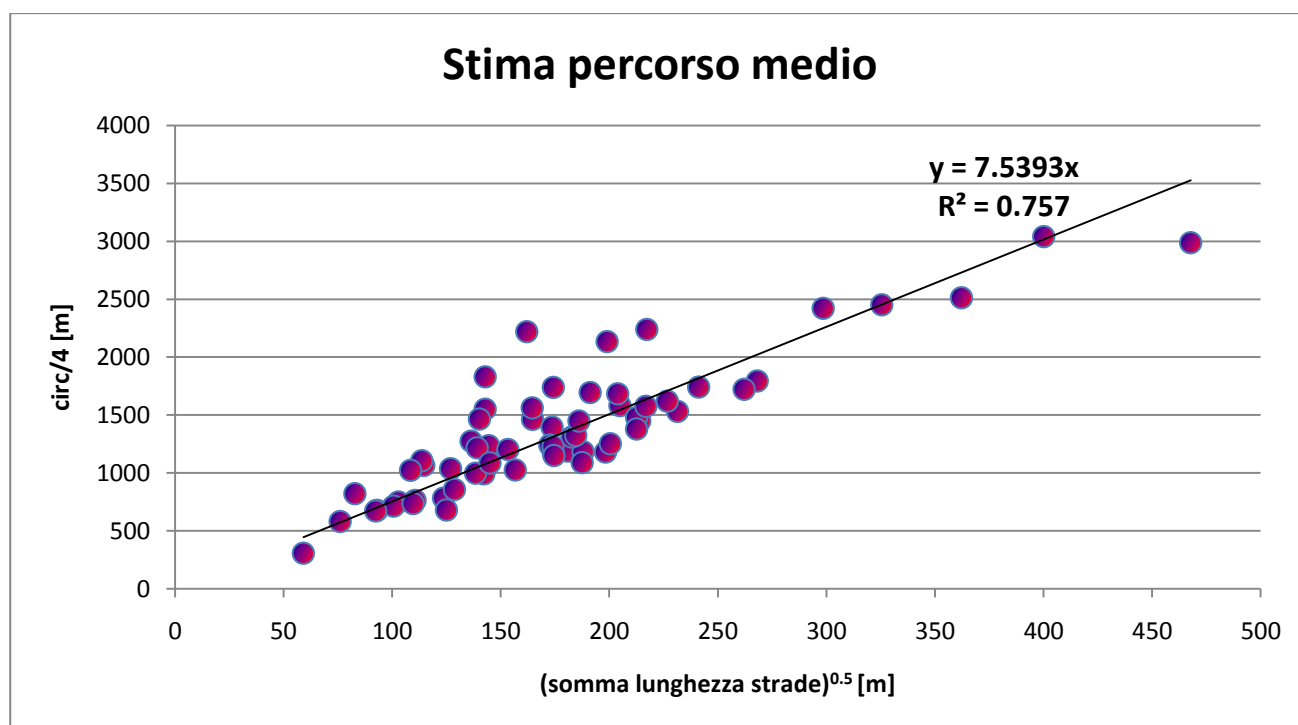


Grafico 7. Andamento delle coppie di valori ($(\text{sumLength})^{0.5}$; $\text{C}/4$) relativi a ciascun'area

Moltiplicando il percorso medio appena stimato con la somma dei flussi O/D complessivamente attratti/generati dall'area si è trovata la percorrenza totale dei veicoli, che viene disaggregata nelle percorrenze delle singole categorie di veicoli secondo le stesse percentuali già utilizzate per il grafo.

Viene effettuata una valutazione complessiva delle percorrenze dell'ora di punta feriale a Bucarest nel 2006, per valutare in che misura contribuiscano le aree, ovvero tutte le strade locali in esse comprese, e la rete di viabilità principale:

PERCORRENZE veicolari 2006 [km]		
<i>totali</i>	<i>grafo</i>	<i>areali</i>
729962	556622	173341
100 %	76.3%	23.7%

Tabella 23. Valori delle percorrenze veicolari stimate per l'anno 2006

Si dispone a questo punto di tutte le informazioni necessarie per poter effettuare il calcolo delle emissioni generate dalle sorgenti areali relativamente all'anno 2006, riferimento per tutti i calcoli finora effettuati dato che si disponeva dei conteggi di traffico relativi ad esso. Nella scelta dei parametri d'ingresso si è scelto di segnalare uno stato di qualità dello strato superficiale peggiore rispetto a quello che caratterizza il grafo principale, perché spesso nei quartieri si possono trovare strade scarsamente mantenute o non del tutto asfaltate, il qual fatto influenza il contributo di produzione di polveri.

Si può procedere ora con la valutazione delle emissioni totali sull'area di studio, sommando i contributi del grafo e degli areali, per quantificare in quale misura contribuiscano percentualmente le sorgenti alla produzione degli inquinanti principali.

Emissioni 2006	CO	NO _x	VOC	PM ₁₀ _LOH	NH ₃	N ₂ O
areali	19.97%	19.80%	21.27%	48.34%	20.88%	19.77%
grafo	80.03%	80.20%	78.73%	51.66%	79.12%	80.23%

Tabella 24. Contributo percentuale delle sorgenti areali e lineari (2006)

Si possono notare i seguenti particolari:

- Il contributo relativo dato dalle sorgenti areali alle emissioni totali è mediamente del 20%, in coerenza con il valore delle percorrenze sopra riportato;

- la percentuale attribuita alle sorgenti areali risulta leggermente più alta per i VOC (21.27%) perché questi inquinanti essendo legati all'emissione di idrocarburi incombusti sono prodotti in misura maggiore laddove il regime di marcia è più basso. Si riporta in merito la curva che rappresenta il fattore di emissione dei VOC per le quattro categorie Euro di un'automobile a benzina in cui si evidenzia come si produca una maggior quantità d'inquinante per kilometro percorso per basse velocità di percorrenza, come quelle proprie della circolazione locale, rispetto a velocità più sostenute riscontrabili sugli archi della viabilità principale;

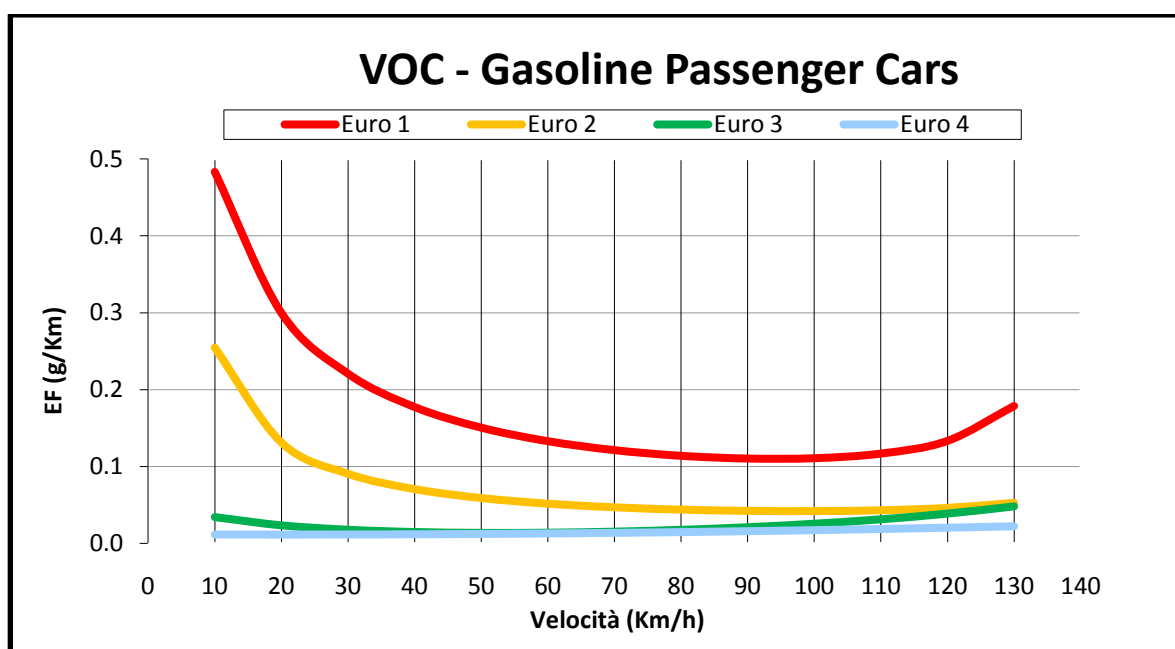


Grafico 8. Andamento del fattore di emissione dei VOC per automobili a benzina

- la percentuale di PM₁₀_LOH prodotta dagli areali risulta notevolmente superiore rispetto a quelle relative agli altri inquinanti, in quanto viene emesso in ugual misura dalle sorgenti areali e da quelle lineari: questo fatto si spiega considerando che questo valore è il risultato della somma della componente di particolato esausto, di quello dovuto alle abrasioni tra le parti meccaniche e al risollevarlo dal manto stradale, il cui peso sarà maggiore soprattutto nella rete locale in quanto abbiamo ipotizzato che sia caratterizzata da un cattivo stato della copertura superficiale mentre sulla rete principale si ritrova una condizione migliore.

4.2 VALIDAZIONE CON I CONSUMI LOCALI

Disponendo i dati relativi al consumo nazionale di combustibile per il settore dei trasporti relativo all'anno 2009 e disponendo del parco circolante relativo allo stesso anno si è pensato di stimare le emissioni ad esso relative, da cui ricavare il dato di consumo stimato da validare con il dato disponibile. Quest'operazione costituisce una valutazione, seppur spartana, dell'attendibilità di tutto il procedimento modellistico finora compiuto, e permette di confrontare il risultato della stima con un dato robusto rispetto al quale emerge chiaramente se il processo conduca complessivamente ad una sottostima o una sovrastima delle emissioni. Per le ipotesi effettuate nel corso dello studio è auspicabile che si verifichi la prima condizione.

Come trend di aumento annuale di traffico tra il 2006 e il 2009 si è considerato un valore medio annuale dell'8%, fornito come dato da NEPA. Applicando la stessa percentuale per tre anni consecutivi, l'incremento totale da applicare al traffico del 2006 per ottenere il valore del 2009 risulta pari al 26% poiché:

tasso annuale	→	tasso cumulato su 3 anni
8%		26%

Tabella 25. Tasso di incremento dei volumi di traffico

Considerando che la simulazione del 2006 si riferiva all'ora di punta e la rete si presentava piuttosto carica si è pensato di ripartire metà dell'incremento su di essa (13%) e la restante parte sul resto della giornata, mantenendo l'ora di punta come limite massimo ed espandendo su intervalli più ampi i picchi di traffico che si verificano al mattino o alla sera. Si sono pertanto incrementati i valori dei flussi di domanda relativi all'ora di punta 9-10 (contenuti nella matrice OD stimata con la simulazione del 2006) del 13% e si è effettuata una nuova simulazione del traffico circolante sulla rete. Come vincoli per riprodurre una distribuzione del traffico analoga al 2006, con una corrispondenza tra gli archi maggiormente caricati nelle due simulazioni, si è scelto di ridurre di una piccola quota le velocità iniziali degli archi proporzionalmente alle velocità calcolate dal modello, affinché si tenesse conto dell'influenza del traffico come componente aggiuntiva di costo dell'arco.

Per quanto riguarda le sorgenti areali è stato preso il valore dei flussi complessivamente generati e attratti da ogni zona OD, che risultano maggiorati del 13% rispetto ai valori dei flussi di domanda relativi al 2006. Seguendo il procedimento descritto nel paragrafo

precedente è stata valutata la percorrenza complessiva dei veicoli internamente a ciascuna sorgente areale.

Viene di nuovo effettuata la valutazione delle percorrenze dell'ora di punta feriale a Bucarest relativamente all'anno 2009, per evidenziare eventuali variazioni tra i contributi percentuali forniti dai movimenti locali piuttosto che sulla viabilità principale:

Percorrenze veicolari 2009 [km]		
TOTALI	Grafo	Areali
853727	657851	195876
	77.1%	22.9%

Tabella 26 Valori delle percorrenze veicolari stimate per l'anno 2009

Si evidenzia come rispetto al 2006 il contributo percentuale fornito dalle aree sul totale delle percorrenze sia leggermente diminuito. Questo fatto è meglio evidenziato andando a confrontare gli incrementi delle percorrenze nel corso dei tre anni.

Percorrenze [km]	Grafo	Areali
2006	556622	173341
2009	657851	195876
Incremento %	18.2%	13.0%

Tabella 27. Incremento delle percorrenze tra gli anni 2006 e 2009

Come ci si poteva aspettare, le percorrenze areali aumentano del 13%, mentre le percorrenze sul grafo aumentano di una percentuale superiore perché si è stabilito che per la simulazione 2009 ciascuna coppia di zone possa essere connessa da quattro percorsi alternativi anziché tre come si era stabilito per la simulazione del 2006. Aver aumentato il numero di percorsi comporta che il flusso si distribuisca su più strade compiendo magari percorsi più lunghi perché il percorso più breve è caratterizzato da un costo maggiore.

Si sono effettuate poi le stime dei due contributi emissivi relativi alle due distinte sorgenti di traffico utilizzando la composizione veicolare contenuta nel parco circolante relativo al 2009.

Rispetto al 2006, considerando le emissioni totali provenienti dai due differenti tipi di sorgente, si sono registrate le seguenti variazioni per quanto riguarda le quantità dei principali inquinanti emessi.

Emiss [kg/hpunta]	CO	NO _x	VOC	CH ₄	NMVOC	CO ₂	SO ₂	PM ₁₀
2006	8463	985	822	19.30	802	206392	5.10	576
2009	6936	992	735	16.93	718	229492	5.68	693
% 06-09	-18.0%	0.7%	-10.5%	-12.2%	-10.5%	11.2%	11.2%	20.4%

Tabella 28. Confronto tra le emissioni relative al 2006 e al 2009

I risultati mostrano una sostanziale diminuzione delle emissioni relative alla maggior parte delle categorie di inquinante, il qual fatto si spiega considerando che l'aumento delle percorrenze veicolari viene bilanciato dal rinnovo del parco veicolare. Resta pressoché costante il valore degli NO_x emessi mentre cresce del 20% il contributo del PM₁₀ totale, il quale è influenzato direttamente dall'aumento delle percorrenze. Per quanto riguarda invece il consumo di combustibile, esso risulta maggiore nel 2009:

FC [kg EP]	
2006	62096
2009	69009
Δ	+ 11%

Tabella 29. Confronto relativo al consumo di combustibile

Dal consumo di combustibile dipende anche l'emissione di CO₂, che pertanto cresce della stessa percentuale nell'intervallo degli anni.

Concentrandosi poi solo sui risultati relativi alla simulazione 2009, anche in questo caso il contributo relativo delle aree rispetto alle emissioni totali valutate sull'intera area urbana risulta dell'ordine del 20% e in particolare:

2009	CO	NO _x	VOC	PM ₁₀	CH ₄	N ₂ O	NMVOC	CO ₂
aree	20.3%	20.7%	21.4%	50.2%	20.5%	19.9%	21.5%	21.2%
grafo	79.7%	79.3%	78.6%	49.8%	79.5%	80.1%	78.5%	78.8%

Tabella 30. Contributo emissivo percentuale delle sorgenti areali e lineari (2009)

Si può valutare ora il consumo di combustibile, che viene fornito dal software tra i risultati della stima effettuata come dato complessivo dovuto alla somma dei contributi dei diversi combustibili utilizzati dai veicoli in termini di kg di petrolio equivalente.

Fuel Consumption [kgEP] (9-10)

Grafo	Areali
54385.06	14623.44

Tabella 31. Dato di consumo di combustibile fornito dal modello di calcolo delle emissioni

Dalla somma di questi dati si deve passare al valore giornaliero e convertirlo in GJ, dopodiché ricavare il dato di consumo annuale stimando quanto contribuisca un giorno medio feriale autunnale in termini di traffico rispetto ai fine settimana, secondo dei coefficienti ricavati dai valori dei conteggi di traffico rilevati nel 2006.

WORKING DAY	SATURDAY/W.D.	SUNDAY/W.D.
1	0.75	0.6

Tabella 32. Coefficienti che quantificano il traffico circolante nel week end rispetto a quello feriale

Dopo aver eseguito le opportune conversioni tra unità di misura e aver aggregato il dato secondo il procedimento descritto, il consumo annuale di combustibile stimato relativo alla città di Bucarest risulta :

FC (9-10) [kgEP]	FC (9-10) [GJ]	FC (0-24) [GJ]	FC (year) [GJ]
69008	2898	40577	13404590

Tabella 33. Consumo annuale di combustibile stimato per la città di Bucarest

Si è a questo punto effettuato un confronto con il dato ufficiale di consumo nazionale fornito dal RAR per il settore dei trasporti distinto nelle tre categorie di combustibile. Esso è fornito in tonnellate di combustibile all'anno e a seconda del potere calorifico di ciascuna categoria viene convertito in GJ consumati all'anno :

Combustibile	tons/yr	GJ/ton	GJ/yr	FC nazionale/yr [GJ]
diesel	2967668	42.7	126719423.6	191 398 685
LPG	43957	45.5	2000043.5	
gasoline	1447557	43.3	62679218.1	

Tabella 34. Consumo nazionale di combustibile per il settore dei trasporti

Per confrontare il dato di Bucarest con quello nazionale viene fatta una proporzione sulla base del rapporto tra il numero di abitanti, per cui si dispongono i dati di censimento relativi al 2009.

popolazione [ab]		
Bucarest	1944367	9%
Romania	22246862	100%

Tabella 35. Numero di abitanti a Bucarest e totale della popolazione nazionale

A questo punto si può procedere con il raffronto tra il dato stimato e il dato calcolato che conferma il fatto che il procedimento adottato effettui una certa sottostima delle emissioni reali che si manifestano sulla rete:

FC annuale [GJ]	
stimato	13 404 590
calcolato	16 651 686
differenza	3 247 096
% di sottostima	19.50%

Tabella 36. Validazione con i consumi di combustibile

Il risultato è considerato accettabile perché la sottostima si può in parte ricondurre al fatto di aver trascurato i flussi interzonali nella fase di modellizzazione della domanda, il cui peso può risultare consistente se si ricorda che nel caso in esame si erano individuate 114 zone la cui estensione media era di circa 1.5 km² e la cui lunghezza media delle strade interne risulta di circa un kilometro, tale da giustificare l'utilizzo dei mezzi motorizzati per spostarsi all'interno dell'area.

5 SCENARI FUTURI E CONFRONTI

Dati gli strumenti e le informazioni a disposizione è sembrato interessante formulare delle ipotesi di evoluzione futura della realtà studiata, per valutare eventuali cambiamenti nel panorama emissivo a fronte di un'evoluzione "business as usual" o governata da precise azioni d'intervento intraprese. Sulla base dei risultati confrontabili che si otterranno in uscita dal sistema modellistico validato si potranno verificare gli effetti e l'efficacia delle misure proposte e scegliere a ragion veduta in che direzione concentrare gli sforzi di riduzione dei livelli di inquinamento atmosferico osservati, obiettivo guida del progetto.

5.1 SCENARIO "BUSINESS AS USUAL" AL 2015

Si è effettuata inizialmente una proiezione dell'evoluzione più probabile del traffico di Bucarest che si verificherebbe lasciando evolvere spontaneamente le driving force del settore dei trasporti in assenza di interventi esterni. Il trend di aumento dei volumi di traffico per gli anni 2009-2010 è stato quantificato dall'ente automobilistico rumeno come il 10% annuo: tale valore inevitabilmente produrrà un carico significativo sulla rete urbana e degli effetti anche in termini di qualità dell'aria che saranno controbilanciati dal rinnovo del parco veicoli. Per effettuare la stima di quest'ultimo si è effettuata una proiezione del Parco sulla base del trend di rinnovo osservato finora sull'intera Romania, soprattutto dopo l'entrata di quest'ultima nell'Unione Europea nel 2007 con il relativo adeguamento alle normative vigenti in materia di emissioni veicolari.

Sembra ragionevole pensare che data la rapidità dello sviluppo si arriverà presto ad una situazione comparabile con la realtà delle altre grandi metropoli europee, in cui il tasso ha raggiunto un valore di equilibrio. Se si prende come riferimento il tasso di aumento annuo del traffico a Milano, pari al 2%, sembra ragionevole stimare che l'elevato valore del tasso di Bucarest possa subire una decrescita lineare ed assestarsi su tale valore a partire dal 2015. Si è ipotizzato l'andamento seguente per il tasso medio annuo di aumento del traffico a Bucarest :

2010	2011	2012	2013	2014	2015
10%	8.5%	7%	5.5%	4%	2%

Tabella 37. Incremento annuo del volume di traffico complessivo sulla rete urbana

Coerentemente alle considerazioni effettuate in precedenza si considera che l'aumento cumulato di traffico nell'intervallo di anni 2009-2015 possa essere ripartito per metà nell'ora di punta e per metà nel restante arco della giornata, modulando i flussi di domanda in modo che aumentino ma senza superare il valore di picco. L'aumento di traffico totale cumulato che si dovrebbe registrare tra il 2009 e il 2015 risulta pari al 43%, di cui metà interessa l'ora di punta 9-10, in riferimento alla quale si registrerà quindi un incremento di flusso del 21%. Questo incremento andrà direttamente ad influire sui flussi di domanda contenuti nella matrice OD in ingresso al modello di carico della rete (incrementati tutti secondo tale percentuale) e indirettamente sui flussi di arco su cui si manifestano gli spostamenti. Si è scelto di mantenere un valore di percorsi alternativi massimo tra ogni coppia di zone pari a 4 e si sono cambiati i valori delle velocità iniziali degli archi proporzionalmente alle velocità calcolate dal modello, affinché si tenesse conto di come era distribuito il traffico nel 2009 per introdurre una componente aggiuntiva di costo sugli archi interessati da un carico maggiore. Il risultato dell'assegnazione mostra come gli archi più carichi nel 2009 (colore rosso) aumentino il loro flusso di traffico ma di una percentuale inferiore al 20%, mentre gli archi più liberi inizialmente (ovvero con un valore di flusso abbastanza basso se confrontato con il carico medio di tutti gli archi) mostrano un incremento della percentuale di flusso anche maggiore, come viene mostrato in questa mappa che si concentra sulla redistribuzione del flusso in una zona ad alta congestione.

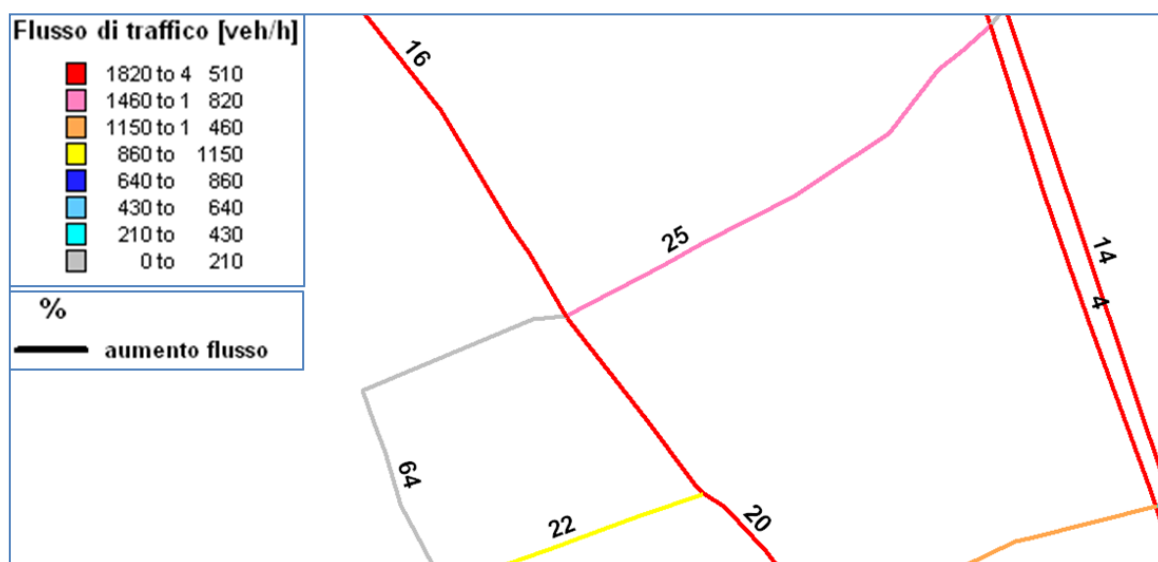


Figura 17. Flussogramma relativo allo scenario 2009 con l'aumento percentuale ottenuto nel 2015

Lo scopo di questa proiezione futura non riguarda l'individuazione di azioni di miglioramento infrastrutturale o di proposte per migliorare la circolazione, o meglio le

informazioni ottenute potrebbero essere utili a questi scopi se acquisite dagli enti locali preposti a questa funzione. In questa sede è sembrato più sensato valutare la stima delle emissioni prodotte nel 2015 dal grafo stradale secondo la stima disponibile dell'andamento dei fattori che le influenzano. In particolare si è cercato di valutare se in termini di quantità d'inquinante emesso sarà maggiore il peso dell'aumento di traffico piuttosto che la diminuzione di inquinante emesso per chilometro percorso dovuto al miglioramento tecnologico del parco dei veicoli circolanti, secondo una proiezione effettuata sulla base degli andamenti registrati negli ultimi anni. Infatti come si può notare dall'andamento del fattore di emissione degli NO_x per automobili diesel e benzina al variare della tecnologia si evidenzia una consistente riduzione delle emissioni, per cui sembra ragionevole confidare nel ruolo positivo che il rinnovo dei veicoli rivestirà in questo ambito .

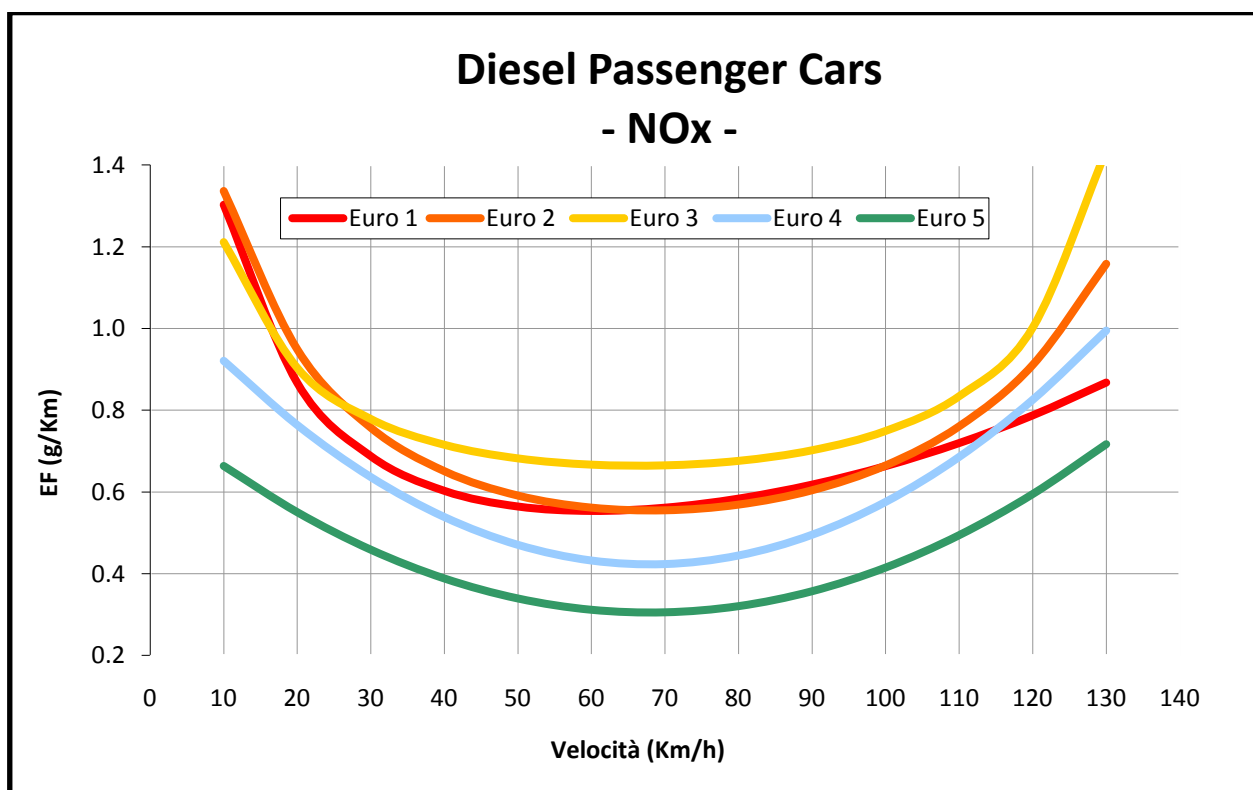


Grafico 9. Andamento dei fattori di emissione degli NO_x per automobili diesel e benzina

Dopo aver effettuato le necessarie elaborazioni si è valutato l'aumento stimato delle percorrenze che si dovrebbe riscontrare tra i due anni di riferimento. L'aumento percentuale di percorrenze sugli areali restituisce il valore prevedibile che si era stabilito come ipotesi iniziale in termini di aumento di flusso di traffico per l'ora di punta, e tale aumento si riflette in misura simile sulle percorrenze che interessano la rete.

Percorrenze [veh x km]	grafo	areali	TOTALE
2009	657851	195876	853727
2015	796539	237010	1033549
aumento %	21.08%	21.00%	21.06%

Tabella 38. Aumento delle percorrenze tra gli anni 2009 e 2015

Si riporta quindi il valore stimato delle emissioni complessive prodotte dal traffico di Bucarest attraverso un confronto tra gli anni 2009 e 2015 , per alcuni tra gli inquinanti principali.

[kg/hpunta]	CO	NO _x	VOC	CH ₄	CO ₂	PM ₁₀ _LOH
2009	6936	991.9	735.3	16.9	229492	692.9
2015 base	3740	835.3	396.5	8.9	289700	826.5
Δ	- 46.08%	- 15.79%	- 46.08%	- 47.51%	26.24%	19.29%

Tabella 39. Emissioni inquinanti per gli anni 2009 e 2015 prodotte dall'area analizzata

Generalmente si nota una diminuzione abbastanza consistente delle emissioni, il che porta a dire che lasciando evolvere autonomamente il sistema sotto la spinta delle forze esterne avrà più influenza sulle quantità di inquinanti emessi la componente del previsto rinnovo dei mezzi circolanti rispetto all'aumento delle percorrenze dovute alla crescita del bisogno di mobilità. Si registrano però aumenti in termini di anidride carbonica emessa e di PM₁₀ complessivamente prodotto (esausto, risollevarimento e abrasioni) : l'emissione di un maggior quantitativo di CO₂ a fronte di una diminuzione di CO è indice di una combustione più efficiente, e si spiega in relazione al maggior quantitativo di combustibile consumato per la trazione veicolare come viene qui riportato:

Fuel Consumption [kg EP]	
2009	69009
2015	87038
aumento	26.13%

Tabella 40. Aumento di consumo di combustibile che si stima possa verificarsi tra il 2009 e il 2015

L'aumento di particolato è invece riconducibile principalmente al numero maggiore di veicoli in circolazione.

5.2 SCENARIO “INTERVENTI SUL TRASPORTO PUBBLICO” AL 2015

Date le previsioni di sviluppo del settore dei trasporti per i prossimi anni, si è scelto di approfondire e simulare gli effetti di azioni che sarebbe conveniente considerare in un’ottica strategica. Tra gli interventi già pianificati dal governo della città all’interno di un programma che mira a ridurre le emissioni dei trasporti si propone di intervenire sulla quota del trasporto collettivo atto al soddisfacimento di una parte della domanda di mobilità. Come prima cosa si prevede la modernizzazione della flotta dei veicoli pubblici, attraverso l’acquisto di nuovi autobus e la conversione a GPL degli autobus già esistenti. Inoltre il programma assume un ruolo chiave in quanto quadro d’insieme per la coordinazione di altri progetti tra cui si cita lo “Smile Civitas II” del maggio 2009 che propone misure per incrementare la domanda di trasporto sostenibile per migliorare la vivibilità urbana. Tra i risultati attesi da questo progetto si trova l’aumento dell’efficienza del trasporto pubblico per far crescere il numero dei passeggeri che ne usufruiscono, trasferendo su di esso una parte della domanda di mobilità. In particolare a Bucarest la società RATB che gestisce il sistema dei trasporti di superficie sta collaborando allo sviluppo del progetto “Commerce”, che sta studiando misure di mobilità ottimale soprattutto in vista della riduzione delle emissioni pendolari che sono responsabili soprattutto nelle ore di punta della frazione più consistente degli spostamenti compiuti in automobile. Sulla scia di questo proposito si è scelto di approfondire gli effetti di un possibile intervento di miglioramento dell’offerta di trasporto pubblico, partendo dalle informazioni di domanda di mobilità disponibili dal modello di traffico e stabilendo dei criteri per trasferire una quota di trasporto privato su quello pubblico.

Per far crescere la quota di pendolari che utilizzano il mezzo pubblico per i loro spostamenti si propone la realizzazione di 10 nuove linee di trasporto pubblico che realizzino un collegamento diretto tra le coppie di zone con maggior flusso di domanda scambiato, le cui informazioni principali vengono qui riportate per evidenziare l’entità del fenomeno. Si è infatti ritenuto ragionevole considerare la realizzazione di una nuova linea “ad hoc” per ciascuna di queste coppie, per massimizzare l’utilità dei futuri utenti per cui è pensata, dato che la presenza dei nuovi autobus previsti potrà essere ampiamente giustificata dalla consistenza dei flussi in questione, senza considerare nella fase di dimensionamento l’innescio di un probabile fenomeno virtuoso che porterà eventuali altri utenti provenienti da altre zone a servirsi del nuovo servizio di trasporto pubblico, con un’ulteriore diminuzione del numero di veicoli privati in circolazione.

N linea	O	D	Flusso[veh/h]
1	111	18	748.32
2	72	18	725
3	110	6	695.18
4	60	89	592.09
5	101	89	557.19
6	43	65	502.13
7	6	110	476.77
8	37	66	436.3
9	13	5	406.12
10	26	99	370.37

Tabella 41. Nuove linee di trasporto pubblico previste con le zone direttamente connesse

Si ipotizza che data la convenienza economica e temporale di questa alternativa, dettata quest'ultima dal fatto che si pensa di dedicare una corsia preferenziale agli autobus lungo i percorsi che continuerebbero a risultare congestionati per gli altri veicoli, due terzi dei viaggiatori che attualmente compiono il tragitto tra le specifiche zone con il mezzo privato potranno passare a servirsi del mezzo pubblico, in particolare i pendolari che nell'ora di punta mattutina possono essere considerati i soggetti che compiono la maggior parte degli spostamenti. Come mezzi sostitutivi per poter soddisfare la domanda di spostamento si è pensato di utilizzare degli autobus di capienza 120 posti, che nell'ora di punta si stima possano essere riempiti per i $\frac{3}{4}$, il cui numero in corrispondenza di ogni linea è stato stabilito sulla base del coefficiente di occupazione delle autovetture, pari a 1,5. Pertanto risulta che ogni linea sarà interessata dal passaggio di nuovi autobus su un certo percorso, che saranno sommati alla quota di veicoli commerciali pesanti che già interessano i suoi archi e precisamente :

N° linea	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
[new bus / h]	7	7	7	6	6	5	5	4	4	4

Tabella 42. Nuovi autobus previsti per soddisfare la domanda di ciascuna linea

L'effetto immediato sarà quello di sgravare una parte del carico veicolare sulle linee prima utilizzate dai viaggiatori individuali per compiere il tragitto, che interessano perlopiù la zona centrale della città, con una conseguenza immediata in termini di aumento delle velocità di percorrenza. Sulla base di questa diminuzione stimata del carico veicolare verrà valutata

la corrispondente riduzione delle emissioni inquinanti, agevolata anche dall'ipotesi che la società dei trasporti pubblici possa orientare la scelta d'acquisto dei suoi nuovi veicoli sulla tecnologia con alimentazione a gas naturale.

Dopo aver effettuato le elaborazioni si ottiene che i risultati in termini di percorrenze complessive sul grafo risultano inferiori del 20 % rispetto allo scenario base relativo allo stesso anno e inferiori del 4% rispetto alle percorrenze sul grafo calcolate nel 2009. Tenendo conto anche della componente degli areali, il cui contributo abbiamo ipotizzato resti invariato anche a fronte dell'intervento sui trasporti pubblici in quanto i cittadini utilizzeranno comunque il mezzo privato per raggiungere il capolinea, il valore delle percorrenze aumenta secondo le seguenti percentuali:

Aumento % percorrenze	totali	grafo	Areali
2009 – 2015 (base)	21.06%	21.08%	21.00%
2009 – 2015 (trasp_pubbl)	1.32%	-4.54%	21.00%

Tabella 43. Aumento delle percorrenze tra il 2009 e il 2015 per i diversi scenari

Passando ad analizzare le emissioni prodotte dalle sorgenti lineari costituite dal grafo (in quanto il contributo delle sorgenti areali resta invariato in entrambi gli scenari e dunque ai fini di un confronto risulta irrilevante) si ottiene un generale miglioramento percentuale delle emissioni rispetto allo scenario 2015 in assenza d'interventi.

[kg/ hpunta]	CO	NO_x	VOC	CH₄	N₂O	CO₂	PM₁₀	SO₂
2015 base	3052.4	665.0	317.5	7.09	0.01	230547	406.8	5.77
2015 TP	2012.3	496.1	210.4	5.66	0.01	164689	349.6	4.11
variazioni	-34.1%	-25.4%	-33.7%	-20.2%	-20.4%	-28.6%	-14.1%	-28.6%

Tabella 44. Confronto tra le emissioni stimate per il 2015 in assenza di interventi e a fronte di un incremento dei trasporti pubblici

Come si può notare, intervenendo sul settore dei trasporti pubblici si registrano delle sostanziali riduzioni nella quantità d'inquinante emesso sulla rete, dell'ordine del 20-30% rispetto allo scenario "business as usual" . L'efficacia di riduzione maggiore si manifesta per la quantità di CO emessa, conseguenza diretta del miglioramento delle condizioni di combustione, che teoricamente nelle condizioni di temperatura e pressione allo scarico del

motore dovrebbe rilasciare gas costituiti unicamente da CO₂ ed H₂O. Tale fatto è spiegato mettendo in evidenza le maggiori velocità di percorrenza sugli archi dovute alla diminuzione del numero di veicoli privati circolanti, come si può dedurre dall'andamento del fattore di emissione relativo visibile nel grafico riportato.

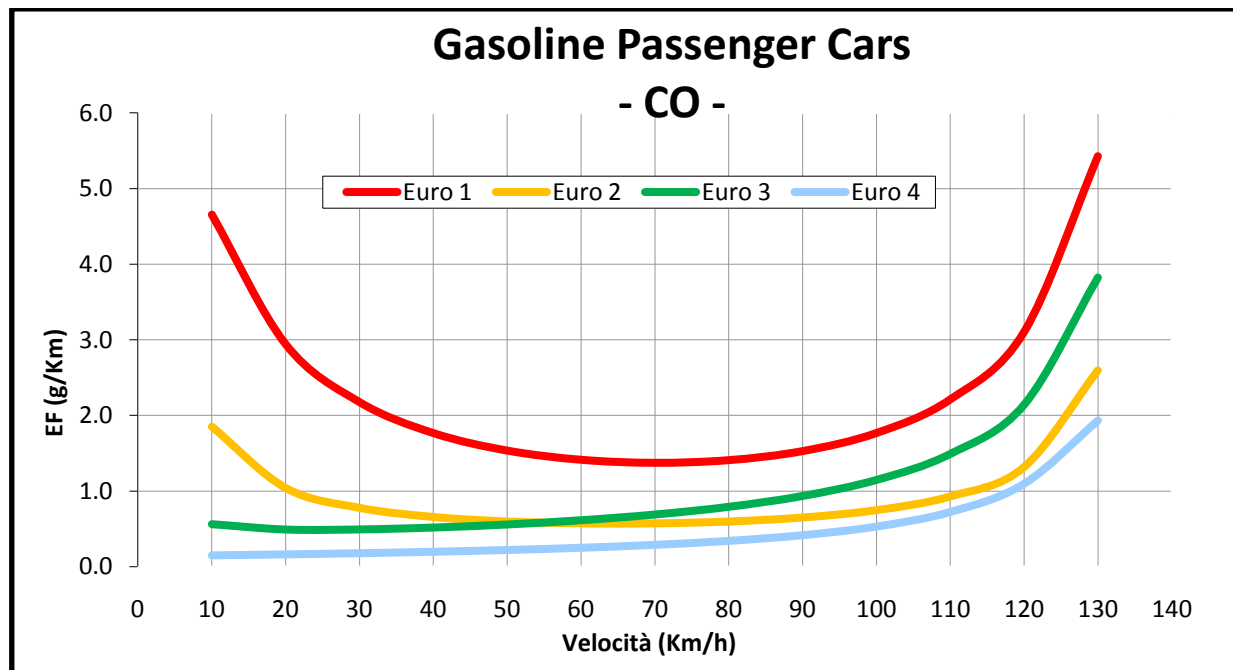


Grafico 10. Fattore di emissione di CO per un'automobile a benzina

Si può anche valutare l'effetto dell'intervento rispetto alla situazione studiata nel 2009, per quantificare se e quanto il sistema sia sensibile a questa azione e quanto sia significativo intraprenderla. Si era già notato che il rinnovo previsto del parco tra il 2009 e il 2015 contribuisca ad una diminuzione dell'inquinante emesso dai veicoli più di quanto concorra alla tendenza contraria l'aumento stimato delle percorrenze. Le uniche emissioni che andavano aumentando erano quelle di CO₂ e di PM₁₀. Per lo scenario di incremento dei trasporti pubblici si verificano invece le seguenti variazioni:

[kg/hpunta]	CO	NOx	VOC	CH4	CO2	PM10_LOH
2009	6936	991.9	735.3	16.9	229492	692.9
2015 traspPubbl	2700	666.4	289.4	7.45	223842	769.3
Δ	-61.07%	-32.82%	-60.64%	-55.89%	-2.46%	11.02%

Tabella 45. Confronto tra le emissioni del 2009 e quelle relative allo scenario 2015 con l'aumento della quota di trasporto pubblico.

Si registra un effetto di diminuzione ulteriore rispetto a tutte le emissioni inquinanti che già nello scenario 2015 “business as usual” decrescevano rispetto al 2009.

Dato che dopo aver trasferito parte della domanda sul trasporto collettivo il consumo di combustibile sulla rete diminuisce di circa il 3% rispetto al 2009 si evidenzia come conseguentemente decresca anche l’anidride carbonica, che invece nello scenario base del 2015 presentava un sensibile aumento. Il PM10 presenta ancora un trend di crescita rispetto al 2009, indice del fatto che comunque le percorrenze vadano aumentando nonostante diminuiscano i veicoli privati in circolazione, ma l’incremento registrato è decisamente inferiore rispetto allo scenario in assenza di interventi.

6 SINTESI E CONCLUSIONI

Al termine di tutte le elaborazioni effettuate si ritiene opportuno sintetizzare i risultati più interessanti che si sono ottenuti nel corso dello studio e suggerire gli sviluppi futuri che potranno essere oggetto di ulteriori approfondimenti.

È ritenuto innovativo il fatto di aver approfondito il problema della stima delle emissioni da traffico veicolare mediante un **processo modellistico integrato** che superi la specificità di tanti metodi consolidati e settoriali che si occupano di analizzare distintamente i fenomeni che governano la mobilità e gli effetti che essa produce. Scomponendo il problema in fasi successive e connesse è stato possibile mettere in luce lo stretto legame causa effetto che esiste tra gli elementi e contestualmente si sono approfonditi i metodi e le teorie che ne descrivono le relazioni funzionali.

Tra gli **obiettivi metodologici raggiunti** il principale è stato sicuramente aver valutato l'efficacia dei modelli incontrati nel ricostruire questi legami, i limiti intrinseci, i vantaggi operativi che offrono e in che proporzione siano sensibili alle scelte dell'analista. È stato fondamentale per questo scopo il riferimento ad un preciso caso esistente, che ha permesso la taratura dei parametri in relazione all'affidabilità del sistema nella ricostruzione della realtà.

I soddisfacenti risultati del **test di validazione** del modello di traffico hanno infatti riportato come l'indice dell'errore tra i dati misurati e quelli forniti dal modello sia paragonabile al valore fornito dalla simulazione su tutti i dati utilizzati per stima.

Riferendosi ad un determinato caso di studio è stato possibile effettuare un'ulteriore validazione a valle del processo di stima delle emissioni attraverso il **confronto tra il consumo di carburante calcolato e il dato ufficiale**, che ha mostrato una corrispondenza inferiore al 20%.

Inoltre ove vi era disponibilità di dati reali si sono **calibrati i coefficienti** di particolari funzioni necessarie al processo di stima, come il caso delle curve di deflusso, affinché riproducessero con più fedeltà il legame reale tra le componenti modellizzate.

Dal **punto di vista applicativo** è invece risultato interessante poter disporre di un set completo di materiali, comprendente sia dati che strumenti operativi, per poter **confrontare risultati** diversi in termini emissivi **in relazione a precise scelte o ipotesi** iniziali sul panorama della mobilità. A questo proposito si è valutata la sensibilità del

sistema rispetto agli effetti di un possibile intervento sul settore dei trasporti pubblici e si è ottenuta una riduzione delle emissioni significativa (circa 30%) rispetto allo scenario in assenza d'interventi a fronte di un'azione ipotizzata piuttosto contenuta.

Conseguentemente alle analisi condotte e ai risultati ottenuti si ritiene opportuno tracciare delle **linee di sviluppo** possibili per approfondire la descrizione dei fenomeni affrontati e per massimizzare le opportunità che gli strumenti a disposizione già offrono.

Nell'ambito del modello che simula il funzionamento del sistema dei trasporti si suggerisce di approfondire il fenomeno della congestione che necessariamente coinvolge le realtà analizzate e aprirsi ad una sua possibile considerazione attraverso lo studio degli effetti provocati e delle relazioni di feedback che si generano.

In termini invece di opportunità che l'intero sistema offre si suggerisce di valutare l'efficacia in termini di riduzione delle emissioni di un ventaglio più ampio di possibili azioni strategiche da intraprendere, esplorando come evolverà la realtà sotto diverse ipotesi di scenario per fornire **risultati oggettivi su cui basare le scelte di pianificazione**.

7 BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

Willumsen L.G., 1978, Estimation of an O/D Matrix from Traffic Counts. A Review, Institute of Transport Studies, University of Leeds, England, Working Paper #99

Cascetta E., 2006, Modelli per i sistemi di trasporto, UTET Università

J. de D. Ortùzar, L.G. Willumsen, 2001, Pianificazione dei sistemi di trasporto, Ed. HOEPLI Milano

Nanni A, Eriksson E., Soudani A., Abid S., 2006, Bottom-up road traffic emission calculation for the Tunisian road network by means of a traffic assignment model

Calori G., Eriksson E.M., Ilina E., Moussafir J., Nanni A., Samerkhanova A., 2009. Kaliningrad Air Pollution induced by Traffic

Maja R., 2009, dispense del corso di Tecnica ed Economia dei Trasporti

Giuliano M., 2009, dispense del corso di Impianti di trattamento degli effluenti gassosi

Maja R., 2001, Metodi per l'analisi e il contenimento dell'inquinamento da traffico

Caruso C., Nanni A., 2009, CARUSO Model , Methodological User Guide

Caserini S., 2009, dispense del corso di "Fenomeni di Inquinamento"

<http://www.romair.eu>

<http://www.acs.bologna.enea.it/ricerca/attivita/aria>

<http://wwis.meteoam.it/ro>