

POLITECNICO DI MILANO
Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale
Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile
Orientamento: Infrastrutture di trasporto



STIMA DEI TEMPI DI PERCORRENZA IN AMBITO
AUTOSTRADALE: SVILUPPO DI UN MODELLO
PREVISIONALE IN TEMPO REALE.

Relatore: Prof. Luca STUDER
Correlatore: Ing. Riccardo SCARINCI

Tesi di Laurea di:
Francesca TRAINA MELEGA
Matr. n. 724732

Anno Accademico 2009/2010

Sommario

1. Introduzione	7
2. Obiettivi	11
Nota bibliografica di fine capitolo	12
3. Descrizione dell'infrastruttura	13
3.1 Cenni storici.....	13
3.2 Inquadramento territoriale del tracciato autostradale	14
3.3 Infrastruttura	15
3.3.1 Corsie di marcia e di emergenza	16
3.3.2 Punti di accesso ed uscita dall'autostrada	18
3.3.3 Interconnessioni autostradali.....	20
3.3.4 Aree di sosta e di parcheggio	20
3.4 Pedaggio	23
3.4.1 Documenti di viaggio	23
3.4.2 Classificazione tariffaria	23
3.4.3 Il pagamento del pedaggio	24
3.5 Sistemi di gestione dell'infrastruttura.....	25
3.5.1 Centrale Operativa	25
3.5.2 Pannelli a Messaggio Variabile	26
Nota bibliografica di fine capitolo	29
4. Modelli per il sistema di trasporto autostradale	30
4.1 Introduzione.....	30
4.2 Modelli all'equilibrio.....	35
4.3 Modelli con dinamica intraperiodale.....	36
4.3.1 Modelli macroscopici	38
4.3.2 Modelli mesoscopici	40
4.3.3 Modelli microscopici	40
Nota bibliografica di fine capitolo	41
5. Modello scelto	43
6. Formulazione del modello scelto	45
6.1 Introduzione.....	45
6.2 Dati di ingresso del modello.....	47
6.2.1 Offerta di trasporto	47
6.2.2 Domanda di trasporto.....	64

6.3	Dynamic Traffic Assignment	112
6.4	Formulazione del modello	113
6.5	Processi di calibrazione e validazione del modello.....	133
	Nota bibliografica di fine capitolo	150
7.	Conclusioni.....	142
8.	Bibliografia	155

Indice delle figure

<i>Figura 1</i>	<i>Realizzazione di un tratto dell'autostrada A21 anni '60</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2</i>	<i>Contesto territoriale del tracciato A21 Torino – Piacenza.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3</i>	<i>Caratteristiche geometriche sezioni stradali per strade di categoria A secondo D.M.05/11/2001</i>	<i>17</i>
<i>Figura 4</i>	<i>Stazioni di entrata e uscita A21 tratto Torino - Piacenza.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 5</i>	<i>Localizzazione delle interconnessioni autostradali A21 tratto Torino - Piacenza</i>	<i>20</i>
<i>Figura 6</i>	<i>Tronco autostrada A21 Torino - Piacenza</i>	<i>22</i>
<i>Figura 7</i>	<i>Esempio di biglietto ordinario magnetico per il pagamento del pedaggio autostradale</i>	<i>23</i>
<i>Figura 8</i>	<i>Esempi di veicoli appartenenti alle cinque classi veicolari.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 9</i>	<i>Esempio di PMV e spiegazione del messaggio fornito all'utenza.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 10</i>	<i>Rappresentazione schematica dei modelli di offerta</i>	<i>33</i>
<i>Figura 11</i>	<i>struttura dei modelli per la simulazione dei sistemi di trasporto</i>	<i>34</i>
<i>Figura 12</i>	<i>Modello di offerta con dinamica intraperiodale</i>	<i>38</i>
<i>Figura 13</i>	<i>Struttura generale del modello di previsione</i>	<i>46</i>
<i>Figura 14</i>	<i>Tracciato A21 Torino - Piacenza.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 15</i>	<i>Diagramma fondamentale del deflusso</i>	<i>50</i>
<i>Figura 16</i>	<i>Curve flusso-velocità per diversi valori di VFL (HCM 2000)</i>	<i>54</i>
<i>Figura 17</i>	<i>Modello lineare di Greenshields.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 18</i>	<i>Modello di Greenberg.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 19</i>	<i>Modello esponenziale di Underwood</i>	<i>57</i>
<i>Figura 20</i>	<i>Modello di Drake et al.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 21</i>	<i>Andamento traffico medio durante le ore della giornata (valori derivati dai dati storici A21_Entrate)</i>	<i>60</i>
<i>Figura 22</i>	<i>Distribuzione densità delle velocità determinate.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 23</i>	<i>Composizione del traffico medio giornaliero in veicoli leggeri e pesanti</i>	<i>63</i>
<i>Figura 24</i>	<i>Composizione traffico giornaliero e dettagli percentuali dei mezzi pesanti</i>	<i>68</i>
<i>Figura 25</i>	<i>Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Lunedì periodo estivo</i>	<i>72</i>
<i>Figura 26</i>	<i>Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Martedì periodo estivo</i>	<i>72</i>
<i>Figura 27</i>	<i>Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Mercoledì periodo estivo</i>	<i>73</i>
<i>Figura 28</i>	<i>Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Giovedì periodo estivo</i>	<i>73</i>
<i>Figura 29</i>	<i>Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Venerdì periodo estivo</i>	<i>74</i>
<i>Figura 30</i>	<i>Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Sabato periodo estivo</i>	<i>74</i>

Figura 31 Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Domenica periodo estivo	75
Figura 32 Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Lunedì periodo invernale	75
Figura 33 Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Martedì periodo invernale	76
Figura 34 Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Mercoledì periodo invernale	76
Figura 35 Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Giovedì periodo invernale	77
Figura 36 Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Venerdì periodo invernale	77
Figura 37 Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Sabato periodo invernale	78
Figura 38 Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Domenica periodo invernale	78
Figura 39 Grafico Box-plot relativo alla stazione 445 Barriera Villanova TO	79
Figura 40 Grafico Box-plot relativo alla stazione 447 Asti Ovest	80
Figura 41 Grafico Box-plot relativo alla stazione 448 Asti Est	80
Figura 42 Grafico Box-plot relativo alla stazione 449 Felizzano	81
Figura 43 Grafico Box-plot relativo alla stazione 451 Alessandria Ovest	81
Figura 44 Grafico Box-plot relativo alla stazione 452 Alessandria Est	82
Figura 45 Grafico Box-plot relativo alla stazione 455 Voghera	82
Figura 46 Grafico Box-plot relativo alla stazione 456 Casteggio	83
Figura 47 Grafico Box-plot relativo alla stazione 457 Broni Stradella	83
Figura 48 Grafico Box-plot relativo alla stazione 458 Castel san Giovanni	84
Figura 49 Grafico Box-plot relativo alla stazione 459 Piacenza Ovest	84
Figura 50 Rappresentazione esemplificativa dei criteri di collegamento	86
Figura 51 Rappresentazione dei dendrogrammi ottenuti con differenti distanze e metodi	88
Figura 52 Dendrogramma che meglio rappresenta le distanze tra le osservazioni	89
Figura 53 Dendrogramma in cui appaiono individuati i quattro cluster	89
Figura 54 Rappresentazione dei cluster attraverso MDS	90
Figura 55 Andamento dei flussi del cluster 1 feriali	91
Figura 56 Andamento dei flussi del cluster 2 venerdì esodo	91
Figura 57 Andamento dei flussi del cluster 3 festivi estivi	92
Figura 58 Andamento dei flussi del cluster 4 festivi invernali	92
Figura 59 Confronto tra i profili dei flussi dei veicoli leggeri del cluster 1 feriali e 3 festivi estivi	93
Figura 60 Confronto tra i profili dei flussi dei veicoli pesanti del cluster 1 feriali e 3 festivi estivi	93
Figura 61 processo di identificazione del cluster per il giorno attuale un martedì del periodo estivo ...	95
Figura 62 Processo di identificazione del cluster per il giorno attuale un mercoledì del periodo invernale	95
Figura 63 Processo di identificazione del cluster per il giorno attuale domenica 3/08/08	96
Figura 64 Processo di identificazione del cluster per il giorno attuale sabato 8/11/08	96
Figura 65 andamento dei flussi in ingresso fino all'istante attuale	97
Figura 66 andamento dei flussi reali e dei flussi del cluster più simile	98
Figura 67 andamento dei flussi futuri	98
Figura 68 Profilo del cluster 1 dei flussi in ingresso dei veicoli leggeri	99
Figura 69 Profilo del cluster 1 dei flussi in ingresso dei veicoli pesanti	99
Figura 70 Andamento delle variazioni percentuali tra intervalli di 15 minuti successivi per i flussi dei veicoli leggeri	100

Figura 71 Andamento delle variazioni percentuali tra intervalli di 15 minuti successivi per i flussi dei veicoli pesanti.....	100
Figura 72 Rappresentazione del valore del flusso in ingresso previsto dalle 11 stazioni per l'intervallo di 15 minuti.....	101
Figura 73 Flusso previsto in ingresso dalle 11 stazioni nel primo intervallo previsionale del giorno attuale lunedì periodo estivo – veicoli leggeri -	102
Figura 74 Flusso previsto in ingresso dalle 11 stazioni nel secondo intervallo previsionale del giorno attuale lunedì periodo estivo – veicoli leggeri -	102
Figura 75 Flusso previsto in ingresso dalle 11 stazioni nel terzo intervallo previsionale del giorno attuale lunedì periodo estivo – veicoli leggeri -	103
Figura 76 Flusso previsto in ingresso dalle 11 stazioni nel quarto intervallo previsionale del giorno attuale lunedì periodo estivo – veicoli leggeri -	103
Figura 77 Flusso previsto in ingresso dalle 11 stazioni nel primo intervallo previsionale del giorno attuale mercoledì periodo invernale – veicoli leggeri -	104
Figura 78 Flusso previsto in ingresso dalle 11 stazioni nel secondo intervallo previsionale del giorno attuale mercoledì periodo invernale – veicoli leggeri -	104
Figura 79 Flusso previsto in ingresso dalle 11 stazioni nel terzo intervallo previsionale del giorno attuale mercoledì periodo invernale – veicoli leggeri -	105
Figura 80 Flusso previsto in ingresso dalle 11 stazioni nel quarto intervallo previsionale del giorno attuale mercoledì periodo invernale – veicoli leggeri -	105
Figura 81 Rete infrastrutturale ridotta	109
Figura 82 Struttura generale del modello di previsione	113
Figura 83 Rappresentazione attraverso il modello della rete di trasporto.....	114
Figura 84 Rappresentazione della curva densità - velocità	114
Figura 85 Procedimento di determinazione dei dati di ingresso del modello relativi alla domanda di mobilità	116
Figura 86 Rappresentazione della curva flusso - velocità	117
Figura 87 Processo di determinazione dell'ampiezza dell'intorno dei pacchetti	118
Figura 88 Rappresentazione della rete carica durante un passo di simulazione	119
Figura 89 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 00 min -	120
Figura 90 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 05 min -	120
Figura 91 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 10 min -	121
Figura 92 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 15 min -	121
Figura 93 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 20 min -	122
Figura 94 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 25 min -	122
Figura 95 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 30 min -	123
Figura 96 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 35 min -	123
Figura 97 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 40 min -	124
Figura 98 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 45 min -	124
Figura 99 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 50 min -	125
Figura 100 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 55 min -	125
Figura 101 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 60 min -	126
Figura 102 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 00 min -	126
Figura 103 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 05 min -	127
Figura 104 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 15 min -	127
Figura 105 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 20 min -	128
Figura 106 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 25 min -	128
Figura 107 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 30 min -	129
Figura 108 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 35 min -	129
Figura 109 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 40 min -	130
Figura 110 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 45 min -	130

Figura 111 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 50 min -	131
Figura 112 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 55 min -	131
Figura 113 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 60 min -	132
Figura 114 Fase di warm-up simulata dal modello ore 7:40	135
Figura 115 Fase di warm-up simulata dal modello ore 7:45	136
Figura 116 Fase di warm-up simulata dal modello ore 7:50	136
Figura 117 Fase di warm-up simulata dal modello ore 7:55	137
Figura 118 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 8:00.....	137
Figura 119 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 8:05.....	138
Figura 120 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 8:10.....	138
Figura 121 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 8:15.....	139
Figura 122 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 8:20.....	139
Figura 123 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 8:25.....	140
Figura 124 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 8:30.....	140
Figura 125 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 8:35.....	141
Figura 126 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 8:40.....	141
Figura 127 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 8:45.....	142
Figura 128 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 8:50.....	142
Figura 129 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 8:55.....	143
Figura 130 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 9:00.....	143
Figura 131 Boxplot relativi ai valori di velocità media di percorrenza dei tratti della rete stimate dal modello.....	145
Figura 132 Boxplot della velocità media di percorrenza dell'intera rete stimata dal modello	146
Figura 133 Boxplot relativi ai valori dei tempi media di percorrenza dei tratti della rete stimati dal modello.....	147
Figura 134 Grafico di confronto tra le velocità simulate e misurate nella realtà con indicazione del valore di R^2	149
Figura 135 Grafico di confronto tra i tempi di percorrenza simulati e misurati nella realtà con indicazione del valore di R^2	150

Indice delle tabelle

Tabella 1 Classificazione rete stradale D.M. 05/11/2001.....	16
Tabella 2 Classificazione generale delle strade.....	16
Tabella 3 Punti di ingresso e uscita A21 tratto Torino – Piacenza.....	18
Tabella 4 Aree di servizio A21 tratto Torino – Piacenza	21
Tabella 5 Aree di sosta A21 tratto Torino – Piacenza.....	21

Tabella 6 Classi veicolari e loro descrizione secondo il sistema di riscossione del pedaggio.....	24
Tabella 7 PMV in itinere A21 tratto Torino – Piacenza	28
Tabella 8 PMV in accesso A21 tratto Torino - Piacenza.....	29
Tabella 9 esempio di matrice O-D e delle tipologie di spostamenti	31
Tabella 10 Caratteristiche degli archi della rete	48
Tabella 11 Nodi della rete e loro progressiva.....	48
Tabella 12 Livelli di servizio secondo HCM.....	53
Tabella 13 Caratteristiche reali dell'infrastruttura per la determinazione dei parametri di correzione della curva HCM.....	53
Tabella 14 Valori di densità, velocità, rapporto portata/capacità e portata per diverse VFL e per ciascun LdS (HCM 2000)	54
Tabella 15 Parametri dell'equazione di Cascetta.....	54
Tabella 16 Elenco dei parametri delle curve di deflusso sperimentali HCM e Cascetta.....	55
Tabella 17 Parametri delle relazioni analitiche di deflusso	55
Tabella 18 Parametri della curva di deflusso di Drake e loro determinazione	58
Tabella 19 Traffico giornaliero medio (valori derivati dai dati storici A21_Entrate).....	59
Tabella 20 Parametri per la determinazione di VFL.....	61
Tabella 21 Struttura dei dati storici relativi agli ingressi (dati A21_Entrate).....	64
Tabella 22 Struttura dei dati storici relativi a ingressi e uscite (dati A21_Uscite)	65
Tabella 23 Valori dei coefficienti di equivalenza a seconda del tipo di terreno (HCM)	66
Tabella 24 Classificazione del tratto di autostrada in funzione della pendenza (HCM).....	66
Tabella 25 Classificazione dei veicoli in base al sistema di pedaggiamento.....	67
Tabella 26 Limiti di velocità per diverse classi veicolari.....	68
Tabella 27 Coefficiente di equivalenza per mezzi pesanti	69
Tabella 28 Struttura dati storici per analisi statistica	70
Tabella 29 Ripartizione delle osservazioni secondo i cluster individuati.....	87
Tabella 30 Matrice di dissimilarità tra cluster e il giorno attuale.....	94
Tabella 31 Matrice OD completa dell'autostrada A21	107
Tabella 32 Matrice OD grafo di rete ridotto	108
Tabella 33 Matrice dei flussi dei veicoli leggeri delle ore 8.00 di un giorno storico appartenente al cluster 2	110
Tabella 34 Matrice percentuale dei veicoli leggeri delle ore 8.00 di un giorno storico appartenente al cluster 2	110
Tabella 35 Matrice dei flussi dei veicoli pesanti delle ore 8.00 di un giorno storico appartenente al cluster 2	110
Tabella 36 Matrice percentuale dei veicoli pesanti delle ore 8.00 di un giorno storico appartenente al cluster 2	110
Tabella 37 Matrice media percentuale relativa ai veicoli leggeri, ore 8.00, associata al cluster 2	111
Tabella 38 Matrice media percentuale relativa ai veicoli leggeri, ore 9.00, associata al cluster 2	111
Tabella 39 Matrice media percentuale relativa ai veicoli pesanti, ore 8.00, associata al cluster 2.....	111
Tabella 40 Matrice media percentuale relativa ai veicoli leggeri, ore 9.00, associata al cluster 2	111
Tabella 41 Valori dei parametri del modello stimati sulla base dei dati storici.....	133
Tabella 42 Dati di uscita forniti dal modello secondo le richieste specifiche	144
Tabella 43 Confronto tra i valori di velocità reali e stimati dal modello	148
Tabella 44 Confronto tra i valori dei tempi di percorrenza reali e stimati dal modello	148

1. Introduzione

La strada che la ricerca nel settore della mobilità e dei trasporti stradali sta intraprendendo negli ultimi anni è quella di sviluppare sistemi che permettano l'utilizzo delle infrastrutture di trasporto esistenti in maniera ottimizzata e consapevole, riducendo le esternalità prodotte sulla collettività in termini di inquinamento, salute e costi monetari

La domanda di mobilità in Europa come nel mondo è sempre in costante crescita e questo fenomeno portando con sé i conseguenti problemi legati alla congestione della rete stradale, ad un'elevata incidentalità e ad un innalzamento del livello di inquinamento atmosferico. In particolar modo la congestione nel trasporto stradale ha un costo annuale stimato tra lo 0,9 e l'1,5% del PIL dell'Unione Europea ed ha ripercussioni importanti sull'ambiente e sulla salute dei cittadini (CEMT/ITF (2007) *"Congestion, a Global Challenge: The Extent of and Outlook for Congestion in Inland, Maritime and Air Transport"*). A tal proposito non va dimenticato che il trasporto stradale produce il 72% delle emissioni di CO₂ dovute ai trasporti nel loro complesso, con una crescita del 35% tra 1990 e 2005 (DG TREN (2008) *"Energy and Transport in Figures 2007/08"*). Inoltre la congestione aumenta l'insicurezza stradale, che, nonostante una positiva tendenza verso il basso (-24% dal 2000 al 2007 nell'UE-27) rimane comunque elevata, causando 42.448 decessi all'anno (dati 2007) (DG TREN (2009) *"Energy and Transport in figures 2009"*).

L'Unione Europea ed altri enti affrontando questi problemi hanno individuato nei sistemi di trasporto intelligente (Intelligent Transport System) una possibile soluzione. La Commissione Europea definisce i sistemi di trasporto intelligenti come l'applicazione delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione ai trasporti, sia ai singoli modi di trasporto, sia all'interazione fra di essi (Lodola, Matteo 2010).

Nel trasporto stradale l'uso dei sistemi ITS permette lo scambio di informazioni tra veicoli, infrastruttura ed utenti, aumentando la sicurezza, diminuendo l'impatto ambientale, fornendo agli utenti un viaggio più confortevole, producendo quindi l'effetto di aumentare le potenzialità delle infrastrutture esistenti. Un sistema ITS ad esempio può rilevare eventuali pericoli presenti sulla strada ed avvisare gli utenti prima che essi siano visibili, riducendo così il rischio di incidenti e quindi un potenziale blocco del traffico, con tutte le conseguenze ambientali ed economiche che esso comporta. Il fine che si vuole perseguire mediante l'uso di ITS è quello di consentire un migliore uso delle infrastrutture, migliorandone la sicurezza ed ampliandone le potenzialità senza dover ricorrere ad interventi di rilievo sull'infrastruttura stessa.

Il progetto europeo EasyWay promosso con attenzione particolare allo sviluppo degli ITS coordinato tra i diversi stati europei si propone il raggiungimento dei seguenti obiettivi (Arditi, Roberto 2008):

- Flusso del traffico/riduzione delle congestioni: risulta evidente il ruolo fondamentale della gestione del traffico al fine di ridurre il congestionamento e modulare al meglio i flussi di traffico;
- miglioramento della sicurezza del traffico: l'obiettivo fissato dal piano della sicurezza stradale dell'UE è quello di dimezzare il numero degli incidenti mortali. Gli ITS rappresenteranno un contributo significativo a tale riduzione;
- miglioramento ambientale: il programma ridurrà l'emissione di CO₂ proveniente dal traffico sulla rete TERN del 10% nel 2020.

Per raggiungere gli obiettivi posti sono stati quattro ambiti di sviluppo:

- Sistemi di informazione al viaggiatore: tali servizi forniscono ai viaggiatori europei informazioni sul traffico in tempo reale (informazioni pre-trip e on-trip) che permettono decisioni di itinerario ben documentate;
- Servizi di gestione del traffico: tali servizi servono a regolare i flussi di traffico sulle tratte critiche, aumentandone le prestazioni, aumentare il livello di sicurezza e migliorare la capacità di rilevare e risolvere gli incidenti e il loro impatto sul traffico;
- Servizi di trasporto e logistica: i servizi di trasporto e logistica mirano a migliorare le strutture dedicate ai mezzi pesanti, fornire servizi di parcheggio intelligente e garantire un rapido accesso ai terminali intermodali. Inoltre mirano a semplificare il movimento di merci pericolose all'interno dell'UE.
- Infrastruttura di tecnologia delle comunicazione dell'informazione: tale tecnologia consente lo scambio in tempo reale tra gli operatori del trasporto stradale, unificando i protocolli di comunicazione e garantendo così continuità di informazione lungo tutto l'itinerario dell'utente.

Per quanto riguarda i servizi di informazione all'utenza negli anni sono stati sviluppati differenti strumenti tecnologici quali: pannelli a messaggio variabile, servizi radiofonici, servizi televisivi, navigatori satellitari e siti web utili a garantire questo servizio. Le informazioni che solitamente l'utente desidera conoscere prima di affrontare uno spostamento e durante il suo viaggio riguardano: il tempo di viaggio e le condizioni meteo. La conoscenza del tempo di percorrenza per una data destinazione diminuisce lo stress degli utenti, soprattutto in condizioni di congestione. Legate al tempo di percorrenza sono quelle informazioni relative ad eventi presenti sulla rete quali incidenti, lavori sulla sede stradale che ne riducono l'ampiezza, ecc. Le informazioni sulle condizioni meteo, che l'utente incontrerà lungo il suo tragitto, hanno un'importanza notevole, basti pensare alle criticità che portano situazioni come la presenza di nebbia o le precipitazioni nevose.

Per quanto riguarda gli ITS legati alla gestione del traffico autostradale diversi sono i progetti che a livello europeo sono stati sviluppati nel corso di questi anni:

- Corsie dinamiche: un sistema di corsie dinamiche consente una gestione elastica delle corsie a disposizione, dando al gestore dell'infrastruttura la possibilità di aprire o chiudere al traffico determinate corsie in base alle esigenze del traffico;

- Pagamento elettronico dei pedaggi: è un sistema per cui, transitando da una determinata sezione stradale, viene riscosso il pagamento in maniera automatica, senza che i veicoli debbano fermarsi.
- Controllo delle rampe di accesso (ramp metering): il sistema di controllo delle rampe di accesso permette, mediante un semaforo posto sulle corsie di immissione, di regolare il flusso in ingresso nella corrente di traffico principale.
- Riconoscimento automatico degli incidenti: i sistemi di riconoscimento automatico degli incidenti vengono impiegati sulle autostrade, con la finalità di fornire un tempestivo riconoscimento degli eventi incidentali, al fine di permettere un rapido intervento dei soccorsi ed un veloce ripristino delle normali condizioni di circolazione.

Con lo scopo di raggiungere l'obiettivo di migliorare la sicurezza stradale, riducendo il tasso di incidentalità, sono stati sviluppati differenti progetti quali:

- Il sistema Companion: composto da una serie di paline luminose poste ai margini della carreggiata, da sensori di visibilità, velocità e telecamere a circuito chiuso. Il sistema si attiva quando dai sensori viene rilevata una situazione di potenziale pericolo, come la presenza di nebbia (sensori di visibilità) oppure rallentamenti improvvisi (sensori di velocità e telecamere) dovuti ad incidenti o a cantieri.
- Sistema Ecall: costituito da un dispositivo posto a bordo dei veicoli che, in seguito ad un incidente è in grado di mettersi in contatto automaticamente con i servizi di emergenza (ambulanze, forze dell'ordine).
- Limiti di velocità variabili: in questo caso il sistema di trasporto intelligente ha come risultato finale quello di imporre limiti di velocità che possono variare in base a diversi fattori, come le condizioni del tempo, la presenza di congestione o incidenti, cantieri stradali, ecc.

Alcuni dei progetti sviluppati in Italia in questi anni sono: il progetto "Terza Corsia" (T3) della società delle Autostrade di Venezia e Padova SpA, il progetto "Companion" della Società delle Autostrade Brescia – Verona – Vicenza - Padova SpA e diverse implementazioni di sistemi ITS sull'Autostrada dei Fiori SpA (Marturano, P. 2005).

Proprio nell'ambito dello sviluppo di sistemi di trasporto intelligenti ITS aventi la finalità di migliorare le condizioni di circolazione in campo autostradale si inserisce il presente lavoro di tesi. Questo lavoro consisterà nell'implementazione di un modello di previsione del traffico in grado di fornire una previsione nel breve periodo delle condizioni di traffico future partendo dai dati di traffico raccolti in tempo reale e la stima dei conseguenti tempi di viaggio che potranno essere forniti come informazione all'utenza presente sull'autostrada. Nei diversi capitoli della tesi verranno trattati i differenti aspetti relativi allo sviluppo del modello. Nel capitolo 2 verranno espressi gli obiettivi da raggiungere attraverso lo sviluppo del modello, nel capitolo 3 sarà descritta l'infrastruttura, ossia l'autostrada oggetto di studio: autostrada A21 Torino – Piacenza. Il capitolo 4 contiene una panoramica sulla teoria dei modelli nel campo del trasporto stradale, il capitolo 5 illustra le motivazioni che hanno portato alla scelta di sviluppare un modello previsionale di tipo mesoscopico e dinamico. Il cuore dello sviluppo del modello che comprende formulazione, calibrazione e validazione è trattato nel capitolo 6. Il capitolo 7 raccoglierà i risultati del lavoro svolto e sulla base di questi proporrà alcune applicazioni che potranno essere oggetto di sviluppi futuri nel campo della ricerca dei sistemi di trasporto intelligenti.

2. Obiettivi

Il presente lavoro di tesi intende elaborare uno strumento in grado di stimare la distribuzione dei flussi di traffico in tempo reale sulla rete infrastrutturale e di fornire una previsione nel breve periodo dei flussi futuri a partire dalle caratteristiche di domanda e offerta di un sistema di trasporto autostradale.

Lo strumento sviluppato potrà essere utilizzato per stimare i tempi di viaggio, rilevare l'accadimento di eventi, attuare pratiche di regolazione dinamica della velocità e come strumento di supporto ai piani di gestione del traffico (Studer, Marchionni, Ponti, & Romanò, 2007).

L'ambito territoriale oggetto dell'analisi è l'autostrada A21 Torino – Brescia, ed in particolare l'attenzione è rivolta al tratto Torino – Piacenza di competenza della società di gestione SATAP S.p.A..

A tale fine verranno analizzati i dati di traffico di cui la società di gestione dispone in tempo reale, grazie al sistema di riscossione del pedaggio e al sistema delle boe telepass presenti sulla tratta. Sulla base di tali dati verrà scelto lo strumento di simulazione di traffico più adeguato e quindi sviluppato un modello.

Lo sviluppo di un modello previsionale nel breve periodo, in grado di utilizzare congiuntamente, per la generazione di matrici Origine-Destinazione (chiamate Casello-Casello nel caso di sistema di trasporto autostradale), i dati di traffico storici e quelli raccolti in tempo reale, consente di prevedere quali saranno le condizioni di traffico sui diversi tratti della rete.

I dati di ingresso di tale modello saranno anzitutto le caratteristiche e le prestazioni offerte dall'infrastruttura, e la domanda di trasporto rappresentata dai dati di traffico raccolti dalla società di gestione, sia storici che in tempo reale. L'applicazione del modello consentirà di ottenere come dati di uscita la distribuzione al tempo attuale dei flussi di traffico in transito sull'autostrada e la distribuzione prevista in un certo intervallo di tempo fissato, alla quale sarà associata la stima dei tempi di viaggio.

La rappresentazione al tempo attuale dei flussi di traffico permette, alla società di gestione dell'infrastruttura, di conoscere la loro distribuzione e quindi di individuare eventuali situazioni di congestione particolarmente critiche presenti sulla rete.

La rappresentazione previsionale nel breve periodo dei flussi di traffico presenta invece una duplice utilità, da una parte costituisce un'informazione utile alla società di gestione che può conoscere con discreto preavviso la possibile evoluzione di situazioni critiche già presenti, o l'eventuale insorgere di altre lungo il tratto di competenza, e dall'altra grazie alla stima dei

tempi di viaggio costituisce un'informazione all'utenza, che risulta maggiormente consapevole delle condizioni di percorribilità dell'autostrada e quindi delle possibili scelte alternative (Avineri & Prashker, 2006).

La possibilità di fornire all'utenza l'importante informazione, relativa ai tempi di percorrenza stimati, migliora il livello di percezione dell'utente della qualità del servizio di trasporto fornito dal sistema. L'utente che conosce i tempi di percorrenza di un determinato percorso è perciò, anche se in via indiretta, preparato alle condizioni di traffico nelle quali si troverà e può compiere le sue scelte con maggior consapevolezza.

Sviluppi ulteriore del presente lavoro potrebbero essere quelli di elaborare procedure che, basandosi sul dato della distribuzione dei flussi di traffico e del tempo di viaggio stimato, siano in grado di ottimizzare la gestione dell'infrastruttura garantendo una maggior stabilità del flusso di traffico, limitando l'accadimento di fenomeni di coda e congestione. Alcuni esempi di tali sviluppi futuri potrebbero essere il rilevamento di eventi oppure il controllo dinamico della velocità.

Nota bibliografica di fine capitolo

Avineri, E., & Prashker, J. N. (2006). The impact of travel time information on travelers' learning under uncertainty. *Transportation*, 33(4), 393-408.

Studer, L., Marchionni, G., Ponti, M., & Romanò, D. (2007). Strumenti di previsione e di gestione dinamica del traffico sull'autostrada A21 torino-alessandria-piacenza.

3. Descrizione dell'infrastruttura

3.1 Cenni storici

Nel luglio 1960 la Provincia di Torino fu promotrice della fondazione della società SATAP S.p.A (Satap S.p.A.), acronimo di Società Autostrada Torino – Alessandria - Piacenza, che poi si occupò della realizzazione dell'infrastruttura e che da allora si occupa della gestione e dell'esercizio dell'autostrada. I soci fondatori furono la Provincia e il Comune di Torino, l'Istituto bancario San Paolo, la Cassa di Risparmio di Torino e la FIAT.

La concessione venne ottenuta nel febbraio 1963 e l'anno successivo iniziarono i lavori che durarono più di 5 anni. L'arteria entrò progressivamente in funzione tra il dicembre del 1968 e il dicembre del 1969. Il collegamento con la A1 Autostrada del Sole fu completato nel 1972, quello con la Piacenza - Brescia nel 1973, quello con la A7 Milano - Genova nel 1987.

Questa autostrada riveste un ruolo molto importante per lo sviluppo socio-economico dell'area nord-ovest, in quanto svolge la funzione di collegamento tra il Piemonte, l'Italia centrale e il porto di Genova.



Figura 1 Realizzazione di un tratto dell'autostrada A21 anni '60

3.2 Inquadramento territoriale del tracciato autostradale

L'autostrada A21 si snoda nel nord Italia collegando Torino a Brescia, il tratto Torino – Piacenza costituisce un collegamento tra il Piemonte occidentale e l'Autostrada del Sole A1. Il tracciato da Torino a Piacenza segue di massima il tracciato della SS10 "Padana Inferiore". Il tratto dell'A21 che collega Torino a Piacenza è gestito dalla società SATAP S.p.A., mentre il tratto seguente Piacenza – Brescia è di competenza della Società Centro Padane.

Il tronco Torino - Piacenza misura in totale 165 km; inizia a Santena alla fine della Tangenziale Sud di Torino (6 km dopo l'interconnessione con la Torino - Savona) e dopo un lungo tratto rettilineo raggiunge Villanova d'Asti. Superata la linea ferroviaria Torino - Genova si affianca alla SS10 e ne segue il tracciato sino oltre Asti. Superata Asti l'Autostrada si sposta a Nord e raggiunge Alessandria intersecandosi con la A26 Voltri - Gravelona Toce, poi, scavalcata i fiumi Tanaro e Bormida, raggiunge Tortona intersecandosi con la A7 Milano - Genova. Infine, attraversato il fiume Scrivia si interconnette sia con l'autostrada A1 nei pressi di Piacenza Sud, sia con il restante tratto della A21 fino a Brescia gestito dalla Società Centro Padane.

L'arteria attraversa terreni prevalentemente pianeggianti e si sviluppa solo per il 17% su ponti e viadotti; sono invece ben 146 i cavalcavia (circa uno al km) a servizio della viabilità ordinaria.

L'autostrada si snoda in territori ampiamente dedicati all'agricoltura e dediti alla viticoltura, per questo è soprannominata "AUTOSTRADA DEI VINI".



Figura 2 Contesto territoriale del tracciato A21 Torino – Piacenza

3.3 Infrastruttura

Il Decreto Ministeriale del 5 novembre 2001 “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade” del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, 2001) definisce i criteri per la progettazione degli aspetti funzionali e degli elementi geometrici delle strade, in relazione alla loro classificazione secondo il Codice della strada.

Il Nuovo Codice della strada, Decreto Legislativo n.285 del 1992 (Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, 1992), propone una classificazione delle strade, riguardo le loro caratteristiche costruttive, tecniche e funzionali, suddividendole anche per ambito territoriale attraversato:

- A autostrade (extraurbane e urbane);
- B strade extraurbane principali;
- C strade extraurbane secondarie;
- D strade urbane di scorrimento;
- E strade urbane di quartiere;
- F strade locali (extraurbane e urbane).

Il D.M. del 5 novembre 2001 introduce alcuni fattori fondamentali che, caratterizzando le reti stradali dal punto di vista funzionale, consentono di collocare ciascuna rete in una classe precisa. I fattori proposti sono i seguenti:

- tipo di movimento servito (transito, distribuzione, penetrazione, accesso); il movimento è da intendersi pure nel senso opposto, cioè di raccolta progressiva ai vari livelli;
- entità dello spostamento (distanza media percorsa dai veicoli);
- funzione assunta dal contesto territoriale attraversato (collegamento nazionale, interregionale, provinciale, locale);
- componenti di traffico e relative categorie (veicoli leggeri, veicoli pesanti, motoveicoli, pedoni, ecc.). A seconda della tipologia di rete le componenti di traffico possono essere ammesse o no al transito sulla stessa. Nella tabella seguente si evidenzia che sulla rete primaria e principale non tutte le categorie di utenti sono ammesse (non sono ammessi pedoni, animali, velocipedi, ciclomotori), le componenti di traffico risultano perciò limitate. Sulle reti secondaria e locale le componenti sono tutte ammesse alla circolazione.

Secondo questi fattori si identificano quattro tipologie diverse di rete:

Tipo di rete	Movimento servito	Entità spostamento	Funzione nel territorio	Componenti di traffico
PRIMARIA	Transito, scorrimento	Distanze lunghe	Nazionale e interregionale in ambito extraurbano, di intera area urbana in ambito urbano	Limitate
PRINCIPALE	Distribuzione	Media distanza	Interregionale e regionale in ambito extraurbano, interquartiere in ambito urbano	Limitate
SECONDARIA	Penetrazione	Distanza ridotta	Provinciale e interlocale in ambito extraurbano, di quartiere in ambito urbano	Tutte ammesse
LOCALE	Accesso	Breve distanza	Interlocale e comunale in ambito extraurbano, interna al quartiere in ambito urbano	Tutte ammesse

Tabella 1 Classificazione rete stradale D.M. 05/11/2001

Con riferimento a quanto indicato dalle due norme sopracitate è possibile riassumere tramite la Tabella 2 la classificazione generale della rete stradale italiana.

Rete	Strade corrispondenti secondo il Codice	
	In ambito extraurbano	In ambito urbano
a – rete primaria	Autostrade extraurbane, strade extraurbane principali	Autostrade urbane, strade urbane di scorrimento
b – rete principale	Strade extraurbane principali	Strade urbane di scorrimento
c – rete secondaria	Strade extraurbane secondarie	Strade urbane di quartiere
d – rete locale	Strade locali extraurbane	Strade locali urbane

Tabella 2 Classificazione generale delle strade

L'autostrada A21 può essere quindi classificata come autostrada extraurbana o urbana a seconda dell'ambito territoriale attraversato appartenente perciò alla rete primaria.

3.3.1 Corsie di marcia e di emergenza

Secondo il D.M. 05/11/2001 si definisce corsia la parte longitudinale della strada, normalmente delimitata da segnaletica orizzontale, di larghezza idonea a permettere il transito di una sola fila di veicoli. Si possono distinguere differenti tipologie di corsie, per quanto riguarda le autostrade si definiscono:

- corsia di marcia: corsia facente parte della carreggiata, destinata alla normale percorrenza dei veicoli;
- corsia di emergenza: corsia, adiacente alla carreggiata, destinata alle soste di emergenza, al transito dei veicoli di emergenza, ed eccezionalmente al movimento dei pedoni.

La normativa stabilisce anche le caratteristiche geometriche della piattaforma stradale, secondo la classificazione precedentemente illustrata.

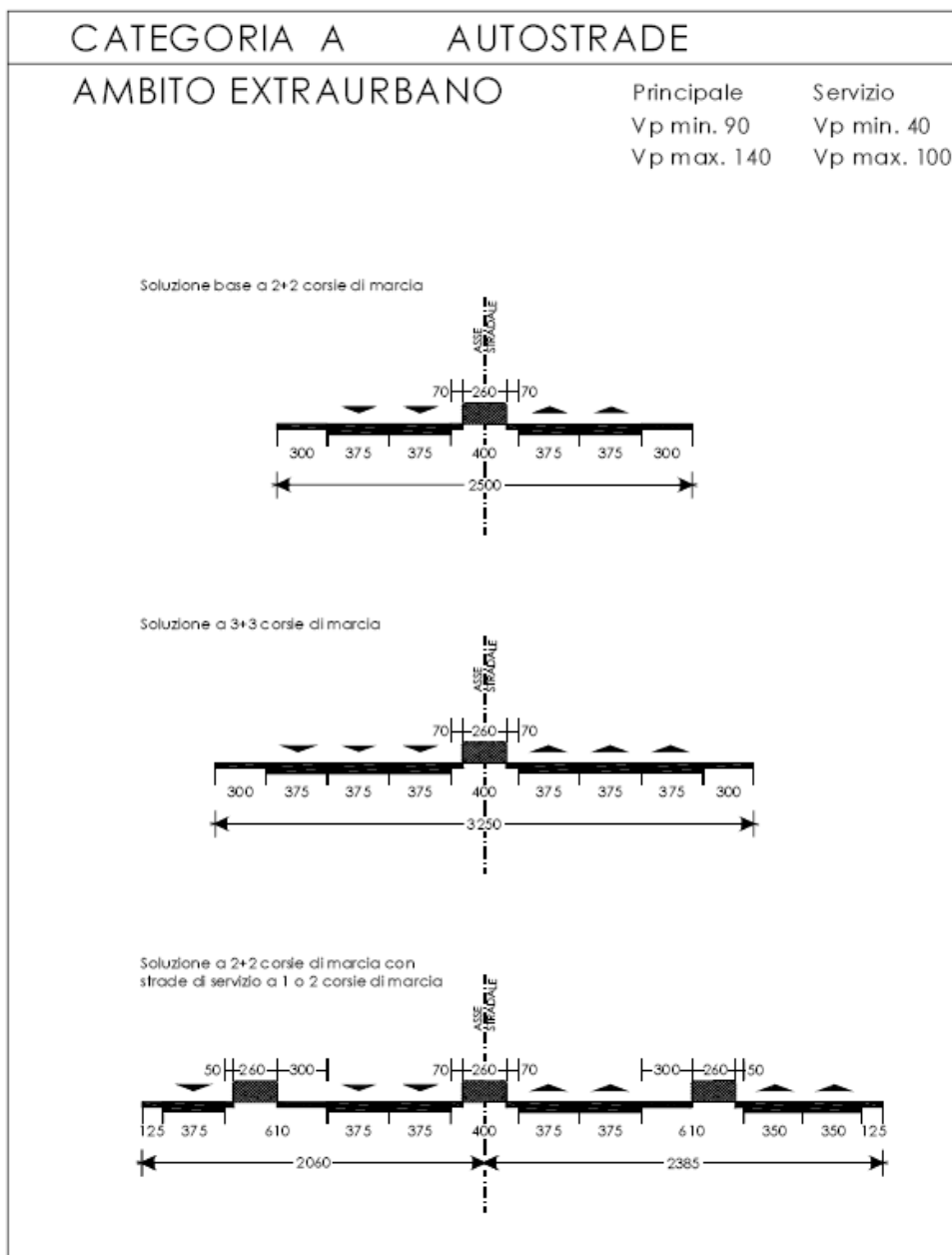




Figura 3 Caratteristiche geometriche sezioni stradali per strade di categoria A secondo D.M.05/11/2001


La quasi totalità del tracciato dell'autostrada A21 Torino - Piacenza è costituita da due corsie per senso di marcia larghe 3,75 metri (dal km 0+000 al km 2+800 e dal km 11+000 al km 164+610); solo dal km 2+800 al km 11+000 si ha la presenza di tre corsie per senso di marcia. È inoltre presente su tutta la lunghezza del tracciato una corsia di emergenza per senso di marcia di larghezza variabile tra 2,60 e 3,00 metri (Studer, Marchionni, Ponti, & Romanò, 2007).

Lungo il percorso sono presenti frequenti piazzole di sosta, una ogni 250 metri circa, oltre a numerose aree di fermata.

3.3.2 Punti di accesso ed uscita dall'autostrada

Sul tracciato dell'autostrada A21 nel tratto Torino - Piacenza sono presenti 16 punti di ingresso e di uscita, tre dei quali in corrispondenza delle interconnessioni autostradali  A26 Genova - Gravellona Toce, A7 Milano - Genova e A1 Milano - Napoli.

Lungo questo tratto è presente una sola barriera  a Villanova. La barriera a Piacenza è stata invece eliminata ed è stata realizzata la nuova stazione di Piacenza ovest negli anni 2006 -2008.

Tutte le stazioni di entrata e uscita , ad eccezione della stazione di Asti Est, sono definite ad "alta automazione" in quanto l'esazione del pedaggio avviene tramite piste telepass, Viacard e cash. In queste ultime, gestite da casse automatiche in grado di erogare i resti, gli utenti possono utilizzare denaro contante.

Per ciascuna di queste stazioni, al momento dell'ingresso e all'uscita al pagamento del pedaggio, vengono registrati i dati di traffico. Il sistema all'ingresso e all'uscita dei veicoli memorizza il codice delle stazioni, data e ora, classe veicolare; tali dati sono utili alla società SATAP S.p.A. per controllare il traffico sul tratto e per la gestione economica delle entrate derivate dall'utilizzo dell'infrastruttura.

Nella Tabella 3 si riportano tali punti con la loro progressiva chilometrica in direzione da Torino a Piacenza.

















Punti di ingresso e uscita A21 (direzione Torino – Piacenza)					
Numero	Codice stazione	Tipologia	Simbolo	Descrizione	Progressiva chilometrica
1		Svincolo		Santena	0+000
2	446	Entrata-Uscita		Villanova	10+275
3	445	Barriera		Villanova barriera	10+837
4	447	Entrata-Uscita		Asti ovest	32+534
5	448	Entrata-Uscita		Asti est	38+529
6	449	Entrata-Uscita		Felizzano	51+575
7	450	Interconnessione		A26	64+962
8	451	Entrata-Uscita		Alessandria ovest	65+751
9	452	Entrata-Uscita		Alessandria est	76+020
10	454	Interconnessione		A7	87+437
11	455	Entrata-Uscita		Voghera	101+329
12	456	Entrata-Uscita		Casteggio Casatisma	114+892
13	457	Entrata-Uscita		Broni Stradella	127+117
14	458	Entrata-Uscita		Castel San Giovanni	140+969
15	459	Entrata-Uscita		Piacenza ovest	157+441
16	461-462-463	Interconnessione		Fine tratta competenza A21 TO-PC e A1	164+627

Tabella 3 Punti di ingresso e uscita A21 tratto Torino – Piacenza

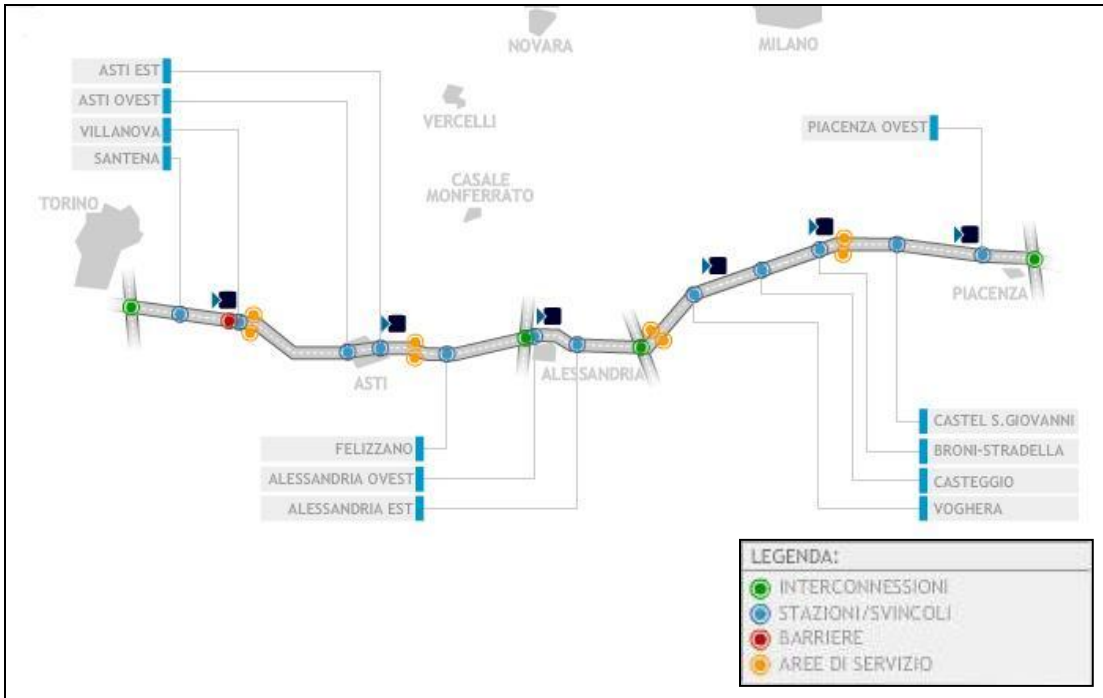


Figura 4 Stazioni di entrata e uscita A21 tratto Torino - Piacenza

3.3.3 Interconnessioni autostradali

Lungo il tratto Torino – Piacenza sono presenti due interconnessioni con altre autostrade:

- km 65+000 autostrada A26 direzione Genova e Gravellona Toce;
- km 87+400 autostrada A7 direzione Milano e Genova.

Queste interconnessioni consentono il rapido collegamento a nord con l'area Milanese e a sud con Liguria e Toscana.

A Piacenza, dove finisce la tratta di competenza della società SATAP, precisamente al km 165+000, si trova l'interconnessione con l'A1 "autostrada del Sole" che permette il collegamento con l'Italia centrale.



Figura 5 Localizzazione delle interconnessioni autostradali A21 tratto Torino - Piacenza

3.3.4 Aree di sosta e di parcheggio

Sull'autostrada A21 sono presenti 4 aree di servizio e 2 aree di sosta in entrambe le direzioni alle progressive indicate in Tabella 4 e in Tabella 5. In entrambe le tabelle si considera la direzione sud quella in cui il flusso veicolare si sposta da Torino verso Piacenza e la direzione nord quella inversa.

Aree di servizio A21					
Direzione	Numero	Progressiva chilometrica	Nome	Capienza veicoli	
				leggeri	pesanti
sud	1	13+052	Villanova sud	30	20
sud	2	48+810	Crocetta sud	40	28
sud	3	91+328	Tortona nord	20	15
sud	4	130+000	Stradella sud	50	40
nord	1	130+000	Stradella nord	30	10
nord	2	91+328	Tortona nord	30	15
nord	3	48+810	Crocetta nord	30	15

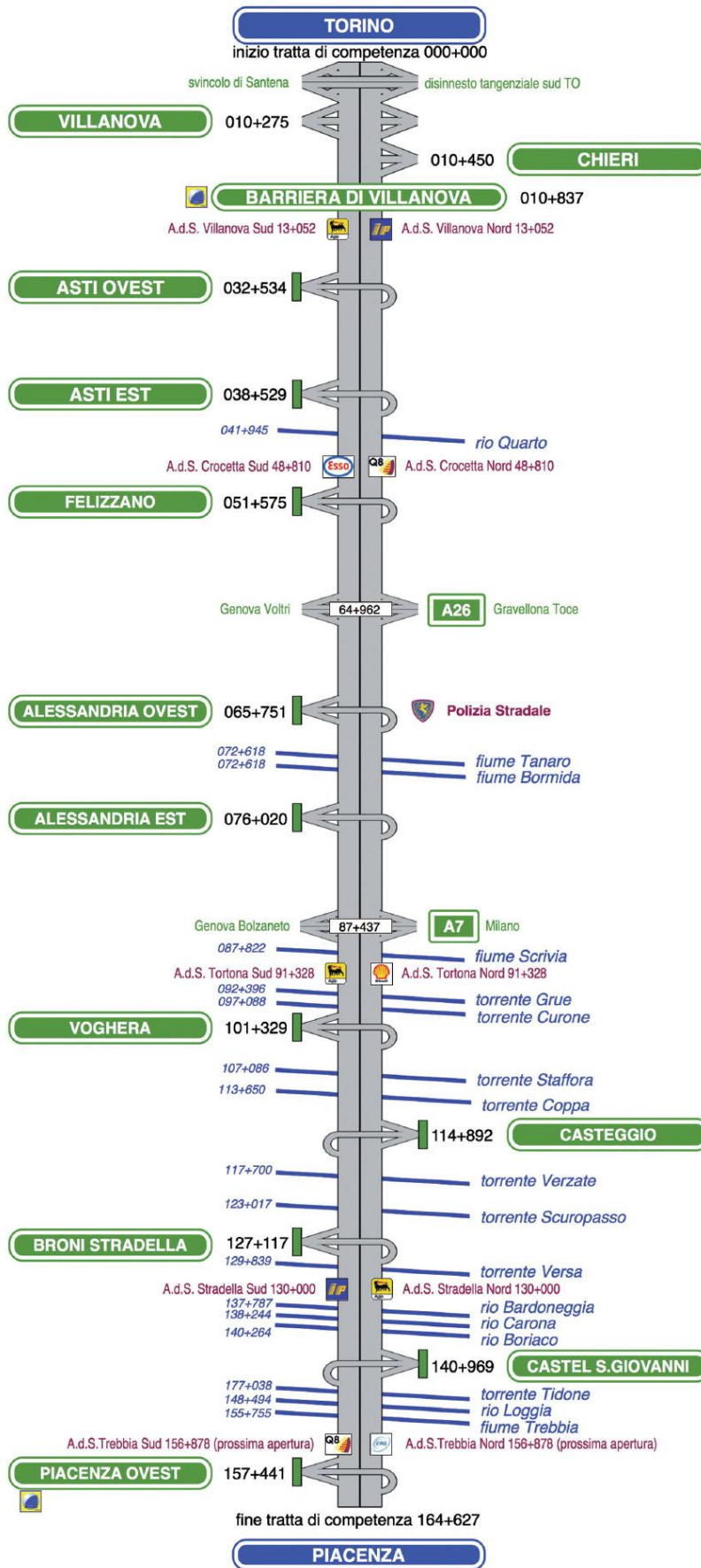
nord	4	13+052	Villanova nord	40	25
------	---	--------	----------------	----	----

Tabella 4 Aree di servizio A21 tratto Torino – Piacenza

Aree di sosta A21					
Direzione	Numero	Progressiva chilometrica	Nome	Capienza veicoli	
				leggeri	pesanti
sud	1	16+440	Coraudia sud	30	10
sud	2	76+860	Marengo sud	20	5
nord	1	114+892	Area attrezzata Casteggio	20	8
nord	2	16+440	Coraudia nord	30	10

Tabella 5 Aree di sosta A21 tratto Torino – Piacenza

Nella Figura 6 si mostra l'intero sistema dell'autostrada A21 Torino – Piacenza in cui si trovano localizzati: punti di accesso e uscita, interconnessioni autostradali, aree di sosta e di parcheggio.



TRONCO A21 TORINO - PIACENZA

Figura 6 Tronco autostrada A21 Torino - Piacenza

3.4 Pedaggio

3.4.1 Documenti di viaggio

Il rapporto che si instaura tra il cliente e la SATAP S.p.A. viene formalizzato alla Stazione di ingresso con il prelievo del biglietto o attraverso l'acquisizione dei dati di entrata dell'apparato Telepass, il sistema elettronico che permette il pagamento del pedaggio senza fermata.

L'ingresso in autostrada può avvenire sia dai propri caselli sia da quelli delle altre Concessionarie interconnesse, potendo il cliente attraversare in modo continuo tratti di autostrada gestiti da Società diverse, con un unico pagamento a destinazione.



Figura 7 Esempio di biglietto ordinario magnetico per il pagamento del pedaggio autostradale

Il biglietto ordinario contiene su banda magnetica i dati relativi alla stazione d'ingresso, il giorno, l'ora e, in dipendenza del tipo di impianto, anche la classe di entrata. Tali dati sono necessari per la corretta esecuzione della transazione di pagamento del pedaggio alla stazione di uscita.

In caso di smarrimento del biglietto viene emesso il Rapporto di Mancato Pagamento per il percorso corrispondente alla stazione interconnessa più lontana, così come previsto dall'Art.176 Comma 16 del vigente Codice della Strada.

Nei sistemi di esazione di tipo "aperto", ove il biglietto ordinario non viene rilasciato, la formalizzazione del contratto avviene all'atto del pagamento del pedaggio alla stazione di transito che controlla il tratto autostradale di competenza.

3.4.2 Classificazione tariffaria

Il pedaggio autostradale si calcola moltiplicando le tariffe unitarie specifiche delle tratte autostradali attraversate, approvate con Decreto Interministeriale, per i rispettivi chilometri percorsi. Il valore risultante dalla somma degli importi come sopra determinati, subisce un arrotondamento unico ai 10 centesimi di Euro. La tariffa unitaria è commisurata in base alle caratteristiche dell'infrastruttura (autostrada di pianura o di montagna), ed al tipo di veicolo utilizzato secondo il sistema di classificazione attualmente in uso e denominato "Assi - Sagoma".

In base a questo sistema il parco veicolare viene suddiviso in cinque classi utilizzando due parametri:

- la “Sagoma”, cioè l’altezza del veicolo misurata in corrispondenza dell’asse delle ruote anteriori. Con questo criterio vengono classificati tutti i veicoli a due assi che sono suddivisi in due classi;
- gli “Assi”, cioè il numero degli assi di costruzione del veicolo. Con questo criterio vengono classificati tutti i veicoli ed i convogli a tre o più assi che sono suddivisi nelle rimanenti tre classi.

Nella Tabella 6 si riporta la classificazione veicolare completa e in Figura 8 si mostrano alcuni esempi di veicoli associati alle cinque differenti classi.

Classe	Descrizione Classe	n. assi veicolo	Categoria	Descrizione estesa classe veicolo
1	A	2	L	Motocicli e veicoli 2 assi con altezza sul primo asse fino a 1,30 metri.
2	B	2	P	Veicoli a 2 assi con altezza sul primo asse oltre 1,30 metri.
3	3	3	P	Veicoli e convogli costruiti a 3 assi.
4	4	4	P	Veicoli e convogli costruiti a 4 assi.
5	5	5	P	Veicoli e convogli costruiti a 5 o più assi.

Tabella 6 Classi veicolari e loro descrizione secondo il sistema di riscossione del pedaggio



Figura 8 Esempi di veicoli appartenenti alle cinque classi veicolari

3.4.3 Il pagamento del pedaggio

Il pedaggio può essere pagato in contanti presso le porte presiedute da esattore o sulle casse automatiche. Nelle piste manuali sono accettate anche le principali valute straniere, con eventuale erogazione del resto in Euro.

Sul tronco A21 Torino - Piacenza, così come nella maggior parte della rete autostradale, è possibile anche l'utilizzo di sistemi di pagamento diversi dal contante.

Questi sistemi di pagamento sono:

- il Telepass utilizzabile in tutte le stazioni nelle porte caratterizzate dalla segnaletica orizzontale gialla e dall'apposito cartello;

- le Viacard a scalare d'importo o in conto corrente utilizzabili in tutte le porte, sia presiedute da esattore sia automatiche;
- le Carte di Credito convenzionate (Visa, Eurocard/Mastercard, Aura, American Express, Diners, Ressa), il Postamat e il Bancomat Fast-Pay sono utilizzabili in tutte le piste di esazione automatiche e manuali.

I pedaggi autostradali possono essere riscossi con il sistema di esazione di tipo “chiuso” o con il sistema di tipo “aperto”. Il sistema viene denominato “chiuso” quando il cliente ritira alla stazione di entrata il biglietto da consegnare all'uscita, affinché si determini il pedaggio; l'importo è calcolato in base alla classe del veicolo ed al percorso effettuato quale risulta dal biglietto di viaggio. Nel sistema di esazione “aperto” ogni stazione controlla un determinato tratto di autostrada. Il cliente, ogni volta che giunge ad una stazione, paga il pedaggio relativo al tratto di autostrada controllato dalla stazione stessa. In tale sistema viene meno pertanto la necessità del biglietto di viaggio, poiché il pedaggio è commisurato ad una percorrenza fissa e varia esclusivamente in funzione della classe di appartenenza del veicolo. L'autostrada A21 è un sistema di tipo chiuso.

Le piste delle stazioni autostradali sono ripartite in funzione del bacino di utenza e compatibilmente con gli spazi disponibili, in numero appropriato, tra manuali, casse automatiche, promiscue (telepass e tessere) e telepass dedicate.

3.5 Sistemi di gestione dell'infrastruttura

3.5.1 Centrale Operativa

La società di gestione di un'autostrada si occupa di fornire all'utenza il miglior servizio possibile in termini di assistenza e di mobilità sfruttando al massimo l'infrastruttura e gli strumenti ad essa integrati. A tale scopo operano direttamente in autostrada, 24 ore su 24, presso le sezioni operative, il Personale di esazione e gli Ausiliari della Viabilità, questi ultimi addetti a garantire in modo particolare la sicurezza degli utenti durante il tragitto.

Per quanto riguarda il tratto dell'A21 Torino – Piacenza il controllo è affidato alla Centrale Operativa (C.O.) presso la Direzione di Esercizio di Villanova d'Asti. La Centrale Operativa è il cuore del sistema, svolge un ruolo fondamentale nella raccolta, con strumenti informatici e/o radiotelevisivi, di dati ed informazioni su tutto quanto avviene in autostrada e presso le Stazioni, con smistamento conseguente di notizie e/o istruzioni ad operatori e clienti a seguito delle decisioni che vengono assunte nel rispetto delle vigenti procedure.

A questo scopo, la C.O. riceve le seguenti informazioni:

- le comunicazioni radio degli operatori autostradali;
- le chiamate di soccorso meccanico, sanitario ed antincendio;
- la situazione dei cantieri in opera;
- i rilievi del traffico;
- le condizioni ambientali.

La C.O. fornisce e disciplina le seguenti attività:

- informa e richiede l'intervento della Polizia Stradale e dei mezzi di soccorso propri (Servizio Traffico e Sicurezza) e/o esterni ;

- coordina gli interventi operativi e le attività di soccorso;
- informa i Centri di smistamento delle notizie sulla viabilità;
- risponde alle chiamate telefoniche dei clienti per informazioni sul traffico e sulle condizioni ambientali.

La Società esplica la propria attività di esercizio e gestione dell'infrastruttura cooperando con altri enti e soggetti, ognuno dei quali responsabile del proprio settore:

- la Polizia Stradale, che opera in permanenza in autostrada con i propri compiti istituzionali;
- le Società petrolifere e le Società di ristorazione, che provvedono all'erogazione dei servizi di carburante e di ristoro nelle aree di servizio;
- i Vigili del Fuoco, con i compiti di istituto;
- le Organizzazioni ACI e VAI EUROP ASSISTANCE per quanto riguarda il Soccorso meccanico;
- il 118, che garantisce il pronto intervento di uomini e mezzi per il soccorso sanitario.

La Centrale Operativa si avvale anche del supporto di 236 colonnine SOS dislocate, ogni 1500 metri circa, lungo tutto il tracciato di competenza TO-PC.

3.5.2 Pannelli a Messaggio Variabile

I Pannelli a Messaggio Variabile (PMV) sono tabelloni elettronici luminosi pensati per migliorare la comunicazione su strade e autostrade al fine di incrementarne la sicurezza. Visualizzando informazioni chiare, altamente visibili e aggiornabili in tempo reale, i PMV consentono di indicare ai conducenti comportamenti disciplinati in linea con il codice stradale, informano in tempo reale su situazioni pericolose, condizioni di traffico, tempi di percorrenza e condizioni meteo, permettono di programmare il viaggio con più efficienza e serenità, inoltre grazie alla loro versatilità si adattano a qualsiasi tipo di informazione pubblica che si rende necessario fornire all'utenza (AESYS Spa ITALIA,).

I pannelli a messaggio variabile sono suddivisi in due tipologie:

- Pannelli alfanumerici: visualizzano messaggi luminosi testuali su un numero di righe variabile a seconda delle necessità. Le applicazioni più tipiche riguardano pannelli di 3 righe per 24 caratteri ciascuna, o di 4 righe per 15 caratteri.
- Pannelli grafici full color: visualizzano i pittogrammi del codice della strada, affiancando i pannelli alfanumerici e completando i messaggi luminosi di testo con l'ausilio delle immagini, di immediata comprensione.

MATERIALI DISPERSI



VEICOLI FERMI IN AVARIA



EVENTI ATMOSFERICI

NEVE



Questi PMV segnalano che sta nevicando e l'attività dei mezzi antineve può causare rallentamenti.



La nevicata è forte e il traffico intenso può ostacolare gli spazzaneve causando possibili blocchi. È obbligatorio montare le catene o le gomme termiche.

NEBBIA



Attenzione! Presenza banchi di nebbia: adeguare velocità e distanza di sicurezza.

Figura 9 Esempio di PMV e spiegazione del messaggio fornito all'utenza

A seconda della posizione nella quale vengono installati, i pannelli a messaggio variabile si dividono ulteriormente in due categorie:

- pannelli in itinere, visibili durante la percorrenza di strade e autostrade;
- pannelli agli svincoli, posti in corrispondenza di svincoli stradali/autostradali.

La gestione dei pannelli a messaggio variabile è affidata al controllo della Centrale Operativa.

Lungo il tratto autostradale Torino – Piacenza sono stati installati nove PMV in itinere per senso di marcia. Nella Tabella 7 si riportano le caratteristiche tecniche relative a ciascuno, quali la progressiva, il numero di caratteri disponibili per la composizione del messaggio e la possibilità di inserire pittogrammi.

In Tabella 8 vengono riportati i dati relativi ai PMV in accesso all'autostrada, tali pannelli rivestono particolare importanza nel caso in cui risulti indispensabile informare l'utente di un particolare evento che interessa una determinata tratta e addirittura impedire l'accesso a tale tratta.

Pannelli a Messaggio Variabile in itinere previsti				
Direzione	Numero	Progressiva chilometrica	n. caratteri disponibili	Possibilità inserimento pittogrammi
sud	1	6+900	15	Si
sud	2	26+142	15	Si
sud	3	48+149	15	Si
sud	4	62+260	15	Si
sud	5	80+930	15	Si
sud	6	91+403	15	Si
sud	7	113+700	15	Si
sud	8	137+400	15	Si
sud	9	155+130	15	Si
nord	1	158+240	15	Si
nord	2	142+300	15	Si
nord	3	116+230	15	Si
nord	4	91+403	15	Si
nord	5	80+930	15	Si
nord	6	67+296	15	Si
nord	7	53+181	15	Si
nord	8	36+335	15	Si
nord	9	13+180	15	Si

Tabella 7 PMV in itinere A21 tratto Torino – Piacenza

Pannelli a Messaggio Variabile in accesso previsti					
Posizione	Numero	Localizzazione	n. caratteri disponibili	Possibilità inserimento pittogrammi	n. pannelli
In accesso	1	Asti ovest	20	No	2
In accesso	2	Felizzano	20	No	2
In accesso	3	Alessandria ovest	20	No	2
In accesso	4	Alessandria est	20	No	2
In accesso	5	Voghera	20	No	1
In accesso	6	Casteggio	20	No	2
In accesso	7	Broni	20	No	2

Tabella 8 PMV in accesso A21 tratto Torino - Piacenza

Nota bibliografica di fine capitolo

AESYS Spa ITALIA. Retrieved 01/08, 2010, from: http://www.aesys.it/prodotti/traffico/pannelli_a_messaggio_variabile.html

AISCAT Associazione Italiana Società Concessionarie Autostrade e Trafori. Retrieved 01/08, 2010, from: www.aiscat.it

Nuovo codice della strada, Decreto legislativo (1992).

Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade, Decreto Ministeriale del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti. (2001).

Satap S.p.A. Retrieved 12/19, 2009, from: www.satapweb.it

Studer, L., Marchionni, G., Ponti, M., & Romanò, D. (2007). Strumenti di previsione e di gestione dinamica del traffico sull'autostrada A21 Torino-Alessandria-Piacenza.

4. Modelli per il sistema di trasporto autostradale

Nel presente capitolo verranno introdotte le caratteristiche di diversi modelli sviluppati per la simulazione e l'analisi dei sistemi di trasporto. In modo particolare si focalizzerà l'attenzione sui quelle caratteristiche dei modelli che permettono lo studio del sistema di trasporto autostradale. Per tutti i modelli citati verranno esposte le peculiarità e i diversi ambiti di applicazione. Questa analisi dettagliata permetterà di giungere alla scelta del modello che meglio risponderà alle esigenze della presente tesi.

4.1 Introduzione

L'utilizzo di modelli di traffico per un sistema di trasporto consente la simulazione delle interazioni tra i vari elementi che costituiscono il sistema stesso.

Con il termine sistema di trasporto ci si riferisce al complesso delle infrastrutture, dei veicoli, degli operatori e anche all'insieme della normativa e dei regolamenti aziendali, che concorrono allo svolgimento delle attività di trasporto in un determinato ambito territoriale (Maja, 2008). Per effettuare un trasporto occorrono un mezzo di trasporto, più propriamente denominato veicolo, e una via di trasporto.

Il concetto elementare di via può essere generalizzato in quello più complesso di infrastruttura di trasporto. Essa è composta da elementi lineari, cioè la via vera e propria, e da elementi puntuali, tra i quali si possono distinguere i nodi terminali e i nodi di interscambio utili a favorire l'integrazione tra diversi sistemi di trasporto. L'insieme di via e nodi viene spesso denominato rete infrastrutturale o rete di trasporto.

Altro elemento fondamentale dei sistemi di trasporto, introdotto a causa dell'evoluzione dai sistemi elementari a quelli odierni più complessi, è l'organizzazione. Questo termine generico comprende i regolamenti, i sistemi per il controllo del traffico, la manutenzione, i sistemi per l'informazione all'utenza, ecc..

Gli elementi rappresentativi di un sistema di trasporto sono la domanda e l'offerta di trasporto.

Con il termine domanda di trasporto si definisce l'insieme degli utenti attuali o potenziali, espresso generalmente come flusso di spostamenti, che utilizzano il servizio offerto dal sistema di trasporto in un periodo di tempo. La domanda soddisfatta dal sistema si manifesta nei flussi di traffico circolanti sugli elementi infrastrutturali del sistema stesso.

L'insieme formato dagli elementi costituiti di un sistema di trasporto e dal servizio da esso prodotto viene definito offerta di trasporto. Nel caso del trasporto stradale l'offerta è costituita dall'insieme delle strade, caratterizzate dalle proprie caratteristiche fisiche e geometriche, e dalle loro prestazioni funzionali, per esempio le velocità di deflusso, i costi, ecc.. Nel trasporto collettivo l'offerta è costituita dall'insieme delle vie di trasporto, con le proprie caratteristiche fisiche e funzionali, dei veicoli messi a disposizione del pubblico e degli orari di esercizio.

Questi elementi, che costituiscono il sistema di trasporto, possono essere rappresentati attraverso particolari modelli, che permettono di simulare le loro caratteristiche e le loro interazioni reciproche (Cascetta, 2006).

I **modelli di domanda** simulano gli effetti rilevanti della domanda di mobilità in funzione del sistema delle attività e del livello di servizio fornito dal sistema di offerta. Le caratteristiche tipicamente rappresentate includono il numero di spostamenti nel periodo di riferimento (livello di domanda) e la loro distribuzione tra i diversi intervalli temporali all'interno del periodo, fra diversi punti del territorio, le diverse modalità di trasporto usate dall'utenza e i percorsi possibili.

La domanda di mobilità deriva dalla necessità degli utenti di svolgere attività in luoghi diversi. L'esigenza di spostarsi e le modalità del suo soddisfacimento sono determinate dalla configurazione del sistema delle attività e del sistema dell'offerta di trasporto nell'area considerata. Un modello di domanda può essere definito come una relazione matematica che consente di associare a un dato sistema di attività e di offerta di trasporto il valore medio del flusso di domanda in un determinato periodo di riferimento con le sue caratteristiche rilevanti. Un flusso di domanda è costituito da un'aggregazione di spostamenti individuali e ogni spostamento è il risultato di una serie di scelte compiute dall'utente del servizio di trasporto. Le scelte riguardano l'origine e la destinazione secondo le motivazioni dello spostamento, il percorso da seguire, la modalità di trasporto da utilizzare, ecc. È importante sottolineare che nei modelli di domanda entrano in gioco i comportamenti individuali che stanno alla base delle scelte dell'utente e perciò questi modelli riproducono solo in modo approssimato tale fenomeno reale.

La caratterizzazione spaziale degli spostamenti avviene suddividendoli per origine (O) e destinazione (D), si ottengono così le matrici dei flussi di domanda, chiamate matrici O-D. Tali matrici hanno un numero di righe e di colonne pari al numero delle zone fra le quali possono avvenire gli spostamenti, gli elementi contenuti nelle matrici rappresentano in numero di spostamenti che hanno origine nella zona O e destinazione nella zona D nell'unità di tempo.

		Zone di destinazione						
		1	2	3	4	5	6	7
Zone di origine	1	Spostamenti interni					Spostamenti uscenti	
	2							
	3							
	4							
	5							
	6	Spostamenti entranti					Spostamenti di attraversamento	
	7							

Tabella 9 esempio di matrice O-D e delle tipologie di spostamenti

Di seguito si elencano alcune possibili aggregazioni degli elementi della matrice O-D.

La somma degli elementi della o-esima riga rappresenta il totale degli spostamenti che partono dalla o-esima zona, nell'unità di tempo, e viene denominata flusso generato dalla zona o. Allo stesso modo la somma degli elementi della d-esima colonna rappresenta il totale degli spostamenti che arrivano nella d-esima zona, nell'unità di tempo, e viene denominata flusso attratto dalla zona d.

Si parla di spostamenti interni nel caso in cui l'origine e la destinazione dello spostamento sono zone interne all'area di studio, in particolare gli spostamenti che iniziano e terminano nella stessa zona sono detti intrazonali.

Per quanto riguarda gli spostamenti di scambio, si definiscono spostamenti entranti quelli in cui l'origine è esterna all'area studio e la destinazione è interna, e in maniera opposta si indicano gli spostamenti uscenti che hanno origine interna e destinazione esterna.

Gli spostamenti di attraversamento hanno sia origine che destinazione esterna all'area di studio, ma attraversano l'area e quindi utilizzano il sistema di trasporto.

I **modelli di offerta** rappresentano il servizio di trasporto fornito per lo spostamento da un punto denominato origine (O) ad un altro denominato destinazione (D). Tali modelli simulano le prestazioni delle infrastrutture di trasporto, i servizi offerti all'utenza e gli impatti esterni causati dagli spostamenti (inquinamento, consumo energetico, incidenti...). I modelli dell'offerta di trasporto combinano insieme i modelli della teoria del deflusso con quelli del deflusso su rete. I primi sono utilizzati per analizzare e simulare le prestazioni dei singoli elementi dell'offerta, i secondi per rappresentare la struttura topologica e funzionale complessiva del sistema. Gli elementi costitutivi di un modello di offerta di trasporto sono i seguenti:

- **Struttura della rete di trasporto.** La struttura può essere rappresentata mediante un grafo, definito da un insieme di archi o rami, elementi lineari che collegano tra loro una coppia di nodi o vertici. Il grafo definisce la topologia delle connessioni consentite tra gli elementi del sistema. Altri elementi fondamentali di un grafo sono i centroidi, nodi senza caratteristiche fisiche reali, ma necessari a individuare i punti di generazione e di attrazione della domanda di mobilità. Un percorso può essere allora definito come quella successione possibile di archi che collegano il centroide origine dello spostamento con il centroide destinazione. Un percorso è univocamente collegato ad una sola coppia O-D, mentre una coppia O-D può essere collegata mediante molti percorsi.
- **Flussi.** A ciascun arco può essere associato un flusso d'arco che rappresenta il numero di utenti che utilizzano quell'arco nell'unità di tempo. Differente è il flusso di percorso che rappresenta invece il numero di utenti che sceglie un determinato percorso per compiere lo spostamento O-D. Il flusso corrispondente ad un arco è dato dalla somma dei flussi di tutti i percorsi che comprendono l'arco stesso.
- **Variabili di prestazione e costi di trasporto.** A ciascuna delle fasi di uno spostamento possono essere associate alcune grandezze percepite dall'utente quali ad esempio il tempo di percorrenza, i costi monetari, il livello comfort, ecc. Tali variabili sono note come attributi di livello di servizio o di prestazione e in generale rappresentano la disutilità, monetarie o non, dell'utente che compie lo spostamento. Quindi il costo di trasporto riflette le disutilità percepite dall'utente durante lo spostamento.

- Funzioni di impatto. La progettazione e la valutazione di un sistema di trasporto richiedono la stima, oltre che delle funzioni di prestazione percepite dagli utenti, anche degli impatti da questi sopportati ma non percepiti nelle scelte di mobilità e degli impatti generati sui non utenti del sistema. Esempi di impatti sugli utenti non percepiti dagli stessi sono l'usura dei pneumatici, il consumo dei lubrificanti, il deprezzamento del veicolo, ecc. Gli impatti per i non utenti, definiti comunemente esternalità sono quelli che incidono sul mercato dei beni immobiliari, sulla struttura urbana, sull'economia e sull'ambiente (rumore e inquinamento atmosferico).

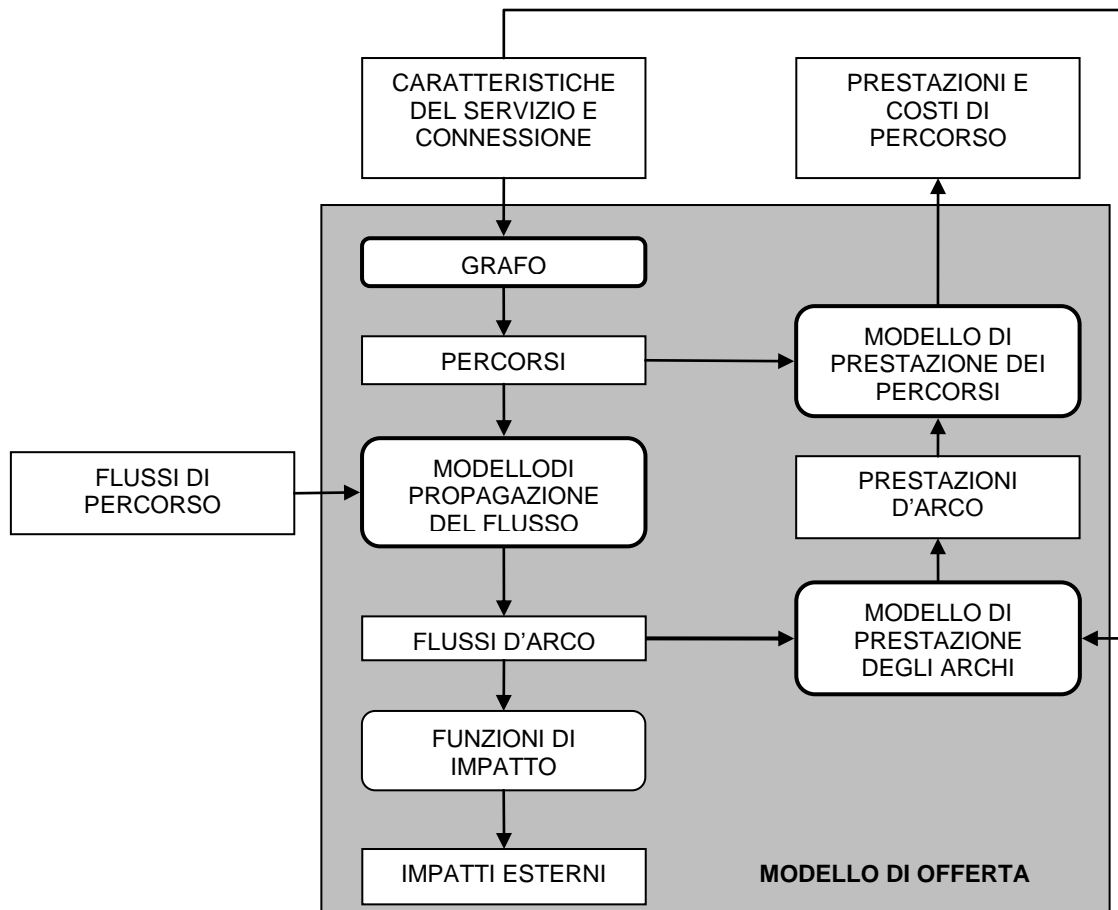


Figura 10 Rappresentazione schematica dei modelli di offerta

I **modelli di assegnazione** (o di interazione domanda offerta sulla rete) simulano come la domanda O-D e i flussi di percorso utilizzano i vari elementi del sistema di offerta di trasporto. Tali modelli consentono la determinazione dei flussi di arco, ovvero del numero di utenti che, in un dato periodo di riferimento, utilizza ciascun arco della rete, che rappresenta l'offerta di trasporto.

I modelli di assegnazione simulano l'interazione domanda-offerta e consentono di calcolare i flussi di utenti, come risultato dei flussi di domanda O-D, e le prestazioni per ciascun elemento del sistema di offerta.

I modelli di assegnazione consentono di combinare insieme i modelli di offerta e di domanda. Esiste infatti una dipendenza mutua fra domanda di trasporto, flussi e costi che può essere riprodotta dai modelli di assegnazione.

I modelli di assegnazione svolgono un ruolo centrale nella costruzione di un modello complessivo per la simulazione di un sistema di trasporto, in quanto esso si pone l'obiettivo di simulare lo stato di un sistema di trasporto. I risultati di tale simulazione costituiscono gli elementi su cui si basa la progettazione e/o la verifica del sistema studiato.

La configurazione del sistema simulata dai modelli di assegnazione dipende dalle ipotesi sul comportamento degli utenti e dal tipo di approccio utilizzato per lo studio delle interazioni domanda-offerta. I modelli di assegnazione possono essere classificati perciò secondo le diverse ipotesi.

Un elemento di classificazione dei modelli riguarda l'approccio utilizzato per lo studio dell'interazione domanda-offerta. In particolare esistono due approcci uno basato sull'assegnazione di equilibrio e uno sull'assegnazione di processo dinamico.

L'assegnazione di equilibrio può essere definita come lo studio delle configurazioni di equilibrio del sistema, cioè dalle configurazioni nelle quali i flussi di domanda, di percorso e di arco siano congruenti con i costi che da essi derivano. Dal punto di vista matematico tale assegnazione può essere definita come il problema di individuare un vettore di flussi che riproduca se stesso, sulla base della corrispondenza definita dai modelli di domanda e di offerta, risulta quindi un problema basato sulla teoria matematica dell'ottimizzazione. L'approccio alternativo all'equilibrio è quello dell'assegnazione di processo dinamico interperiodale. In questo caso si assume che il sistema occupi nel tempo differenti stati ammissibili per la variabilità del numero di utenti che si sposta, delle scelte di percorso, delle caratteristiche dell'offerta, ecc.; uno dei meccanismi di evoluzione da uno stato all'altro è rappresentato dal mutuo legame esistente tra domanda-flussi-costi.

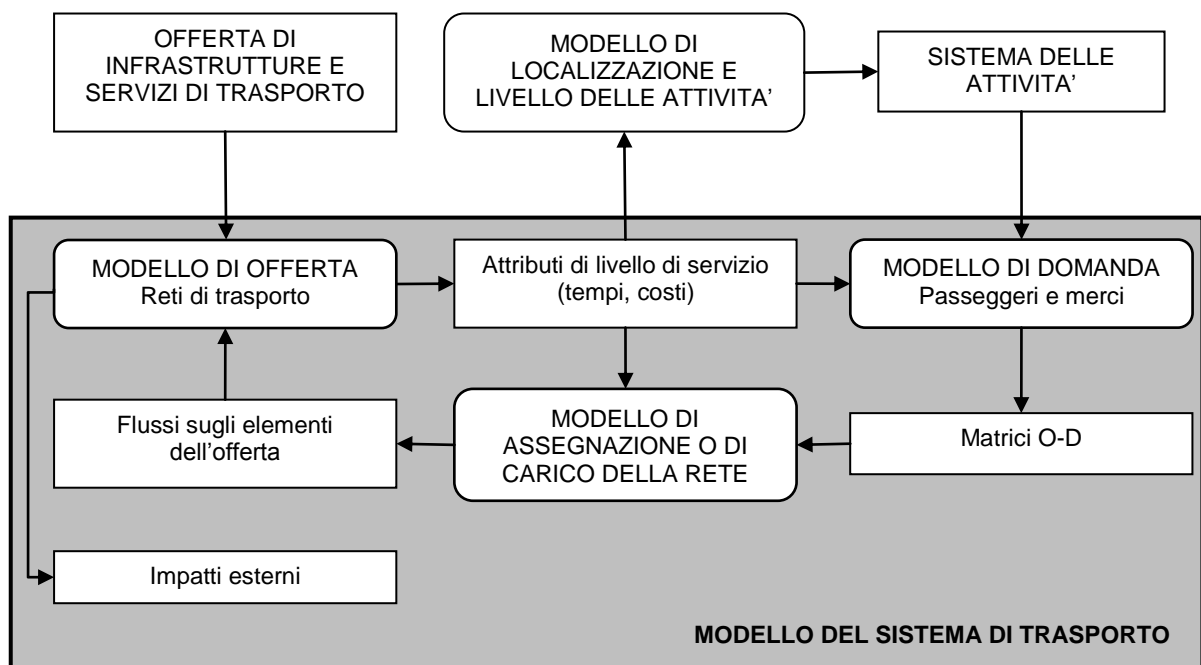


Figura 11 struttura dei modelli per la simulazione dei sistemi di trasporto

Le ipotesi generali su cui si basano i modelli descritti possono essere così sintetizzate:

- *Delimitazione fisica e funzionale del sistema.* Il sistema di trasporto si assume confinato all'interno di un ambito definito (area di studio) e l'ambiente esterno è

tenuto in conto unicamente attraverso le relazioni di domanda (domanda di scambio e attraversamento) e di offerta (infrastruttura e servizi di trasporto) con l'area di studio.

- *Discretizzazione dello spazio (zonizzazione).* Il territorio fisico sul quale si espletano la domanda e l'offerta di trasporto è suddiviso in unità discrete alle quali sono riferite tutte le grandezze socioeconomiche relative ad ogni zona. Si assume inoltre che i punti di partenza e arrivo di tutti gli spostamenti, che interessano una zona, siano concentrati in un unico punto detto centroide di zona.
- *Identificazione dei servizi di trasporto rilevanti.*
- *Identificazione dei periodi di simulazione rilevanti.* Tale ipotesi si riferisce alla definizione dell'ampiezza del periodo di analisi, alla selezione delle variazioni cicliche significative da modellizzare, e alla identificazione dei corrispondenti periodi di riferimento e di simulazione.
- *Ipotesi circa la variabilità intraperiodale.* L'approccio di stazionarietà intraperiodale ipotizza che la domanda di trasporto e l'offerta abbiano caratteristiche costanti durante un periodo di tempo abbastanza lungo da raggiungere condizioni stazionarie. Sotto questa ipotesi, le variabili significative assumono valori che sono indipendenti dall'istante di tempo di riferimento. In alternativa, i modelli con dinamica intraperiodale simulano esplicitamente come l'offerta e alcune dimensioni della domanda varino all'interno di ciascun periodo di riferimento.
- *Tipo di interazione domanda-offerta.* Nell'approccio di equilibrio, si assume che il sistema è in una configurazione di equilibrio nella quale i flussi di domanda, i flussi di percorso e i costi sono mutuamente consistenti. In alternativa è possibile adottare un approccio con dinamica intraperiodale per modellizzare le interazioni domanda-offerta, simulando esplicitamente l'evoluzione del sistema nei diversi periodi di riferimento.

4.2 Modelli all'equilibrio

I modelli di equilibrio forniscono in uscita una descrizione del funzionamento di stato stazionario del sistema di trasporto. L'invarianza nel tempo delle variabili che descrivono il funzionamento del sistema, consente di darne unicamente una rappresentazione che potremmo definire statica. L'assunzione dell'ipotesi di stazionarietà, che sta alla base dei modelli di equilibrio, non permette al modello di simulare il funzionamento interno del sistema e la sua evoluzione nel tempo. Con tale approccio allo stimolo di ingresso costituito dalla domanda O-D di mobilità si conosce esclusivamente la risposta del modello, cioè costi e flussi di percorso e quindi di arco. La risposta del modello risulta inoltre indipendente dalla storia precedente del sistema.

Il risultato dell'interazione tra domanda e offerta in un modello di equilibrio fotografa quella particolare condizione di funzionamento del sistema in cui flussi e costi di percorso sono mutuamente consistenti e stazionari. Tale configurazione potrebbe essere osservata nel mondo reale solo se domanda di trasporto, scelte di percorso e sistema di offerta rimanessero costanti per un periodo di tempo sufficientemente lungo, affinché il sistema possa raggiungere una condizione di funzionamento stazionario. Quindi, anche se

difficilmente osservabile nella realtà, l'assegnazione risultante può essere assunta come rappresentativa delle condizioni medie di funzionamento nel periodo di simulazione adottato.

È importante sottolineare che l'impossibilità dei modelli di equilibrio di rappresentare il funzionamento interno del sistema, impedisce di rappresentare la dinamica di importanti fenomeni, che possono caratterizzare il sistema di trasporto stradale, quali la creazione, propagazione e dissipazione delle code. Il fenomeno delle code si verifica nel sistema di trasporto stradale in seguito alla saturazione temporanea di un arco. Non sono inoltre rappresentabili gli effetti causati da una domanda o un'offerta non stazionarie (si vedano per esempio i picchi di domanda nelle ore di punta o le riduzioni temporanee della capacità di un arco), oppure gli effetti di tutte le strategie di controllo e informazione dell'utenza attuate in tempo reale.

4.3 Modelli con dinamica intraperiodale

I modelli con dinamica intraperiodale, chiamati anche modelli dinamici (in contrapposizione ai modelli statici introdotti nel paragrafo precedente) o indicati con l'acronimo DTA Dynamic Traffic Assignment, sono in grado di riprodurre le dinamiche interne al periodo di riferimento del sistema in esame.

La necessità di simulare esplicitamente il funzionamento interno del sistema e di riprodurre l'evoluzione nel tempo, porta a una sostanziale riformulazione dei modelli di equilibrio, relativamente ai modelli di domanda e, ancor di più, ai modelli di offerta. In modo particolare le semplici relazioni algebriche, valide sotto le ipotesi di stazionarietà, nei modelli dinamici vengono sostituite da equazioni differenziali che descrivono l'evoluzione nel tempo delle variabili del sistema.

La formulazione e la complessità dei modelli di domanda, di offerta e di assegnazione con dinamica intraperiodale dipendono dal tipo di sistema di offerta interessato. I servizi di trasporto e i corrispondenti modelli di offerta possono essere divisi in due classi principali: continui e discreti. Con il termine continui si indicano quei servizi disponibili in ogni istante e accessibili da luoghi arbitrari, come i servizi offerti dai modi stradali individuali. Con il termine discontinui si indicano quelli disponibili solo in certi orari e accessibili solo in luoghi specifici (stazioni, fermate, aeroporti, ecc.).

Il sistema di trasporto autostradale può essere classificato per quanto riguarda l'offerta come un sistema a servizio continuo.

La teoria dell'assegnazione dinamica dei flussi di traffico di un sistema dei trasporti (DTA) è estremamente importante per lo sviluppo dei sistemi di trasporto intelligenti ITS - Intelligent Transport System - (Jiang, Zhao, & Huang, 2008). I requisiti funzionali di un modello di assegnazione dinamica del traffico per le applicazioni relative agli ITS, possono essere suddivisi in due modi principali di utilizzo: l'utilizzo off-line e on-line (Florian, Mahut, & Tremblay, 2001). L'utilizzo off-line serve per la sperimentazione e la valutazione di una vasta gamma di misure di intervento prima di attuarle in pratica. L'utilizzo on-line serve come sistema di monitoraggio e controllo real-time della situazione di traffico. Questo secondo utilizzo sta alla base delle scelte delle misure di intervento da adottare a seconda delle condizioni reali di stato del sistema.

I modelli di offerta con dinamica intraperiodale per sistemi di trasporto con servizio continuo possono essere suddivisi, sulla base del modo di rappresentare il flusso degli utenti e quindi

del loro conseguente livello di dettaglio, in tre categorie: modelli macroscopici, mesoscopici e microscopici.

I modelli macroscopici sono basati sull'assimilazione del deflusso veicolare a quello di un fluido, rappresentano cioè il comportamento dei veicoli come appartenenti ad una corrente di traffico, i modelli mesoscopici rappresentano il comportamento di gruppi di utenti omogenei fornendo risultati aggregati e infine i modelli microscopici simulano il comportamento del singolo utente, analizzando le scelte dell'utente e le caratteristiche del singolo viaggio.

La scelta del modello da utilizzare è dettata dal livello di dettaglio richiesto dall'applicazione. È opportuno sottolineare come non necessariamente un modello di simulazione più dettagliato fornisca risultati più accurati. L'attendibilità dei risultati ottenuti infatti dipende dalla disponibilità dei dati reali sui quali calibrare i parametri del modello.

Risulta importante notare che i modelli dinamici macroscopici e mesoscopici presentano una struttura molto simile a quella dei modelli statici, con la differenza che il modello di propagazione del flusso dipende dalle prestazioni d'arco, cioè il numero di utenti su di un arco in un dato istante dipende dai tempi di viaggio necessari agli utenti a raggiungere quell'arco, che a loro volta dipendono dal numero di utenti incontrati sugli altri archi della rete negli istanti precedenti. Questa dipendenza circolare Figura 12 tra il modello di propagazione del flusso e di prestazione d'arco da origine al problema noto come *caricamento dinamico della rete*. I tempi di viaggio assumo dunque un duplice ruolo:

- rappresentano una parte del costo generalizzato percepito dall'utente durante il viaggio;
- costituiscono una variabile per le equazioni delle diverse componenti del modello.

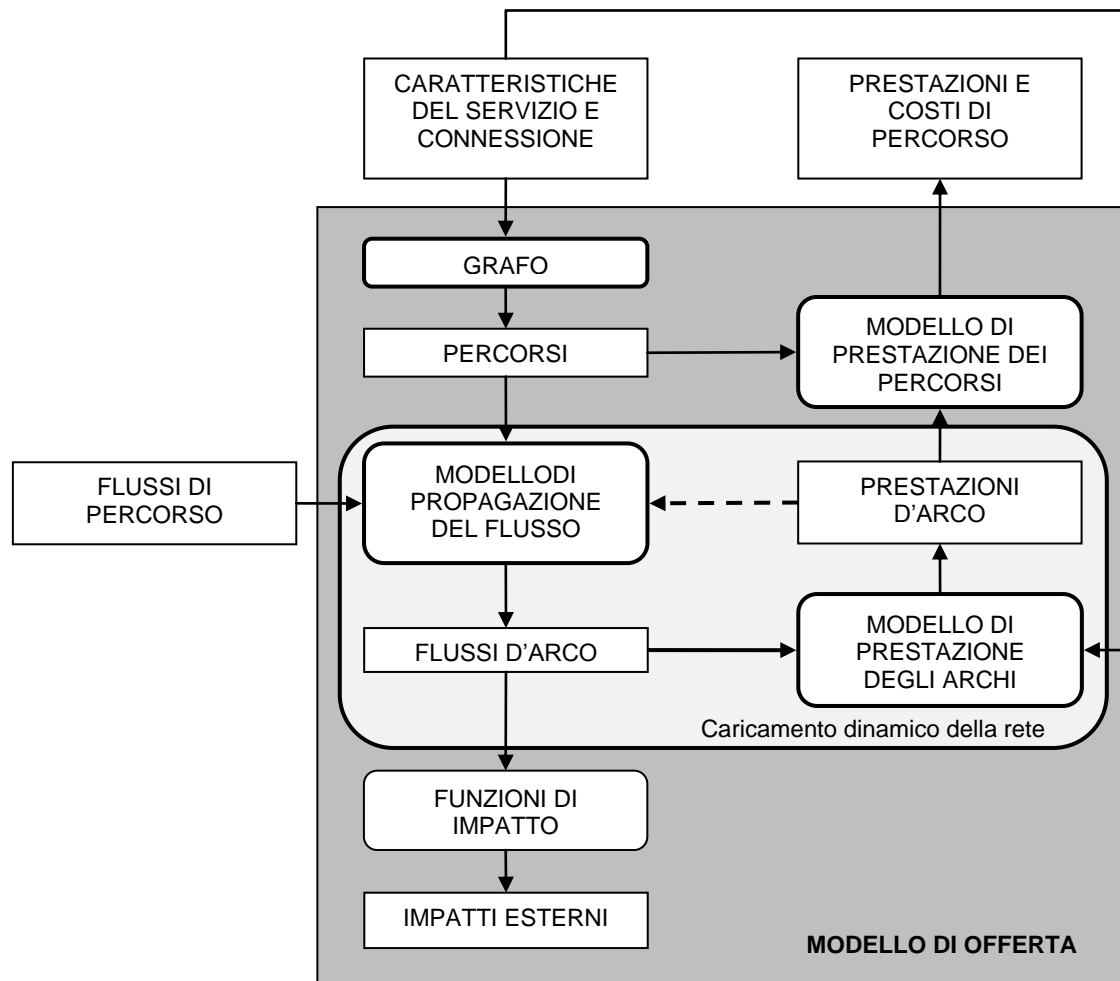


Figura 12 Modello di offerta con dinamica intraperiodale

4.3.1 Modelli macroscopici

Nella categoria dei modelli macroscopici con dinamica intraperiodale per sistemi di trasporto con servizio continuo rientrano tutti quei modelli, che rappresentano il deflusso stradale basandosi sull'analogia con il deflusso dei fluidi. In tale approccio i singoli veicoli sono trattati come un fluido continuo, per il quale possono definirsi in ciascun punto dello spazio e del tempo variabili quali la portata, la densità e la velocità.

I modelli macroscopici possono essere ulteriormente divisi, in base alla loro rappresentazione dello spazio, assumendo che il tempo sia trattato sempre in maniera continua, nei modelli spazio-continui e spazio-discreti. Nei modelli macroscopici spazio-continui le variabili di stato del sistema sono definite in ciascun punto dello spazio e del tempo. Invece i modelli spazio-discreti sono più vicini ai modelli statici: le variabili basilari che influenzano le prestazioni d'arco, quali densità o velocità, non variano lungo l'arco; e la loro risoluzione richiede la discretizzazione del tempo.

I modelli macroscopici sono particolarmente indicati per la simulazione del sistema stradale nella progettazione di strategie di controllo: la rappresentazione esplicita dello stato del sistema da essi consentita può essere infatti facilmente inclusa in schemi di ottimizzazione. Anche se funzione delle dimensioni della rete e delle capacità di elaborazione degli

apparecchi di calcolo utilizzati, il tempo di calcolo per tali modelli è sensibilmente inferiore al tempo reale, consentendone l'uso anche in applicazioni in tempo reale (on-line).

Negli ultimi anni sono stati sviluppati diversi lavori in merito all'utilizzo dei modelli macroscopici, come strumenti di sorveglianza e gestione del traffico, in applicazione on-line.

Uno di questi riguarda lo sviluppo di un modello stocastico per la valutazione dei flussi di traffico sulle autostrade (Boel & Mihaylova, 2006). Il tratto di autostrada da esaminare viene suddiviso in diverse sezioni nelle quali rilevare il numero dei veicoli in transito e la loro velocità puntuale. La lunghezza delle sezioni si assume pari a poche centinaia di metri e i dati di input per il modello vengono raccolti con intervalli di rilievo di pochi minuti. Il modello sviluppato si basa sulla definizione di due funzioni: una "sending function" che rappresenta quanti veicoli intendono lasciare la sezione i nell'intervallo di tempo Δt e una "receiving function" che rappresenta invece quanti veicoli possono entrare nella sezione $i+1$ nel medesimo intervallo di tempo Δt . L'elaborazione dei dati rilevati permette di determinare la velocità dei veicoli nella sezione e di stimare il tempo di percorrenza da essa derivante. Il tempo di viaggio sarà il risultato della somma dei tempi di percorrenza di ciascuna sezione.

Un altro studio noto in bibliografia è legato allo sviluppo di un modello macroscopico inserito in un software chiamato RENAISSANCE, recentemente utilizzato anche in Italia sull'autostrada A3 Napoli – Salerno (Wang, Papageorgiou, & Messmer, 2006). Anche in questo caso i dati di input del modello rilevati ad intervalli di una decina di secondi, nelle diverse sezioni di ampiezza di qualche centinaio di metri, sono il flusso di veicoli che attraversa una sezione, la loro velocità istantanea e la densità. Grazie alle elaborazioni matematiche del modello macroscopico il software è in grado di stimare in tempo reale le condizioni di traffico sull'autostrada e di predirne l'evoluzione, di fornire l'indicazione dei tempi di viaggio stimati e le informazioni sul fenomeno delle code. Tale strumento è inoltre in grado elaborare un allarme in caso di incidente sull'autostrada, mettendo così la società di gestione in condizione di attuare le dovute procedure di intervento.

Il modello illustrato in un ulteriore articolo (Vanajakshi, Williams, & Rilett, 2009) permette di stimare il tempo di viaggio sia in condizioni normali che di flusso congestionato, partendo dal rilievo dai flussi di traffico entranti e uscenti da una sezione. Tutta la tratta considerata deve essere suddivisa in sezioni di qualche centinaio di metri e il periodo di rilievo deve essere di pochi minuti. Attraverso la semplice equazione matematica di bilancio tra questi due flussi è possibile determinare il valore di un indicatore della condizione di densità di traffico nella sezione considerata. Tale valore serve per identificare la condizione di traffico libero o congestionato e quindi un diverso approccio matematico da utilizzare per la stima dei tempi di viaggio.

Tutti questi esempi di modelli macroscopici utilizzano come dati di partenza quelli rilevati nelle sezioni di rilievo nelle quali viene divisa la tratta autostradale esaminata. Nel nostro caso però non sarà possibile usare quest'approccio perché la società di gestione dell'autostrada A21 dispone unicamente dei dati di traffico rilevati ai caselli.

I modelli macroscopici possono in generale cogliere le evoluzioni nel tempo di un flusso di traffico nel suo insieme, ma non possono fornire alcun tipo di informazioni a riguardo delle caratteristiche di ogni singolo utente e di ogni singolo veicolo. Tali modelli risultano adatti alla simulazione del traffico su arterie autostradali, ma sono poco adatti alle applicazioni in ambito urbano, laddove le caratteristiche dell'utente ed in modo particolare le sue scelte

costituiscono informazioni importanti che il modello non può trascurare nella rappresentazione del sistema.

4.3.2 Modelli mesoscopici

I modelli mesoscopici rappresentano il deflusso stradale ad un livello di dettaglio del singolo veicolo (o di un gruppo di veicoli generalmente chiamato pacchetto). Per questi modelli la rappresentazione del flusso risulta discreta, ossia gli utenti sono unità discrete costituite da singoli veicoli o da gruppi di veicoli che si muovono congiuntamente sulla rete e sperimentano le stesse condizioni di viaggio, e il movimento di ciascun pacchetto dipende da leggi, che descrivono le relazioni tra le variabili aggregate del deflusso, come ad esempio la velocità media in funzione della densità.

Il modello mesoscopico utilizza per il calcolo della velocità di deflusso, di un pacchetto di veicoli, le espressioni che derivano dalle curve caratteristiche di deflusso, che descrivono le relazioni tra la velocità media di viaggio, il rapporto flusso/capacità e la densità veicolare (Jiang et al., 2008).

La simulazione di un sistema di trasporto attraverso un modello mesoscopico rappresenta un compromesso tra la scelta di un sistema macroscopico e quella di un sistema microscopico. Solitamente il modello mesoscopico utilizza modelli di capacità, modelli di accodamento dei veicoli e modelli velocità/densità per descrivere l'evoluzione del deflusso dei veicoli nel tempo. Risulta quindi necessario disporre dei dati necessari alla calibrazione dei parametri di questi sottomodelli affinché essi possano fornire simulazioni quanto più vicine alla realtà (Florian et al., 2001).

I modelli mesoscopici simulano le prestazioni della rete ad un livello aggregato utilizzando, come nei modelli a spazio discreto e flusso continuo, variabili aggregate quali capacità, flusso e densità. Il traffico è rappresentato, in maniera discreta, tracciando gli spostamenti dei singoli pacchetti, caratterizzati da un determinato istante di partenza e da un determinato percorso, e generalmente assunti concentrati in un punto. Tale ipotesi è tanto più realistica quanto più è piccola la dimensione dei pacchetti.

In generale i modelli mesoscopici possono essere applicati a reti generiche ed essere estesi alla simulazione di fenomeni di formazione e propagazione all'indietro delle code con accettabili tempi di calcolo, tuttavia, non permettono una simulazione dettagliata delle caratteristiche dei singoli veicoli (sorpassi, cambi di corsia, ecc.) e dei comportamenti dei singoli utenti.

Come per i modelli macroscopici anche i modelli mesoscopici possono essere utilizzati in applicazioni on-line, per la simulazione in tempo reale delle condizioni di traffico e per la previsione della loro possibile evoluzione. I modelli mesoscopici richiedono la calibrazione di un numero maggiore di parametri rispetto ai modelli macroscopici.

4.3.3 Modelli microscopici

I modelli microscopici descrivono i movimenti dei singoli veicoli come risultato di scelte individuali disaggregate e delle interazioni con gli altri veicoli e con l'ambiente stradale. Le scelte compiute da ogni singolo utente vengono modellizzate esplicitamente.

Nei modelli microscopici ciascuna entità del flusso ha caratteristiche proprie che possono includere: le caratteristiche del veicolo (tipo di veicolo, informazioni sul viaggio...), prestazioni (massima accelerazione, massima velocità...) e le caratteristiche del conducente (tempo di reazione, velocità desiderata...) ecc.

Il modello macroscopico studia il fenomeno del traffico da un punto di vista globale, senza entrare nel dettaglio delle interazioni tra i singoli veicoli. Un modello microscopico invece studia il fenomeno del traffico partendo dal singolo veicolo e analizzando come esso interagisce con gli altri veicoli. Tale modello è in grado di simulare il comportamento dinamico di un singolo veicolo.

Il modello microscopico può essere considerato come l'insieme di due modelli uno in grado di descrivere i comportamenti dell'utente e uno le caratteristiche del veicolo. Il modello del comportamento dell'utente ha come obiettivo quello di simulare il reale comportamento dell'utente, in funzione delle condizioni di traffico in cui esso si trova, questo modello è solitamente basato sulla definizione di alcuni criteri decisionali che permettono di descrivere quali sono le scelte fatte dall'utente, e come e quando queste vengono prese. Il modello delle caratteristiche del veicolo cerca di descriverne il comportamento modificando alcuni parametri fondamentali quali la direzione, l'accelerazione e la frenatura ecc. in accordo con quelle che sono le scelte dell'utente. Ad esempio un veicolo accelera per assumere la velocità desiderata dall'utente e che egli cerca di mantenere, e decelera quando l'utente percepisce il pericolo della collisione con un ostacolo o con il veicolo che lo precede (Maroto, Delso, Felez, & Cabanellas, 2006).

Il modello microscopico basato sulla simulazione del comportamento dei singoli utenti e delle caratteristiche dei veicoli necessita di numerosi parametri che ne descrivono lo stato e per questo richiede la disponibilità di elevate risorse computazionali per la sua calibrazione. È perciò necessario scegliere di sviluppare un modello microscopico laddove sia necessario simulare lo stato di un sistema di trasporto e la sua evoluzione, senza prescindere dall'utilizzare informazioni relative al comportamento dell'utente e alle caratteristiche del veicolo.

La calibrazione dei parametri di un modello microscopico dovrà essere eseguita in maniera tanto più dettagliata quanto più si desidera che il risultato del modello sia attendibile, cioè vicino alla realtà, per questo motivo tale operazione potrà rivelarsi molto onerosa.

Bisogna tenere presente che nei modelli di simulazione microscopica i tempi di calcolo si incrementano notevolmente col crescere del numero di veicoli da simulare e delle dimensioni della rete, restringendo generalmente il loro uso ad applicazioni di verifica off-line.

L'esperienza acquisita attraverso l'utilizzo dei modelli microscopici di traffico mostra sia i loro vantaggi che i loro svantaggi. Attraverso tali modelli è possibile infatti rappresentare il comportamento dei singoli conducenti e le prestazioni dei veicoli, questa potenzialità però si scontra con la complessità della logica di simulazione derivata dai modelli comportamentali e con l'elevato numero di parametri che devono essere calibrati, che rendono l'uso dei modelli microscopici oneroso dal punto di vista di calcolo (Florian et al., 2001).

Nota bibliografica di fine capitolo

Boel, R., & Mihaylova, L. (2006). A compositional stochastic model for real time freeway traffic simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40(4), 319-334.

Cascetta, E. (2006). *Modelli per i sistemi di trasporto: teoria e applicazioni*. Torino: UTET università.

Florian, M., Mahut, M., & Tremblay, N. (2001). A hybrid optimization-mesoscopic simulation dynamic traffic assignment model. *2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Proceedings, August 25, 2001 - August 29*, 118-121.

Jiang, Z., Zhao, M., & Huang, Y. (2008). A novel algorithm for parametric calibration of speed-density relationships in mesoscopic traffic simulator. *7th World Congress on Intelligent Control and Automation, WCICA'08, June 25, 2008 - June 27*, 7060-7063.

Maja, R. (2008). *Sistemi e servizi di trasporto*. Politecnico di Milano: Laboratorio Mobilità e Trasporti - Dipartimento IN.D.A.CO.

Maroto, J., Delso, E., Felez, J., & Cabanellas, J. M. (2006). Real-time traffic simulation with a microscopic model. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 7(4), 513-526.

Vanajakshi, L. D., Williams, B. M., & Rilett, L. R. (2009). Improved flow-based travel time estimation method from point detector data for freeways. *Journal of Transportation Engineering*, 135(1), 26-36.

Wang, Y., Papageorgiou, M., & Messmer, A. (2006). RENAISSANCE - A unified macroscopic model-based approach to real-time freeway network traffic surveillance. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 14(3), 190-212.

5. Modello scelto

Nel capitolo quattro sono stati descritti differenti modelli presenti in letteratura che possono essere utilizzati per simulare il funzionamento di un sistema di trasporto. Da un'analisi critica delle loro caratteristiche, dei loro campi di applicazione e del grado di dettaglio di descrizione dei fenomeni interni al sistema, si è scelto di utilizzare, in accordo con gli obiettivi prefissi per questo lavoro di tesi, un modello mesoscopico con dinamica intraperiodale.

Il modello mesoscopico presenta un livello di dettaglio di descrizione del flusso, all'interno della rete del sistema di trasporto, intermedio tra quello dei modelli macroscopici e microscopici. I primi rappresentano il flusso in maniera continua secondo l'analogia idrodinamica, i secondi si soffermano al livello di dettaglio del singolo veicolo che compone la corrente veicolare. Nei modelli mesoscopici, invece, la rappresentazione del traffico avviene in maniera discreta, il flusso cioè non risulta continuo, ma suddiviso in gruppi di veicoli. Tali modelli descrivono lo spostamento di un gruppo di veicoli, identificato con il termine pacchetto, al quale vengono associati i valori delle variabili di descrizione del deflusso (densità, velocità). Essi permettono inoltre di simulare gli effetti delle interazioni che avvengono tra i diversi pacchetti che transitano contemporaneamente sulla rete, tralasciando i fenomeni di interazione tra i veicoli costituenti lo stesso pacchetto. Questo secondo livello di dettaglio risulta poco interessante, in quanto il presente lavoro non intende indagare tali fenomeni.

La scelta di sviluppare un modello mesoscopico è stata effettuata considerando la possibilità di utilizzarlo in un'applicazione on-line con lo scopo di consentire alla società competente il controllo e la gestione del traffico sull'infrastruttura autostradale oggetto dell'analisi.

Il modello mesoscopico con dinamica intraperiodale è in grado di fornire una descrizione dell'evoluzione nel tempo delle condizioni di deflusso sull'infrastruttura. Questa possibilità risulta molto importante per rispondere all'obiettivo di questo lavoro di conoscere la condizione di deflusso sull'autostrada sia al tempo reale che durante un intervallo previsionale scelto. Questa possibilità è garantita dall'utilizzo di un modello di assegnazione dinamica del traffico - DTA -, che consente di procedere al carico dei flussi sulla rete secondo successivi passi temporali in cui viene suddiviso l'orizzonte di simulazione. Il modello sviluppato avrà perciò non solo una descrizione in forma discreta del flusso, ma anche del tempo. Verranno definiti per questo un orizzonte di simulazione, ossia un periodo che il modello simula per determinare i flussi futuri presenti sulla rete e i tempi di percorrenza del tratto di infrastruttura, un intervallo temporale in cui i veicoli in ingresso verranno raggruppati in pacchetti e un passo di simulazione utilizzato per seguire lo spostamento dei pacchetti sulla rete durante l'orizzonte.

Il funzionamento del modello mesoscopico, che verrà spiegato nei dettagli nel successivo capitolo, prevede la definizione dell'unità base del modello, cioè i pacchetti di veicoli, aventi caratteristiche univoche quali l'intensità, l'istante di ingresso sull'infrastruttura e la loro destinazione. I pacchetti che si muovono sulla rete contemporaneamente sperimenteranno le medesime condizioni di viaggio, a causa dell'interazione fra loro simulata dal modello. Lo spostamento dei pacchetti all'interno dell'infrastruttura è descritto attraverso le curve di deflusso, ossia secondo relazioni matematiche che legano le variabili di deflusso - densità, velocità e flusso -. I parametri di tali relazioni dovranno essere ottenuti attraverso il procedimento della calibrazione sulla base di dati reali acquisiti in sito, al fine di assicurare una buona simulazione delle condizioni reali da parte del modello.

6. Formulazione del modello scelto

6.1 Introduzione

In questo capitolo si vuole spiegare in dettaglio la formulazione del modello scelto per il conseguimento degli obiettivi prefissi, quali:

- determinazione della distribuzione dei flussi di traffico presenti in tempo reale sulla rete infrastrutturale;
- determinazione della distribuzione nel breve periodo dei flussi previsti, associata alla stima dei tempi di viaggio.

Allo scopo di raggiungere suddetti obiettivi è necessario sviluppare un modello di previsione a breve termine che permetta di definire lo stato presente e futuro del sistema di trasporto, ossia flussi, densità, velocità, tempi di percorrenza relativi al traffico che interessa la rete infrastrutturale.

Di seguito si descrive la struttura del modello di previsione utilizzato (Figura 13), che presenta al suo interno il modulo di assegnazione con dinamica intraperiodale (Chirico P., Di Gangi M., 2000).

I dati in ingresso del modello illustrato sono i seguenti:

- offerta di trasporto - dati relativi alla struttura topologica della rete di trasporto ed alle funzioni di costo;
- domanda di trasporto - informazioni storiche sulla domanda di trasporto tra le coppie OD (Origine-Destinazione);
- domanda di trasporto - informazioni in tempo reale sui flussi di traffico.

Al termine delle elaborazioni il modello fornisce l'evoluzione nel periodo di simulazione dello stato del sistema, cioè i flussi di traffico circolanti sulla rete infrastrutturale, e i tempi di percorrenza futuri che potranno essere utilizzati nel servizio di informazione all'utenza.

La caratterizzazione dei tempi di percorrenza, o della velocità, dipende dalle condizioni di circolazione sull'infrastruttura, cioè dall'intensità del flusso presente nelle singole tratte autostradali (Camus & Longo, 2000), per questo motivo risulta necessaria l'applicazione di un modello di assegnazione dinamica di mobilità DTA, in grado di fornire la progressiva evoluzione delle condizioni di traffico all'interno dell'intervallo di simulazione.

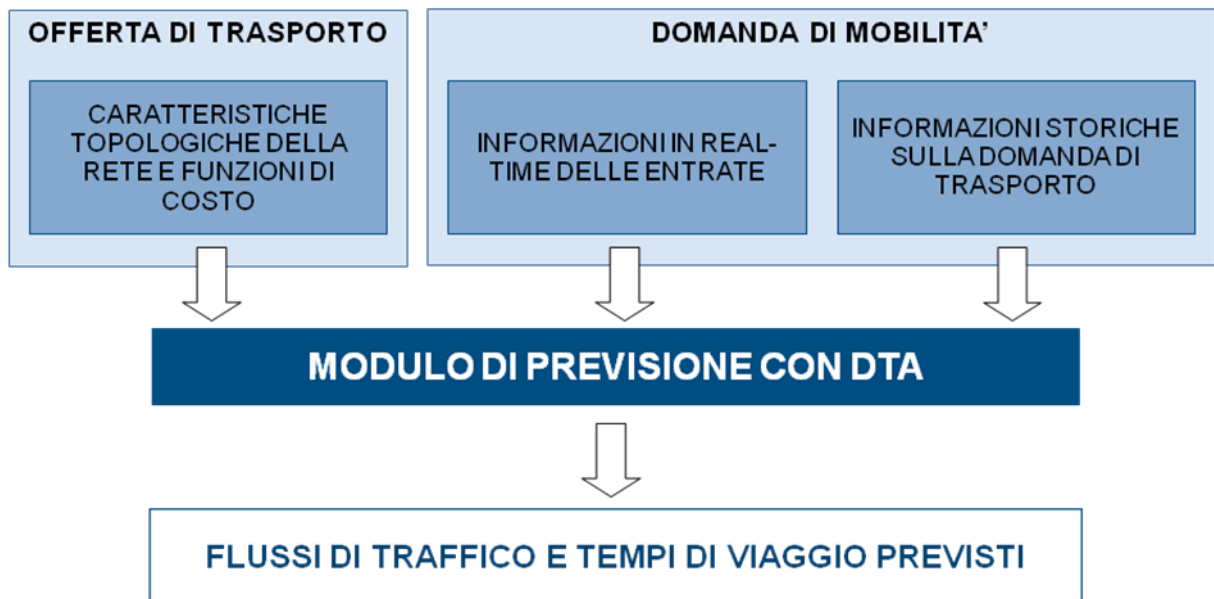


Figura 13 Struttura generale del modello di previsione

Il modello formulato sarà in grado di aggiornare la base dei dati storici relativi alla domanda di mobilità con i dati raccolti in tempo reale. La stima della domanda storica deve essere effettuata sui dati di traffico registrati in un periodo, pari ad almeno un anno, antecedente al momento di utilizzo del modello. Questo è necessario perché la domanda di mobilità è strettamente legata agli sviluppi socio-economici del territorio e quindi subisce variazioni anche significative nel tempo. Utilizzare dati di traffico - domanda storica - registrati diversi anni prima dell'utilizzo del modello può comportare errori nella stima della domanda futura. Al fine di evitare tali errori si prevede la sostituzione periodica dei dati della domanda storica con quelli registrati nel periodo più recente. Su questa base di dati aggiornata vengono svolte le operazioni di analisi ed elaborazione per la determinazione della domanda futura. Questo continuo aggiornamento della base di dati della domanda storica permetterà al modello di fornire una simulazione della realtà sempre più aderente ad essa.

Il modello sviluppato del quale si farà di seguito una descrizione teorica è alla prima fase di implementazione e potrà essere ulteriormente affinato e sviluppato per giungere all'effettiva applicazione in campo reale. La formulazione del modello, seppure ancora in fase iniziale di studio è già supportata da una simulazione della sua applicazione alla realtà.

È necessario inoltre notare fin da ora che i dati a disposizione per lo sviluppo di questo modello erano limitati. Ciò però non ha precluso la possibilità di formulare il modello nella sua completezza e soprattutto facendo in modo che negli sviluppi futuri possa essere utilizzato per una base di dati più completa ed esaustiva.

6.2 Dati di ingresso del modello

6.2.1 Offerta di trasporto

L'offerta di trasporto è formata dall'insieme dagli elementi costitutivi del sistema e dal servizio da esso prodotto. Nel caso del sistema di trasporto autostradale la rete è costituita dagli archi delimitati agli estremi dai caselli di ingresso e uscita, e il servizio offerto può essere rappresentato attraverso modelli di deflusso costituiti dalle funzioni di deflusso che relazionano le caratteristiche della circolazione dei veicoli quali flusso, densità e velocità.

Per quanto riguarda la rete infrastrutturale si può definire il tratto autostradale A21 TO-PC come una successione di archi di lunghezza variabile, delimitati alle estremità da nodi che rappresentano i punti di accesso e uscita dei veicoli dall'autostrada. Ciascun arco sarà bidirezionale, percorribile cioè dai veicoli in due direzioni, ossia nella direzione ovest-est cioè da Torino a Piacenza e nella direzione est-ovest da Piacenza a Torino. Coerentemente con la descrizione dell'infrastruttura fornita nel terzo capitolo si illustrano le caratteristiche degli elementi della rete. La totalità degli archi presenta due corsie per senso di marcia. La larghezza di una corsia è pari a 3,75 metri. Su tutta la tratta è presente la corsia di emergenza di larghezza variabile tra 2,60 e 3,00 metri.

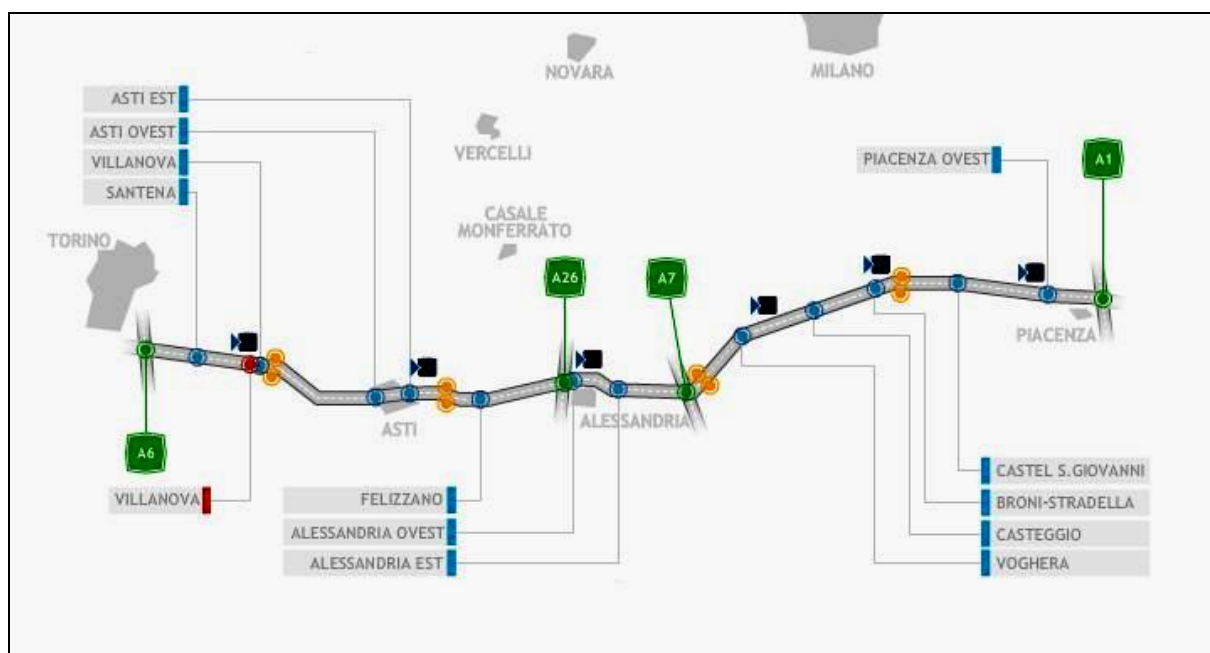


Figura 14 Tracciato A21 Torino - Piacenza

Nella Tabella 10 vengono riportate le caratteristiche di ciascun arco. Gli archi vengono indicati con i nomi dei nodi che li delimitano.

Nome arco	Lunghezza [m]	n. corsie per direzione	Larghezza corsia [m]
445-447	21.700	2	3,75
447-448	6.250	2	3,75
448-449	12.850	2	3,75
449-450	13.400	2	3,75
450-451	1.000	2	3,75
451-452	10.000	2	3,75
452-454	11.400	2	3,75
454-455	13.900	2	3,75
455-456	13.600	2	3,75
456-457	12.000	2	3,75
457-458	14.000	2	3,75
458-459	16.500	2	3,75
459-461	7.600	2	3,75

Tabella 10 Caratteristiche degli archi della rete

Dei nodi della rete sono noti il codice numerico identificativo e la progressiva misurata dall'inizio dell'autostrada a Torino, barriera di Villanova.

Nome stazione	Nome nodo	Progressiva [m]
Villanova Barriera TO	445	0
Asti ovest	447	21.700
Asti est	448	27.950
Felizzano	449	40.800
Innesto A26	450	54.200
Alessandria ovest	451	55.200
Alessandria est	452	65.200
Innesto A7	454	76.600
Voghera	455	90.500
Casteggio – Casatisma	456	104.100
Broni – Stradella	457	116.100
Castelsangiovanni	458	130.100
Piacenza ovest	459	146.600
Innesto A1	461	154.200

Tabella 11 Nodi della rete e loro progressiva

Unitamente alle caratteristiche fisiche della rete, l'offerta di trasporto deve essere descritta attraverso le sue caratteristiche funzionali. La funzione di un'infrastruttura di trasporto è quella di permettere uno spostamento tra due punti collegati dall'infrastruttura. Tale spostamento avviene secondo determinate leggi dettate dalle condizioni fisiche

dell'infrastruttura, dalle condizioni ambientali esterne – ad esempio le condizioni meteorologiche – e dalle condizioni di traffico – ossia dalle interazioni che nascono dalla presenza sulla rete di più di un veicolo.

Per questi motivi è necessario definire un modello dell'offerta di trasporto che combini insieme i modelli della teoria del deflusso con quelli del deflusso su rete. I primi sono utilizzati per analizzare e simulare le prestazioni dei singoli elementi dell'offerta, i secondi per rappresentare la struttura topologica e funzionale complessiva del sistema (Cascetta, 2006).

I modelli di deflusso hanno una duplice funzione:

- simulare le prestazioni del servizio di trasporto offerto all'utente;
- partecipare all'interno dei modelli di assegnazione, alla simulazione dei flussi che nel periodo di riferimento impegnano i diversi elementi del sistema.

Sono rappresentati da relazioni matematiche generali, dette funzioni di costo, che legano costi e flussi di trasporto su una rete (Sala, Podestà, & Maja, 1999). Le funzioni di costo considerano le seguenti voci:

- tempo di percorrenza che deve essere determinato tramite curve di deflusso;
- consumi di energia;
- comfort e rischio;
- costi monetari.

Per gli obiettivi del lavoro di tesi è necessario elaborare un modello di offerta che sia in grado di fornire unicamente informazioni relative ai tempi di viaggio, perciò le altre voci di costo non verranno considerate.

I modelli derivati dalla teoria del deflusso simulano gli effetti delle interazioni tra i veicoli che utilizzano contemporaneamente la stessa infrastruttura di trasporto. Questi modelli sono differenti a seconda che il deflusso sia ininterrotto oppure interrotto. Sono strade in deflusso ininterrotto quelle il cui flusso veicolare non subisce arresti per cause ad esso estranee: è esclusa la presenza di elementi esterni atti ad interrompere il deflusso (semafori o intersezioni a precedenza); eventuali interruzioni dovute ad incidenti, congestione e fenomeni di stop and go sono interne al flusso stesso che quindi è ancora in condizioni ininterrotte. Sono in condizioni di flusso interrotto quelle strade in cui sono frequenti gli arresti delle correnti veicolari per la presenza di elementi che impongono periodiche interruzioni al deflusso indipendentemente dal volume di traffico esistente (Sala et al., 1999). Il deflusso ininterrotto è quello tipico delle autostrade, perciò di seguito verranno espresse le relazioni di deflusso ad esso relativo.

La scopo per cui è necessario utilizzare le curve di deflusso veicolare è quello di conoscere in un preciso intervallo temporale dove si trovano i pacchetti di veicoli, unità base di traffico del modello mesoscopico, e in quale modo si stanno muovendo all'interno della rete. Le curve di deflusso permettono di relazionare il tempo di viaggio con le variabili di traffico – densità, velocità, flusso.

Per una maggiore flessibilità delle curve di deflusso e quindi una migliore simulazione delle condizioni reali di deflusso è possibile scegliere tra:

- modelli a singolo regime: la formulazione analitica di una curva vale per tutto il campo di variabilità della densità;

- modelli a regime multiplo: la formulazione è diversa a seconda della densità.

I modelli a regime multiplo sono stati introdotti perché spesso una sola formulazione della curva risulta più adeguata a simulare il deflusso in certe condizioni di densità piuttosto che altre, quindi la differenziazione della formulazione permette di simulare il deflusso con maggior aderenza alla realtà (Sala et al., 1999).

Le variabili delle relazioni di deflusso sono il flusso, la densità e la velocità.

Si definisce flusso (o portata), indicato con il simbolo f , il numero di transiti veicolari registrati in una sezione in un intervallo di tempo.

Si definisce velocità, indicata con il simbolo v , la velocità determinata come media delle velocità istantanee dei veicoli registrate nell'intervallo di osservazione.

Si definisce densità, indicata con il simbolo k , il numero di veicoli presenti nella sezione durante l'intervallo di tempo.

In condizioni stazionarie tra flusso, densità e velocità vale l'equazione stazionaria di conservazione:

$$f = kv$$

eq. 1 equazione stazionaria di conservazione

Le relazioni tra le variabili di deflusso possono essere rappresentate attraverso il diagramma fondamentale del deflusso:

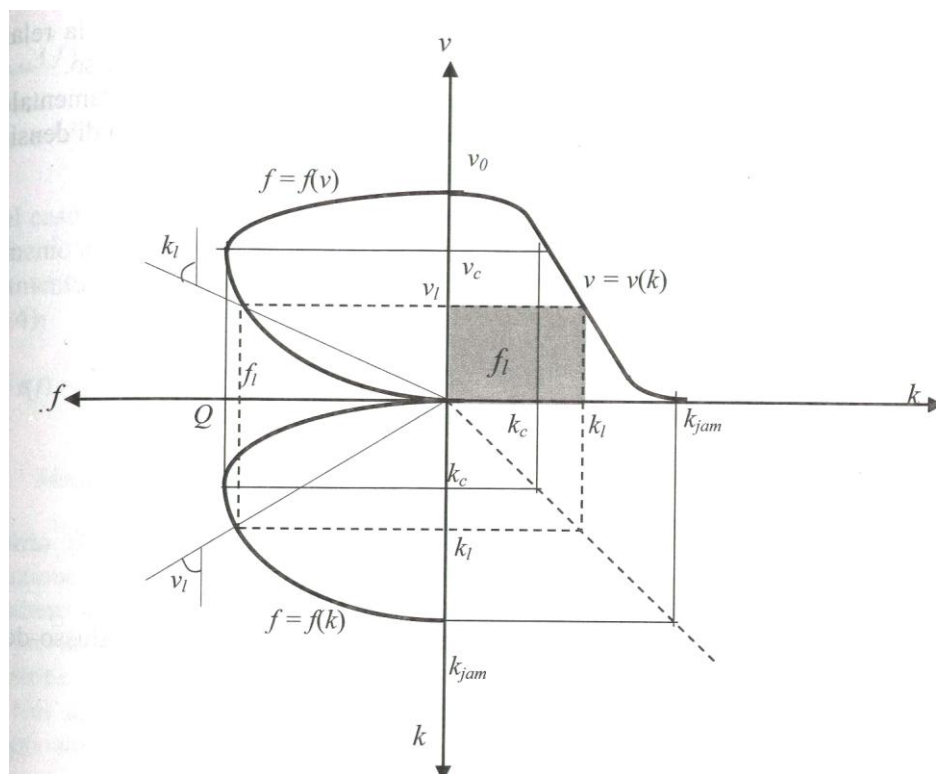


Figura 15 Diagramma fondamentale del deflusso

Da questo diagramma, benché sia solo una rappresentazione modellistica delle osservazioni sperimentali, si può osservare che il flusso può essere prossimo a zero in due condizioni:

quando la densità è prossima a zero (assenza di veicoli) o quando la velocità è prossima a zero (i veicoli sono fermi), che corrisponde in realtà ad una condizione di arresto-partenza (fenomeno stop and go). Nel primo caso la velocità assume il valore massimo (teorico) e viene definita velocità a flusso nullo v_0 , mentre nel secondo la densità assume il valore massimo (teorico) e viene definita densità di blocco (jam density) k_{jam} . Il massimo della relazione velocità-flusso si verifica in corrispondenza del flusso massimo, o capacità Q , che può attraversare la strada; i corrispondenti valori di velocità e densità sono detti velocità critica v_c e densità critica k_c .

Pertanto, ogni valore di flusso (eccetto la capacità) si può verificare in due condizioni differenti: bassa velocità e alta densità oppure alta velocità e bassa densità. La prima conduce ad un regime instabile in quanto un aumento della densità causa una diminuzione della velocità e quindi del flusso; si determina così un accumulo di veicoli e un ulteriore aumento della densità fino al blocco del deflusso. Viceversa la seconda condizione determina un regime stabile in quanto un aumento della densità determina una riduzione della velocità e quindi un aumento del flusso.

Queste considerazioni mostrano che in generale il flusso non può essere adottato come unica variabile per descrivere le condizioni di deflusso; la densità, o la velocità, invece descrive sempre la condizione di traffico prevalente in modo univoco, quindi la relazione velocità-densità, $v = v(k)$, è preferita per lo studio delle caratteristiche del deflusso ((Cascetta, 2006)).

La scelta di considerare principalmente il legame velocità-densità è supportato da una duplice motivazione: tale legame è, per corrispondenza al fenomeno reale del deflusso, monotonamente decrescente ed implica una relazione matematica più semplice di quelle connesse alle altre due coppie di variabili, portata-densità e velocità-densità; inoltre la funzione $v = v(k)$ rappresenta in modo diretto l'interazione tra i veicoli in una corrente di traffico dove gli utenti percepiscono, tramite il mutuo distanziamento dei veicoli, la densità e ad essa adeguano la velocità di marcia (Raffaele, 2005).

Dalla conoscenza della velocità mantenuta da un certo flusso f su un generico arco stradale di lunghezza L è possibile conoscere il tempo mediamente impiegato dai veicoli a percorrere tale arco. Ovviamente questo tempo di percorrenza dipenderà a sua volta dal modello scelto per descrivere la funzione $v = v(f)$.

La scelta delle curve di deflusso, con le quali descrivere lo spostamento dei veicoli sull'infrastruttura, può avvenire solo successivamente ad una analisi di quanto presente in letteratura relativo a studi svolti sull'argomento. È necessario considerare le differenti curve studiate per analizzarne il funzionamento nelle differenti condizioni di traffico e capirne l'applicabilità al contesto specifico che si sta studiando.

L'approccio più completo che fornisce risultati maggiormente aderenti alle reali condizioni di deflusso sul tratto di autostrada analizzato sarebbe quello di andare a determinare la curva di deflusso attraverso la raccolta di informazioni in sito, quali la velocità dei veicoli, il flusso di veicoli attraverso una sezione, ecc. procedendo così alla stima diretta della curva.

Un secondo approccio può essere quello di utilizzare delle relazioni empiriche correggendo i valori forniti da tali leggi per condizioni ideali di infrastruttura e di traffico, attraverso

coefficienti di correzione scelti sulla base delle reali caratteristiche dell'infrastruttura. L'Highway Capacity Manual (HCM 2000) dell'American Association of State Highway Officials (AASHO), testo di riferimento riconosciuto e usato internazionalmente in campo autostradale, fornisce una curva sperimentale di deflusso ottenuta nelle condizioni prevalenti di strada e traffico degli stessi, determinata nelle condizioni ideali:

- larghezza delle corsie non minore di 3,60 m;
- distanza tra il bordo della carreggiata di destra ed il più vicino ostacolo laterale (larghezza della banchina) non minore di 1,80 m;
- distanza tra il bordo della carreggiata di sinistra ed il più vicino ostacolo laterale non minore di 0,60 m;
- corrente di traffico composta da sole autovetture;
- cinque o più corsie per direzione (solo in ambito urbano);
- svincoli distanziati di almeno 3 km;
- strada pressoché pianeggiante con pendenze longitudinali < 2%;
- utenti in massima parte abituali;
- buone condizioni meteorologiche e di visibilità;
- andamento planimetrico che consente una velocità di libero deflusso ≥ 110 km/h.

La curva di deflusso è determinata in via sperimentale e quindi va corretta con opportuni coefficienti al fine di adattarla alle condizioni reali. I dati da conoscere sulla base dei quali correggere la curva sperimentale fornita sono riassunti nella Tabella 13. La relazione fornita dall'HCM è legata ai livelli di servizio (LdS) che definiscono le differenti condizioni di circolazione in cui può avvenire il deflusso sull'infrastruttura.

I livelli di servizio in ambito autostradale possono essere così definiti:

- A: condizioni di flusso libero con totale assenza di condizionamento tra i veicoli;
- B: condizioni di deflusso con qualche limitazione alla libertà di manovra, ma ancora con elevate condizioni di comfort fisico e psicologico;
- C: maggiori condizionamenti; per mantenere la velocità desiderata occorrono cambi di corsia e/o sorpassi piuttosto frequenti che richiedono notevole attenzione da parte degli utenti;
- D: il flusso è ancora stabile, ma la libertà di manovra è notevolmente ridotta ed è basso il livello di comfort fisico e psicologico degli utenti;
- E: i condizionamenti sono pressoché totali ed i livelli di comfort sono scadenti; il limite inferiore di questo livello corrisponde alla capacità; le condizioni di deflusso sono al limite della instabilità;
- F: condizioni di flusso forzato con frequenti ed imprevedibili arresti della corrente, si verificano fenomeni di stop and go.

Livelli di servizio	Densità (veicoli/km/corsia)
A	0-7
B	7-11
C	11-16
D	16-22
E	22-28
F	>28

Tabella 12 Livelli di servizio secondo HCM

Velocità di progetto	km/h	Dipende dalla classe di strada
Pendenza massima	%	Da rilevare sulla strada
Larghezza corsia	m	Misura diretta
Numero corsie	adim	Dipende dalla classe di strada
Distanza dagli ostacoli dal ciglio carreggiata	m	Misura
Percentuale autocarri	%	Misura
Percentuale veicoli ricreazionali	%	Misura
Percentuale autobus	%	Misura
Tipo di conducente		Abituale, domenicale, turista
Lunghezza tratto considerato	km	Misura

Tabella 13 Caratteristiche reali dell'infrastruttura per la determinazione dei parametri di correzione della curva HCM

	L.d.S.				
	A	B	C	D	E
VFL=120 km/h					
Massima densità (vett/km/corsia)	7	11	16	22	28
Minima velocità (km/h)	120,0	120,0	114,6	99,6	85,7
Max Q/C	0,35	0,55	0,77	0,92	1,00
Massima portata di servizio (vett/h/corsia)	840	1320	1840	2200	2400
VFL=110 km/h					
Massima densità (vett/km/corsia)	7	11	16	22	28
Minima velocità (km/h)	110,0	110,0	108,5	97,2	83,9
Max Q/C	0,33	0,51	0,74	0,91	1,00
Massima portata di servizio (vett/h/corsia)	770	1210	1740	2135	2350
VFL=100 km/h					
Massima densità (vett/km/corsia)	7	11	16	22	28
Minima velocità (km/h)	100,0	100,0	100,0	93,8	82,1
Max Q/C	0,30	0,48	0,70	0,90	1,00
Massima portata di servizio (vett/h/corsia)	700	1100	1600	2065	2300
VFL=90 km/h					
Massima densità (vett/km/corsia)	7	11	16	22	28
Minima velocità (km/h)	90,0	90,0	90,0	89,1	80,4
Max Q/C	0,28	0,44	0,64	0,87	1,00
Massima portata di servizio (vett/h/corsia)	630	990	1440	1955	2250

Tabella 14 Valori di densità, velocità, rapporto portata/capacità e portata per diverse VFL e per ciascun LdS (HCM 2000)

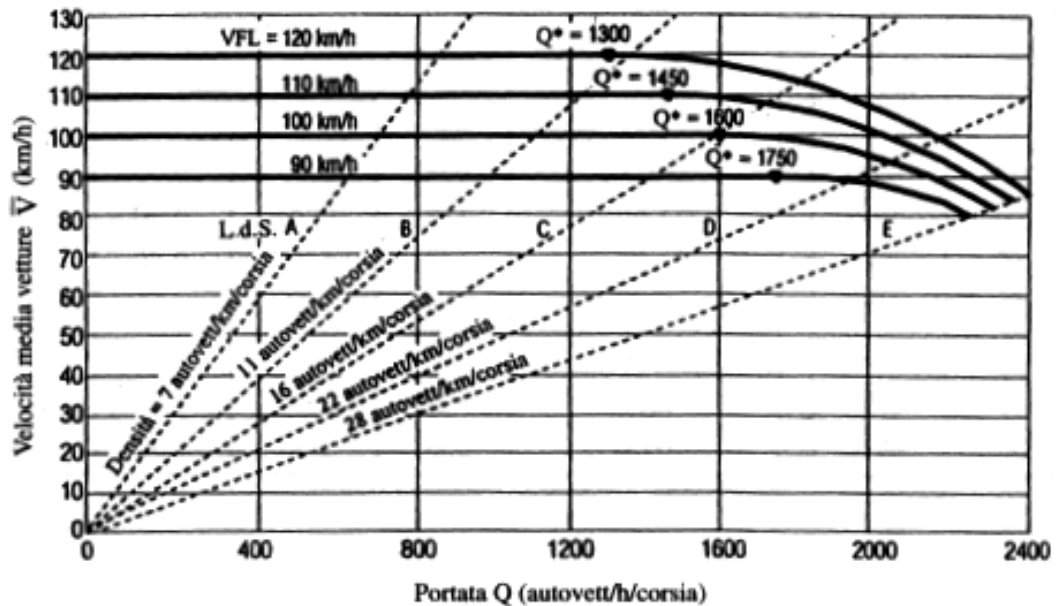


Figura 16 Curve flusso-velocità per diversi valori di VFL (HCM 2000)

Sempre nell'ambito delle curve di deflusso sperimentali si trova la relazione di Cascetta (1998). Tale legge fornisce un legame tra il costo del trasporto (che coincide con il tempo di percorrenza dell'arco) e i parametri flusso e velocità. L'approccio proposto da questa relazione però non tiene conto del ramo instabile.

$$tr(f) = \frac{L}{v_0} + \alpha \left(\frac{L}{v_c} - \frac{L}{v_0} \right) \left(\frac{f}{C} \right)^\beta$$

eq. 2 Relazione del tempo di viaggio fornita da Cascetta

Velocità libero deflusso	km/h
Velocità critica	km/h
Capacità massima della strada	veic/km
Parametro α	Adim
Parametro β	Adim

Tabella 15 Parametri dell'equazione di Cascetta

Vanno calibrati i parametri α e β su dati raccolti in sito al fine di adattare l'equazione formulata per condizioni ideali alla situazione reale dell'infrastruttura considerata.

I due differenti modelli analizzati, per quanto riguarda l'approccio sperimentale, permettono di descrivere il deflusso in ambito autostradale nelle condizioni di flusso stabile, le due relazioni presentate possono essere utilizzate previa la conoscenza di alcuni parametri. Data la limitazione dell'utilizzo di queste curve in determinate condizioni di flusso, la numerosità dei parametri da conoscere relativi alle caratteristiche dell'infrastruttura e la stima di alcuni di essi da effettuare con dati rilevati in sito, tali relazioni non verranno utilizzate nel lavoro di tesi svolto.

Curva	Parametri da conoscere	
HCM	Velocità di progetto	10
	Pendenza massima	
	Larghezza corsia	
	Numero corsie	
	Distanza dagli ostacoli dal ciglio carreggiata	
	Percentuale autocarri	
	Percentuale veicoli ricreazionali	
	Percentuale autobus	
	Tipo di conducente	
	Lunghezza tratto considerato	
Cascetta	Velocità libero deflusso	5
	Velocità critica	
	Capacità massima della strada	
	Parametro α	
	Parametro β	

Tabella 16 Elenco dei parametri delle curve di deflusso sperimentali HCM e Cascetta

Il terzo ed ultimo approccio che permette la determinazione delle relazioni di deflusso è quello analitico. Nel corso degli anni sono state sviluppate differenti equazioni in grado di rappresentare il deflusso dei veicoli nell'ambito di deflusso ininterrotto conoscendo un numero limitato di parametri. Tali parametri non sono tutti indipendenti tra loro, ma è sufficiente fissarne alcuni perché gli altri si determinino di conseguenza.

v_0	v_c	Q_{max}	k_c	k_{jam}
[km/h]	[km/h]	[veic/h]	[veic/km]	[veic/km]
Velocità a libero deflusso VFL	Velocità a carico (critica)	Capacità della strada	Densità critica (ottima)	Densità di congestione

Tabella 17 Parametri delle relazioni analitiche di deflusso

Modello lineare semplice di Greenshields (1934):

$$v(k) = v_0 \left(1 - \frac{k}{k_{jam}} \right)$$

eq. 3 Modello lineare di Greenshields

In questo modello la velocità è funzione lineare della densità. Fornisce una buona rispondenza tra valori reali e simulati per densità medie. I parametri da conoscere sono la velocità di libero deflusso v_0 e la densità di congestione k_{jam} (densità di congestione tra 125 e 200 veic/km). La curva ha problemi di rigidità in quanto la densità ottima deve essere pari alla metà della densità di congestione. La velocità a carico si assume pari alla metà di quella a flusso libero.

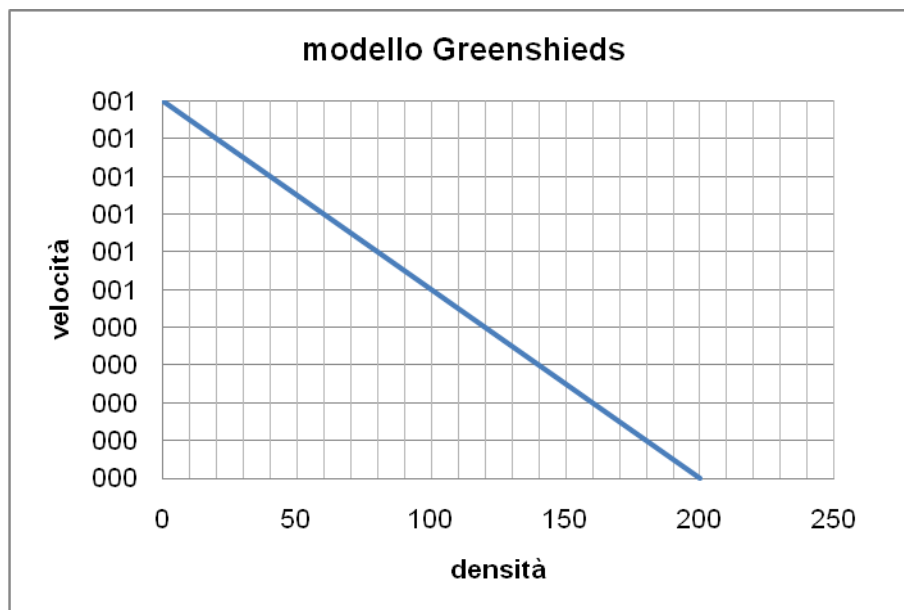


Figura 17 Modello lineare di Greenshields

Modello Greenberg (1959):

$$v(k) = v_0 \ln \left(\frac{k_{jam}}{k} \right)$$

eq. 4 Modello di Greenberg

È un modello di tipo logaritmico. Fornisce una buona rispondenza tra valori reali e simulati per densità medio – alte, quindi per flussi prossimi alla congestione. I parametri da impostare sono la velocità a carico e la densità di congestione; è un modello che non consente di determinare la velocità a flusso libero in quanto tale valore tende all'infinito. Noti tali valori gli altri si determinano sapendo che la densità critica è pari a quella di congestione diviso il numero di Eulero e la portata massima è data dal prodotto della velocità a carico per la densità critica.

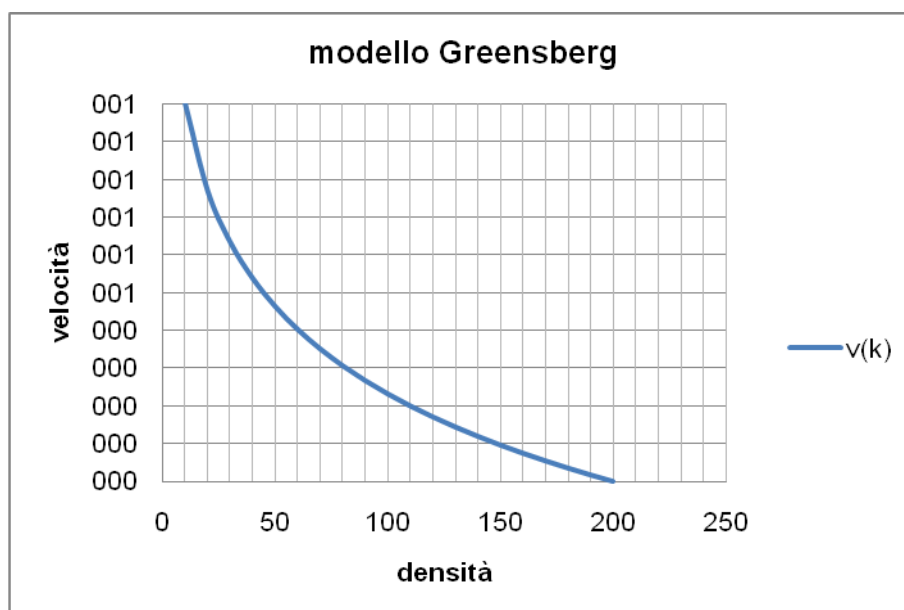


Figura 18 Modello di Greenberg

Modello esponenziale di Underwood (1961):

$$v(k) = v_0 e^{-\frac{k}{k_c}}$$

eq. 5 Modello esponenziale di Underwood

Questo modello fornisce una buona rispondenza tra valori reali e simulati per basse densità. Stabilita la velocità di libero deflusso o la velocità a carico, l'una si determina dall'altra mediante la relazione $v_0 = v_c * e$. Definita la densità critica, la densità di congestione raggiunge un valore molto elevato che non corrisponde a nessun caso esistente. Per tale motivo è consigliabile utilizzare tale modello per valori bassi di densità.

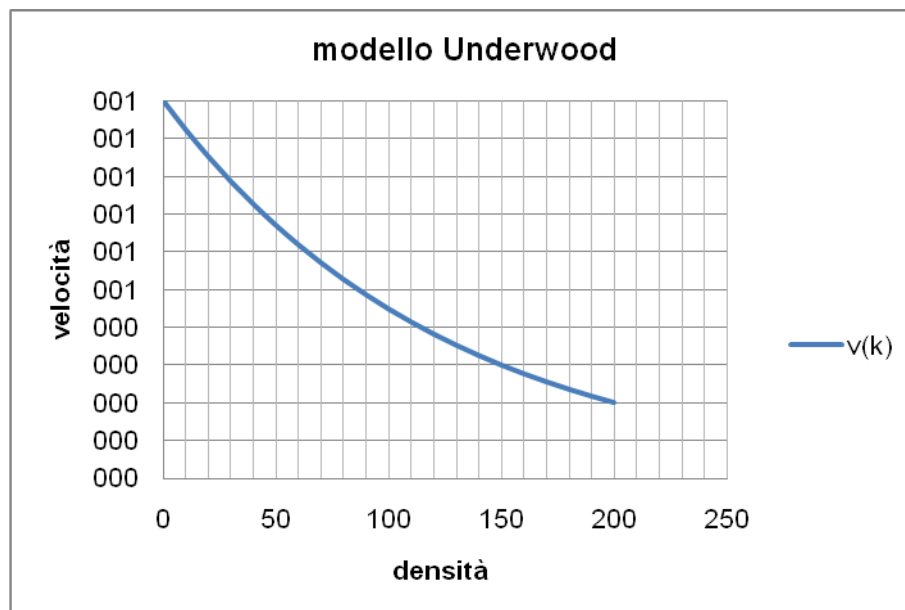


Figura 19 Modello esponenziale di Underwood

Modello Drake et al. (1967):

$$v(k) = v_0 e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{k}{k_c}\right)^2}$$

eq. 6 Modello di Drake et al.

È la formula che meglio approssima l'andamento della curva velocità-densità. Si definiscono la velocità a flusso nullo e la densità critica e gli altri parametri si determinano da queste. La velocità a carico si determina come $v_c = v_0 e^{-\frac{1}{2}}$ e la capacità sarà data da $Q_{max} = k_c v_c$.

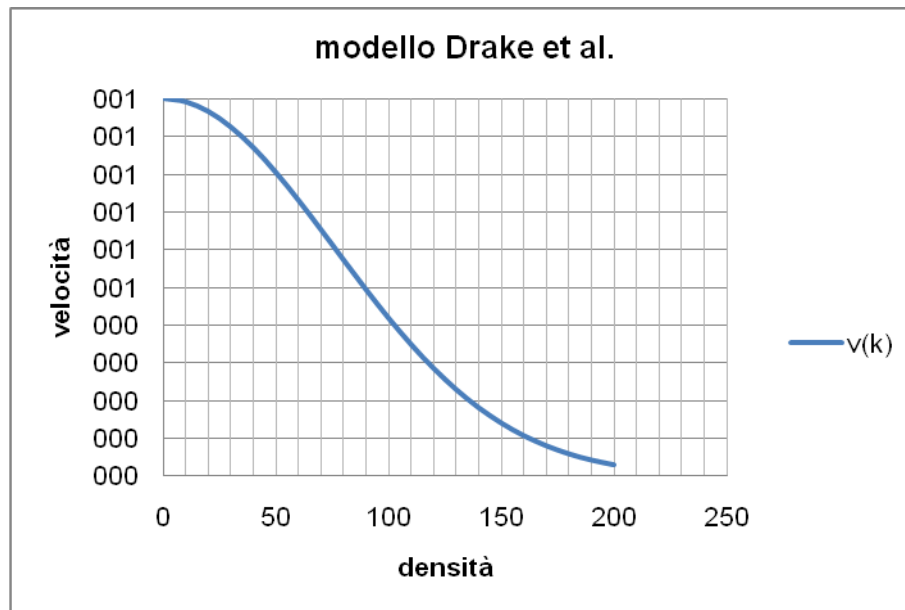


Figura 20 Modello di Drake et al.

I quattro modelli analitici presentati hanno in comune il vantaggio di poter essere utilizzati per simulare il deflusso ininterrotto in campo autostradale conoscendo solamente due parametri, però presentano differenti campi di applicazione. In particolare, riassumendo quanto sopra, il modello lineare di Greenshields è applicabile nei casi in cui la densità veicolare risulti media, il modello Greenberg invece presenta una buona applicabilità per densità medio - alte, invece per valori di densità alti il modello che meglio simula il deflusso è quello di Underwood ed infine il modello di Drake presenta un buon adattamento a tutti i valori di densità. Considerato ciò e dovendo descrivere il flusso dei veicoli in qualsiasi condizione di densità si è deciso di scegliere la curva di deflusso di Drake.

L'equazione del deflusso fornita dal modello di Drake si basa sulla determinazione di due parametri: la velocità di flusso libero VFL e la capacità massima dell'infrastruttura, da questi due è possibile ricavare gli altri valori caratteristici della curva densità-velocità secondo le relazioni riassunte in Tabella 18.

VFL	C	$v_c = VFL * e^{-\frac{1}{2}}$	$k_c = \frac{C}{v_c}$	k_{jam}
-----	---	--------------------------------	-----------------------	-----------

Tabella 18 Parametri della curva di deflusso di Drake e loro determinazione

6.2.1.1 Velocità di flusso libero

Si definisce velocità di flusso libero, per le strade a doppia carreggiata, il valore della *velocità media delle sole autovetture in condizioni di flusso da basso a moderato* (HCM 2000).

La velocità a flusso libero VFL può essere misurata direttamente a partire dalla velocità media, riferita ad una sezione con caratteristiche rappresentative del tronco in esame ed in condizioni di flusso rado, oppure, se non si hanno dati a disposizione, tramite relazioni fornite dal manuale HCM.

Si è scelto di determinare il valore di VFL direttamente tramite l'analisi dei dati storici forniti dalla società di gestione dell'infrastruttura. Considerando i transiti dei veicoli entranti nell'autostrada durante l'arco della giornata è stato possibile individuare le ore in cui il traffico

risultasse basso, in modo da soddisfare la condizione di “*flusso da basso a moderato*” riportata dall’HCM. All’interno della fascia oraria così individuata sono state considerate solamente quelle ore in cui la percentuale di veicoli pesanti nella composizione del traffico risultasse inferiore al 40%, così che il valore di velocità media individuato per le sole autovetture risultasse influenzato da tale presenza in misura minore.

Traffico giornaliero medio				
Ora	Transiti totali	transiti L	transiti P	% P
00.00 – 00.59	867	706	161	19%
01.00 – 01.59	586	459	127	22%
02.00 – 02.59	466	337	129	28%
03.00 – 03.59	553	354	199	36%
04.00 – 04.59	899	493	406	45%
05.00 – 05.59	1541	821	720	47%
06.00 – 06.59	2676	1672	1004	38%
07.00 – 07.59	4448	3415	1034	23%
08.00 – 08.59	4755	3726	1029	22%
09.00 – 09.59	4186	3075	1111	27%
10.00 – 10.59	3810	2685	1125	30%
11.00 – 11.59	3552	2455	1098	31%
12.00 – 12.59	3198	2255	943	29%
13.00 – 13.59	3012	2173	839	28%
14.00 – 14.59	3531	2583	948	27%
15.00 – 15.59	3764	2792	972	26%
16.00 – 16.59	4084	3134	950	23%
17.00 – 17.59	4543	3661	882	19%
18.00 – 18.59	4087	3451	636	16%
19.00 – 19.59	3033	2601	432	14%
20.00 – 20.59	1956	1633	323	17%
21.00 – 21.59	1406	1166	240	17%
22.00 – 22.59	1094	867	227	21%
23.00 – 23.59	944	774	171	18%

Tabella 19 Traffico giornaliero medio (valori derivati dai dati storici A21_Entrate)

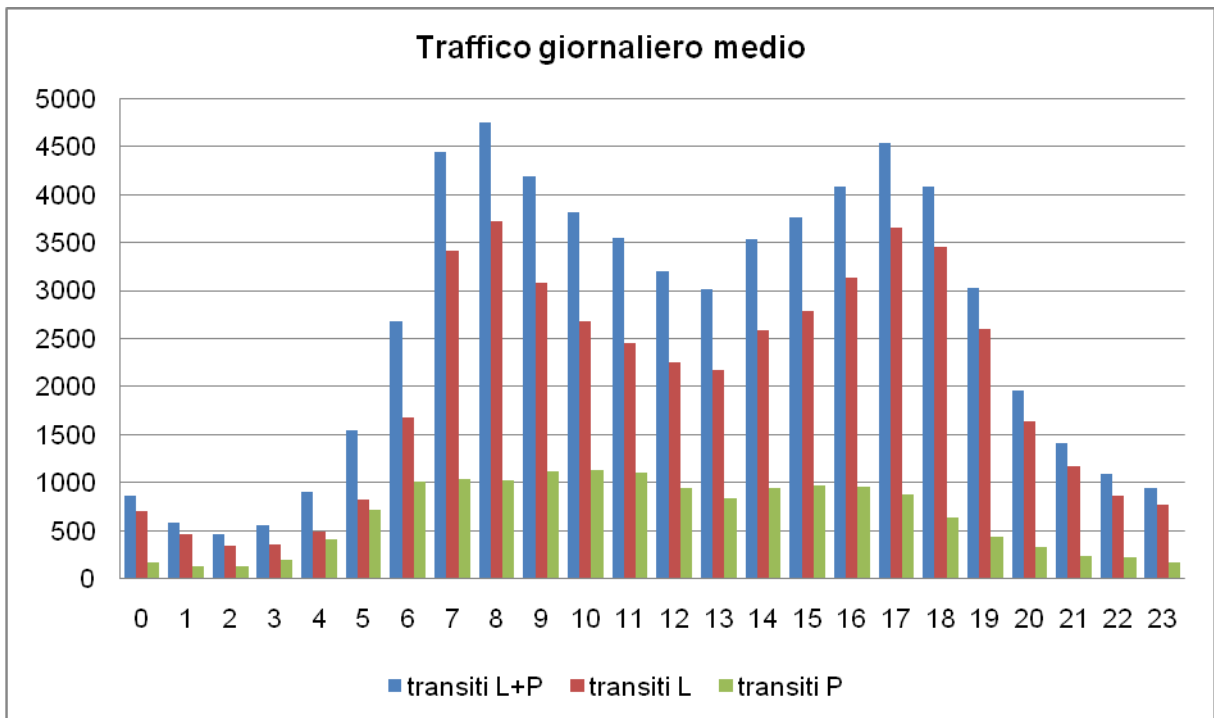


Figura 21 Andamento traffico medio durante le ore della giornata (valori derivati dai dati storici A21_Entrate)

Per il periodo compreso tra le ore 23:00 e le ore 03:59 sono state calcolate le velocità dei veicoli leggeri in transito sull'autostrada. La determinazione della velocità di percorrenza è stata possibile considerando i dati storici forniti dalla tabella A21_Uscite. In tale tabella per ogni singolo veicolo sono fornite informazioni relative alla stazione di entrata e di uscita e all'istante di entrata e a quello di uscita. Dalla combinazione di tali informazioni è stato possibile, conoscendo la distanza tra le diverse stazioni dell'autostrada, determinare lo spazio percorso da ciascun veicolo e successivamente attraverso il rapporto tra tale spazio e il tempo impiegato, calcolare il valore della velocità media di viaggio. Nell'ipotesi che il tempo speso dal veicolo nella fase di accelerazione e di decelerazione, effettuate all'ingresso in autostrada e in prossimità del casello di uscita, sia piccolo, è possibile assimilare il valore determinato al valore della velocità di libero deflusso del veicolo. Questa ultima ipotesi va ad aggiungersi alle due ipotesi precedentemente espresse di traffico basso o medio e di bassa percentuale di mezzi pesanti nella corrente veicolare. La velocità di flusso libero VFL dell'infrastruttura è stata quindi determinata come media dei valori di velocità trovati. Tale media però non dovrà tenere in considerazione quei valori di velocità che possono essere considerati incoerenti per diversi motivi:

- valori superiori al limite di velocità consentito (secondo il codice della strada per autovetture la velocità massima in autostrada è pari a 130km/h);
- valori troppo bassi possono essere dovuti a pause effettuate dal conducente durante il percorso.

Per determinare quali valori di velocità risulta sensato escludere dalla determinazione della VFL è stato necessario rappresentare le velocità ottenute secondo la loro densità, ottenendo una distribuzione gaussiana, e individuare i due punti in cui si verifica una significativa variazione della pendenza della curva, prima e dopo la parte centrale della stessa. Considerando la distribuzione mostrata in Figura 22 è possibile eliminare quei valori di

velocità inferiori a 65 km/h e superiori a 135 km/h, che risultano avere anche una frequenza molto bassa.

La percentuale di dati scartati risulta pari al 13% che può considerarsi un valore accettabile.

Attraverso questa procedura si è ottenuta una VFL pari a 99,61 km/h, il valore che si ritiene opportuno utilizzare come parametro dell'equazione di Drake et al. viene assunto pari a 100km/h.

Intervallo temporale	$V_{lim\ inf}$	$V_{lim\ sup}$	VFL	dati totali	dati selezionati	% dati scartati
23.00-03.59	65 km/h	135 km/h	99,61 km/h	16.758	14.583	13%

Tabella 20 Parametri per la determinazione di VFL

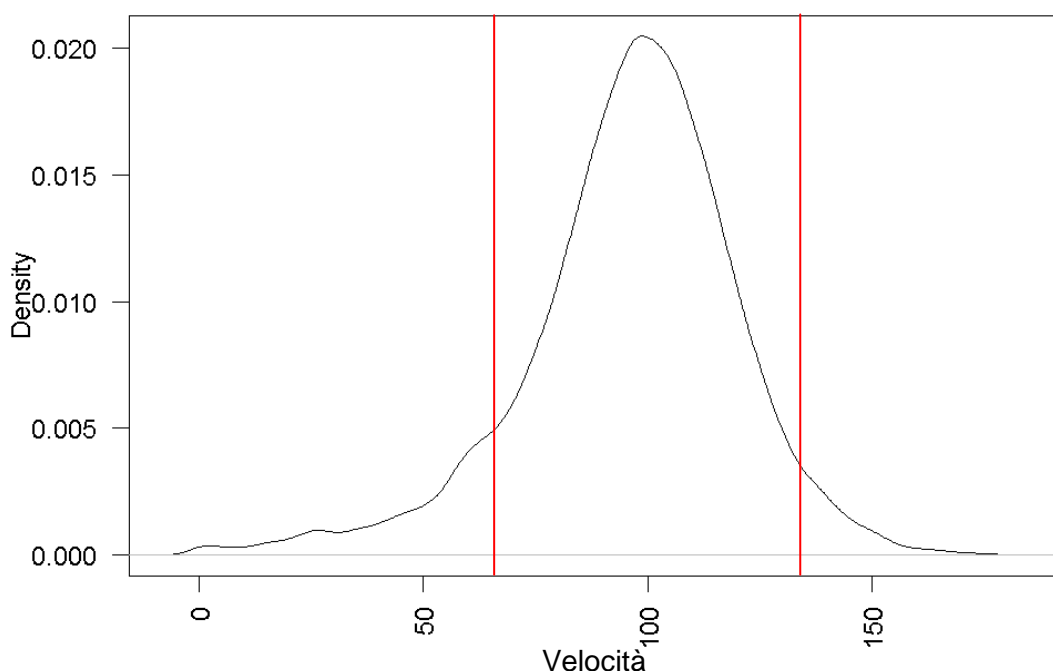


Figura 22 Distribuzione densità delle velocità determinate

6.2.1.2 Capacità massima dell'infrastruttura

La capacità di una strada riflette la sua abilità a consentire il moto di una corrente di veicoli o persone e rappresenta una misura dell'offerta fornita dall'infrastruttura.

Si definisce capacità di un'infrastruttura viaria *la massima portata oraria veicolare che, ragionevolmente, ci si può attendere possa passare attraverso una sezione di una corsia in un dato periodo di tempo, nelle prevalenti condizioni della strada e del traffico, con tempo sereno, visibilità diurna, buono stato della pavimentazione ed assenza di incidenti* (HCM 2000).

Le condizioni d'infrastruttura si riferiscono alle caratteristiche geometriche e fisiche della stessa, che possono non essere costanti lungo tutto il tracciato, perciò la capacità è conseguentemente definita per tronchi di autostrada con caratteristiche omogenee. Le condizioni di traffico si riferiscono invece alla natura del traffico circolante ossia alla composizione della corrente per tipologia veicolare (percentuale di mezzi pesanti e leggeri) e dei conducenti (abituali o occasionali), alla distribuzione dei veicoli tra le corsie e ai sistemi di

regolazione e controllo del deflusso. In particolare la presenza di veicoli con caratteristiche di marcia diverse tra loro, come autovetture e mezzi pesanti di diverso tipo producono alterazioni nel deflusso veicolare ideale.

Definita la capacità ideale e limite di una sezione stradale con riferimento a condizioni ideali di infrastruttura e di traffico è necessario correggere tale valore in funzione delle condizioni reali dell'infrastruttura.

L'HCM definisce diversi fattori che permettono di ridurre il valore di capacità ideale determinata, tali fattori appartengono a due famiglie una legata all'infrastruttura (larghezza reale delle corsie, presenza di ostacoli laterali a distanza inferiore a 1,83 m, pendenza longitudinale, stato della pavimentazione, visibilità) e una legata alle condizioni di traffico (percentuale di veicoli commerciali, percentuale di autobus).

Il valore della capacità di una corsia di tipo autostradale ha subito, nelle diverse edizioni del manuale americano, alcuni cambiamenti. L'edizione del 1985 riporta una capacità ideale di 2000 veicoli equivalenti nell'ora di punta per corsia con velocità di flusso libero maggiori di 80 km/h. Tale valore viene ridotto a $1900 v_{eq}/h/corsia$ per velocità di flusso libero inferiori a 80 km/h. Nell'edizione del 1994 dell'HCM il valore della capacità oraria di deflusso di una corsia autostradale viene alzato a 2200 veicoli equivalenti per carreggiate con 2 corsie per senso di marcia e a 2300 veicoli equivalenti per 3 o più corsie per direzione. Nel 1997 la capacità di deflusso di una corsia autostradale è stata incrementata fino a $2250 v_{eq}/h/corsia$ e variabile in dipendenza della velocità di flusso libero fino ad un massimo di $2400 v_{eq}/h/corsia$. Tali valori sono stati riconfermati anche nell'edizione del 2000 dell'Highway Capacity Manual (Autostrade per l'Italia, 2007).

Nell'ultima edizione (2000) l'HCM propone diversi valori di capacità in funzione della velocità di libero deflusso dell'infrastruttura, in particolare nella Tabella 14 sono riportati i valori limite della densità, della velocità, del rapporto portata/capacità e della portata per quattro diversi valori della velocità di flusso libero e per ciascun Livello di Servizio (L.d.S).

La VFL stimata per il tratto considerato è risultata pari a 100km/h, di conseguenza la capacità ideale dell'autostrada risulta pari a $2300 v_{eq}/h/corsia$. La capacità ideale totale del sistema espressa in veicoli equivalenti per ora, è calcolata come il prodotto di capacità per corsia per numero di corsie del sistema autostradale (Autostrade per l'Italia, 2007). La capacità ideale per ciascuna direzione (due corsie per senso di marcia) risulta quindi pari a $4600 v_{eq} /h$.

Il tracciato dell'autostrada A21 nel tratto Torino - Piacenza si snoda in territorio pianeggiante, la sua geometria non presenta bruschi cambi di direzione e la piattaforma stradale è costituita da due corsie per senso di marcia di larghezza 3,75 m e da una corsia di emergenza di circa 2,60 – 3,00 m. Per queste caratteristiche non si ritiene necessario procedere alla determinazione dei coefficienti legati ai fattori dell'infrastruttura atti a ridurre il valore della capacità ideale determinata.

Dall'analisi dei dati di traffico è stato possibile determinare un valore di traffico giornaliero medio (TGM) di circa 65000 veicoli con una percentuale media di mezzi pesanti pari al 25% (Figura 23).

Tale percentuale di traffico pesante risulta significativa, perciò si ritiene necessario correggere il valore della capacità ideale moltiplicandolo per una fattore di riduzione che

tiene conto della percentuale dei mezzi pesanti e del loro coefficiente di equivalenza¹. Il fattore di riduzione della capacità per mezzi pesanti è determinato tramite la seguente relazione:

$$f_p = \frac{1}{1 + p(e - 1)}$$

eq. 7 Fattore di riduzione della capacità relativo alla %mezzi pesanti

Nella quale compaiono:

p - percentuale di veicoli pesanti pari a 25%;

e - coefficiente di equivalenza per veicoli pesanti pari a 1,76.

Il fattore di riduzione della capacità risulta pari a 0,84 e la capacità massima reale ottenuta come prodotto tra la capacità ideale e il fattore di riduzione è pari a 3866 v_{eq} /h.

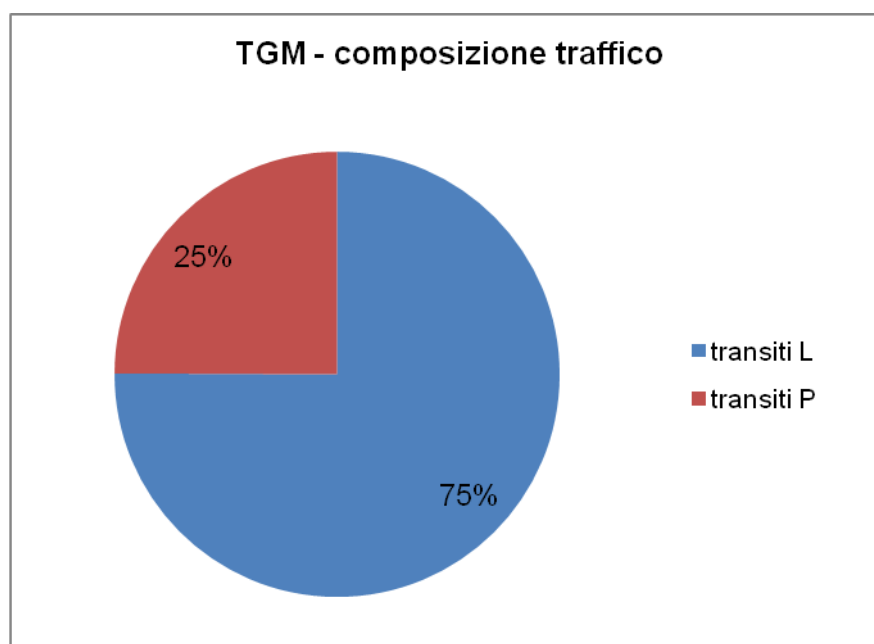


Figura 23 Composizione del traffico medio giornaliero in veicoli leggeri e pesanti

¹ Si definisce coefficiente di equivalenza dei veicoli pesanti il numero di autovetture passeggeri corrispondente ai veicoli pesanti presenti in una sezione stradale nelle condizioni prevalenti di strada e traffico. Per maggiori dettagli sulla determinazione del valore utilizzato si rimanda al paragrafo 6.2.2.1.

6.2.2 Domanda di trasporto

La domanda di mobilità deriva dalla necessità degli utenti di svolgere attività in luoghi diversi. Le caratteristiche della domanda dipendono dalle esigenze degli spostamenti e dalle modalità con le quali essi possono essere svolti, cioè dalle caratteristiche che il sistema delle attività e il sistema dell'offerta di trasporto assumono nell'area di studio.

La domanda di trasporto rappresenta, insieme alle caratteristiche dell'offerta di trasporto, il dato di ingresso da fornire al modello allo scopo di eseguire l'assegnazione dei flussi sull'infrastruttura.

Obiettivo principale dell'analisi della domanda è determinare i flussi attuali e futuri che interesseranno l'autostrada A21 tratto Torino - Piacenza, oggetto di studio. Per il conseguimento di tale obiettivo sarà necessario determinare:

- i flussi in ingresso sull'autostrada attraverso le stazioni e le **interconnessioni** con le altre autostrade;
- la matrice Origine-Destinazione che descrive la distribuzione dei flussi in circolazione sull'autostrada conseguentemente ai percorsi compiuti dagli utenti.

Grazie al sistema di esazione del pedaggio nel caso di autostrade a sistema chiuso, è possibile raccogliere una serie di informazioni riguardanti il viaggio di ogni singolo veicolo. In particolare, ai fini modellistici, risulta interessante rilevare: stazione di ingresso e uscita, giorno, ora e minuto di ingresso e uscita e classe di veicolo (Camus & Longo, 2000). Queste informazioni vanno a costituire una base dati sulla quale eseguire diverse analisi statistiche e possono essere utilizzate anche in applicazioni on-line all'interno di modelli di previsione.

I dati oggetto dell'analisi della domanda saranno:

- dati storici (anno solare 2009) degli ingressi ai caselli dell'autostrada A21;
- dati storici (anno solare 2009) degli ingressi e delle uscite ai caselli dell'autostrada A21.

I dati storici degli ingressi ai caselli permettono di determinare l'andamento dei flussi entranti sull'autostrada durante una giornata. I dati storici degli ingressi e delle uscite ai caselli dell'autostrada servono a costruire le matrici Origine-Destinazione di distribuzione dei flussi durante la giornata.

I dati storici degli ingressi, forniti dalla società di gestione SATAP Spa, relativi al singolo veicolo sono organizzati nella seguente forma tabellare:

Entrate A21	
Descrizione	Lunghezza
Data ora entrata	14
Stazione di Entrata	3
Pista di Entrata	2
Classe	1

Tabella 21 Struttura dei dati storici relativi agli ingressi (dati A21_Entrate)

I dati storici degli ingressi e delle uscite, forniti dalla società di gestione SATAP Spa, relativi al singolo veicolo sono organizzati nella seguente forma tabellare:

Uscite A21	
Descrizione	Lunghezza
Data ora uscita	14
Stazione di Uscita	3
Pista di Uscita	2
Classe	1
Stazione di Entrata	3
Pista di Entrata	2
Data ora entrata	14

Tabella 22 Struttura dei dati storici relativi a ingressi e uscite (dati A21_Uscite)

L'analisi della domanda storica servirà come punto di partenza per la previsione della domanda futura. Come mostrato dalla Figura 13 la domanda di mobilità, dato di ingresso del modello, sarà costituita dall'unione di due componenti la domanda storica analizzata e la domanda rilevata in tempo reale agli accessi dell'autostrada:

- informazioni storiche sulla domanda di trasporto;
- informazioni in real-time sulle entrate.

I dati raccolti in real-time vengono raccolti secondo le medesime strutture dei dati storici.

I flussi della domanda di trasporto con i quali verrà eseguita l'assegnazione alla rete infrastrutturale dovranno essere espressi in veicoli equivalenti e non differenziati per classi veicolari. Tale necessità deriva dall'utilizzo all'interno del modello dell'offerta della relazione di deflusso di Drake et al. che fornisce il valore della velocità in funzione della densità veicolare espressa in veicoli equivalenti al chilometro.

6.2.2.1 Determinazione del coefficiente di equivalenza dei mezzi pesanti

Con il termine veicoli pesanti si indicano quei veicoli aventi dimensioni maggiori e caratteristiche operative differenti rispetto alle automobili. Rientrano nella categoria così definita i veicoli commerciali (camion, autocarri, autoarticolati...), autobus e veicoli ricreazionali. Ognuna di queste categorie presenta differenti caratteristiche di peso, dimensione e potenza. La percentuale di veicoli pesanti in una specifica autostrada dipende dalla localizzazione della stessa vicino a centri importati di carattere commerciale e dalla vicinanza di specifici corridoi di trasporto anche di scala europea. Tipicamente questa proporzione si attesta tra valori pari al 2% giudicati bassi e valori alti pari al 25% del traffico medio giornaliero (Al-Kaisy, Hall, & Reisman, 2002).

Le condizioni di deflusso in autostrada derivano dalle interazioni tra i veicoli nella corrente di traffico e dalle caratteristiche geometriche della piattaforma stradale. La presenza di camion e/o autobus influisce sulle condizioni della circolazione per due ragioni (Nicosia, 2000):

- tali veicoli sono più grandi delle automobili e quindi occupano più spazio nella carreggiata;
- le capacità operative di tali veicoli (accelerazione, decelerazione, velocità costante, ecc.) sono generalmente inferiori a quelle delle automobili.

L’HCM nel 1950 suggeriva l’utilizzo di un fattore di equivalenza pari a 2 per quantificare l’impatto dei mazzi pesanti nella corrente veicolare su di un’autostrada a più corsie. Più recentemente nel 2000 ha fornito differenti valori di “Passenger Cars Equivalent – PCE” a seconda delle caratteristiche del tracciato autostradale e della percentuale di tali mezzi sull’intera corrente veicolare.

Coefficiente di equivalenza	Tipo di terreno		
	Pianeggiante	Ondulato	Montuoso
E_T	1,5	2,5	4,5
E_R	1,2	2,0	4,0

Tabella 23 Valori dei coefficienti di equivalenza a seconda del tipo di terreno (HCM)

Pendenza (%)	Lunghezza (km)				
	$L < 0,2$	$0,2 \leq L < 0,5$	$0,5 \leq L < 0,8$	$0,8 \leq L < 1,0$	$L \geq 1,0$
$i < 1$	P	P	P	P	P
$1 \leq i < 2$	P	P	P	P	O
$2 \leq i < 3$	O	O	O	O	O
$3 \leq i < 4$	O	O	M	M	M
$4 \leq i < 5$	O	O	M	M	M
$i \geq 5$	O	O	M	M	M

P = terreno pianeggiante; O = terreno ondulato; M = terreno montuoso

Tabella 24 Classificazione del tratto di autostrada in funzione della pendenza (HCM)

L’HCM prevede due tipologie di veicoli pesanti: i veicoli merci e bus (trucks and buses), e gli autocaravan e camper (veicoli ricreazionali), per ciascuna delle due tipologie viene identificato un coefficiente di equivalenza in termini di autovetture (veicoli equivalenti). Questo valore è funzione del tipo di veicolo pesante, della percentuale nella corrente di traffico, della lunghezza ed entità della pendenza dell’infrastruttura. Questi valori sono definiti sia per segmenti generali di autostrada pianeggianti, collinari e di montagna, sia per specifiche combinazioni di lunghezze e di pendenze in salita ed in discesa.

Il coefficiente di equivalenza dei veicoli pesanti dipende dall’interazione di questi sulla circolazione stradale. Le interferenze sono dovute alle differenti caratteristiche geometriche e prestazionali di questi mezzi rispetto alle autovetture, alle caratteristiche del tracciato, alla loro percentuale rispetto al traffico di autovetture e al rispetto delle prescrizioni loro imposte dal codice della strada. Si può affermare infatti che nel caso di un tracciato con curve con raggi di curvatura bassi le velocità dei mezzi pesanti risultano molto inferiori rispetto a quelle delle autovetture, come anche nel caso di strade con pendenze elevate che costringono i mezzi pesanti proprio a causa della loro massa a viaggiare a regimi di velocità molto bassi. In questi casi l’influenza dei mezzi pesanti sulla circolazione è più significativa.

Il sistema di riscossione del pedaggio autostradale fornisce la composizione del traffico entrante sull’autostrada proprio grazie alla differenziazione delle tariffe imposte per categorie di veicoli. Tale classificazione (Tabella 25) non permette una diretta individuazione del coefficiente di equivalenza da utilizzare perché non suddivide i veicoli secondo le due tipologie proposte nell’HCM.

CLASSIFICAZIONE DEI VEICOLI






















A	altezza \leq 1.3 m. (misurata all'asse anteriore)						
B	altezza $>$ 1.3 m (misurata all'asse anteriore)						
3	veicoli e convogli a 3 assi						
4	veicoli e convogli a 4 assi						
5	veicoli e convogli a 5 o più assi						

Tabella 25 Classificazione dei veicoli in base al sistema di pedaggiamento

Attraverso l'analisi dei dati storici è stato possibile determinare per ciascuna delle classi veicolari, individuate grazie al sistema di pedaggiamento, la percentuale sul traffico giornaliero medio. È emerso che la percentuale dei mezzi pesanti media giornaliera è pari al 25%, con un valore massimo che supera il 45% nelle ore di punta della mattina. Si può quindi affermare che l'autostrada in esame sia fortemente interessata da un elevato tasso di mezzi pesanti e proprio per questa rilevante presenza la determinazione del coefficiente di equivalenza di tali mezzi è stata svolta con particolare attenzione.

È necessario precisare che il regime di circolazione dei mezzi pesanti è vincolato dalle prescrizioni dettate dal codice della strada in campo autostradale. Il codice della strada impone sulle autostrade per le autovetture un limite di 130 km/h, salvo diversa segnalazione, diminuito a 110 km/h in caso di precipitazione atmosferica e diminuito a 50 km/h in caso di nebbia. Per quanto riguarda le categorie di veicoli pesanti sono invece indicati i seguenti limiti di velocità:

- gli autoveicoli destinati al trasporto di cose di massa a pieno carico compresa fra 3,5 e 12 t non possono superare i 100 km/h;
- gli autoveicoli destinati al trasporto di cose di massa superiore a 12 t non possono superare gli 80 km/h;
- gli autoarticolati, gli autotreni e gli autosnodati non possono superare gli 80 km/h;
- gli autobus e filobus di massa a pieno carico oltre 8 t non possono superare i 100 km/h.

Cercando di creare corrispondenza tra le classi di pedaggio e le classi indicate nel codice della strada per i limiti di velocità si è redatta la Tabella 26.

Veicoli	V max		Categoria	Classe	Descrizione
Motocicli e autovetture	130	km/h	L	A	motocicli e veicoli con h<1,3m sul 1 asse
Autoveicoli massa 3,5-12t e autobus	100	km/h	P	B	veicoli con h>1,3 sul primo asse
Autoveicoli massa >12t, autoarticolati, autotreni e autosnodati	80	km/h	P	3, 4, 5	veicoli con 3, 4, 5 e più assi

Tabella 26 Limiti di velocità per diverse classi veicolari

La componente di traffico pari al 25% formata dai veicoli delle categorie B, 3, 4 e 5 risulta costituita per la maggior parte da quelli appartenenti alle classi B e 5, che insieme raggiungono il 21%, mentre quelli delle restanti classi costituiscono il 4% (Figura 24).

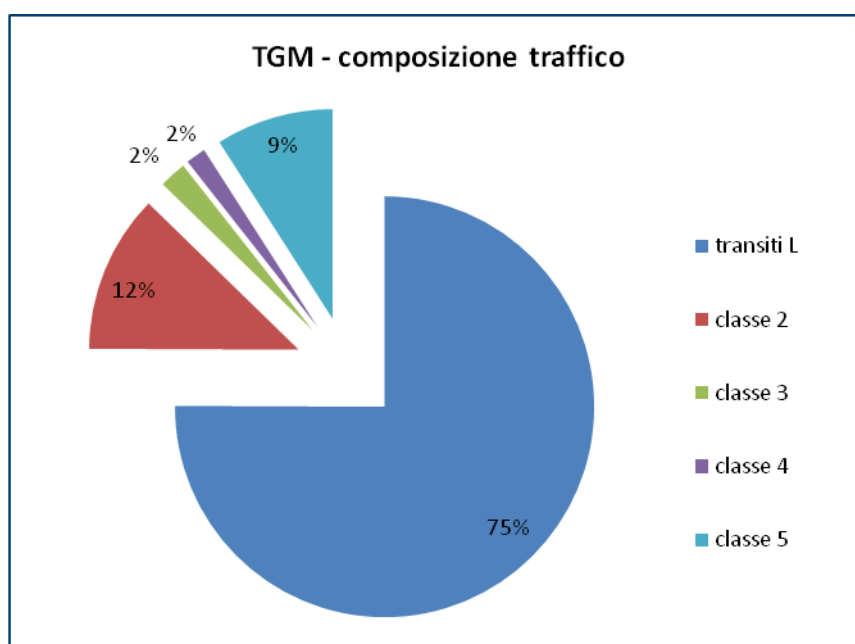


Figura 24 Composizione traffico giornaliero e dettagli percentuali dei mezzi pesanti

Le politiche di restrizione promosse dal codice della strada relative ai limiti di velocità e all'utilizzo delle corsie di marcia mirano a ridurre le interazioni tra vetture passeggeri e mezzi pesanti. Il rispetto dei mezzi pesanti di tali prescrizioni riduce l'interazione tra autovetture e mezzi pesanti rendendo possibile ridurre il coefficiente di equivalenza utilizzato per la definizione della quantità di traffico equivalente (Stanley, 2009).

Dalle analisi svolte sulla composizione del traffico e sulle velocità dei mezzi pesanti è possibile fare le seguenti considerazioni che portano alla determinazione del coefficiente di equivalenza da utilizzare nel modello:

- il tratto di autostrada analizzato si snoda in territorio pianeggiante e senza particolari e bruschi cambi di direzione;
- la percentuale dei mezzi pesanti giornaliera è pari a circa il 25% del TGM;
- i mezzi pesanti di classe B hanno velocità massima ammessa dal codice della strada pari a 100km/h, vicina a quella limite per i veicoli di classe A;
- i mezzi pesanti che non rispettano i limiti di velocità loro imposti sono circa il 30%;

Sulla base di queste considerazioni si ritiene corretto differenziare il coefficiente di equivalenza dei mezzi pesanti di classe B da quelli di classe 3, 4, 5 anzitutto perché la percentuale di veicoli della classe 5 non è trascurabile, è infatti quasi pari a quella dei veicoli di classe B, inoltre i veicoli di classe B presentano dimensioni e limiti di velocità più vicini ai veicoli di classe A e quindi hanno con questi un'interazione inferiore. Si è perciò scelto un coefficiente di equivalenza per i veicoli di classe B pari a quello indicato dal HCM per tracciato pianeggiante cioè uguale a 1,5 e un coefficiente più alto per i veicoli di classe 3, 4, 5 pari a 2 in quanto questi veicoli hanno maggiori dimensioni e le loro velocità sono molto inferiori a quelle delle autovetture generando con esse una più forte interferenza. Inoltre i veicoli di classe 3, 4, e 5 registrano una maggiore inosservanza dei limiti di velocità loro imposti aumentando così la perturbazione generata sulle condizioni di circolazione. È facile pensare che spesso questi mezzi eseguano sorpassi impiegando la corsia di sorpasso anche per lunghi tratti perché la velocità del veicolo sorpassante è di pochi chilometri orari superiore a quella del veicolo sorpassato. La lentezza di tale manovra di sorpasso genera, sulle autostrade a due corsie, come quella in esame, il rallentamento della corrente veicolare delle autovetture.

Una volta determinati i coefficienti di equivalenza per ciascuna classe è stato determinato, come media pesata sulle percentuali di transiti giornalieri relativi a ciascuna classe, il coefficiente di equivalenza per la categoria veicoli pesanti che è risultato pari a 1,76.

Veicoli	Classe	Categoria	% veicoli con $v > v_{lim}$	% veicoli giornaliera	PCE singola classe	PCE categoria
motocicli, autovetture	A	L		75%	1	1
autoveicoli massa 3,5-12 t, autobus	B	P	20%	12%	1,5	1,76
autoveicoli massa >12 t, autoarticolati, autotreni, autosnodati	3		35%	2%	2	
	4		31%	2%	2	
	5		39%	9%	2	

Tabella 27 Coefficiente di equivalenza per mezzi pesanti

Il coefficiente di equivalenza determinato verrà utilizzato:

- per l'omogeneizzazione del flusso entrante da ciascuna stazione dell'autostrada ottenuto dal cluster individuato. Il flusso fornito dal cluster per l'orizzonte di simulazione è suddiviso in numero di veicoli leggeri, appartenenti alla classe A e in numero di veicoli pesanti appartenenti alle restanti classi, risulta perciò necessario determinare il numero di veicoli equivalenti entranti per ciascun intervallo temporale che compone l'orizzonte;

- per l'omogeneizzazione del flusso fornito dalle matrici OD determinate per le diverse giornate tipo individuate dai cluster divise per le due categorie di veicoli leggeri e pesanti;
- per l'utilizzo della curva di deflusso che necessita per la determinazione della velocità di un pacchetto di veicoli della sua densità fornita in veicoli equivalenti al chilometro.

6.2.2.2 Analisi della domanda in ingresso sull'autostrada

L'analisi della domanda storica in ingresso sull'autostrada A21, tratto TO-PC, è stata condotta utilizzando differenti strumenti di analisi statistica.

Gli obiettivi di tale analisi statistica sono i seguenti:

- individuare differenti tipologie giornaliere di andamento del traffico in entrata;
- riconoscere, a partire dai dati raccolti in tempo reale, quale delle differenti tipologie giornaliere individuate, meglio approssima l'andamento attuale del traffico.

Questi due obiettivi permettono di determinare i flussi presenti sull'autostrada al tempo attuale e nell'intervallo previsionale futuro.

L'analisi statistica si comporrà di tre differenti fasi successive:

1. analisi di clusterizzazione: attraverso il processo di cluster analysis, eseguita sui dati storici relativi agli ingressi sull'autostrada, si determinano un numero definito di cluster, ossia di tipologie differenti di giornate con un proprio andamento dei flussi di ingresso;
2. identificazione: attraverso l'analisi della dissimilarità tra l'andamento dei flussi nei cluster individuati e l'andamento reale nel giorno attuale, si determina quale tra i giorni tipo individuati nella fase 1 risulta più simile alla giornata attuale;
3. previsione dei flussi: identificato il giorno tipo più simile alla giornata attuale, si utilizza l'andamento dei flussi di ingresso del cluster per simulare quale sarà l'andamento dei flussi durante l'intervallo previsionale.

I dati utilizzati per queste analisi sono i seguenti:

- dati storici degli ingressi ai caselli dell'autostrada A21: i dati sono stati riorganizzati nel seguente modo, con lo scopo di determinare il valore dei transiti, ossia il numero di veicoli entranti nell'autostrada dai diversi caselli nell'intervallo di tempo pari a 15 minuti, divisi per le due classi veicolari:

Entrate A21
<i>Descrizione</i>
Data ora entrata
Stazione di Entrata
Classe (L = veicoli leggeri, P = veicoli pesanti)
Transiti (veicoli raggruppati ad intervalli di 15 minuti)

Tabella 28 Struttura dati storici per analisi statistica

Inizialmente si era scelto di determinare i flussi entranti da ciascuna stazione per intervalli temporali di 5 minuti, in questo modo risultavano però numerosi gli intervalli

con un valore di transiti molto basso e giudicato perciò poco significativo, allora si è deciso di aumentare l'intervallo a 15 minuti.

- dati real-time degli ingressi ai caselli dell'autostrada A21: tali dati sono necessari nelle fasi successive alla clusterizzazione, per l'applicazione online relativa alla determinazione dei flussi previsti per il giorno attuale. La struttura dei dati raccolti in real-time è facilmente organizzabile come in Tabella 28. Inoltre i dati raccolti in tempo reale andranno a costituire la nuova base di dati storici sulla quale aggiornare periodicamente la definizione dei cluster.

Per effettuare l'analisi statistica è stato utilizzato il software open source **R** (Ricci, 2004); <http://www.r-project.org>).

L'unità statistica che descrive il sistema autostradale è il giorno, tale unità è descritta dall'insieme delle seguenti variabili:

- temporali: 96 intervalli di 15 minuti che descrivono le 24 ore di una giornata;
- spaziali: 11 caselli autostradali lungo il tratto in esame dell'autostrada A21 TO-PC;
- classe veicolare: 2 classi veicoli leggeri (motocicli e autoveicoli) e pesanti (veicoli commerciali, veicoli con più di due assi).

La descrizione completa di un'unità statistica del sistema autostradale si compone di 2112 variabili (11 caselli x 96 intervalli x 2 classi veicolari). Il numero complessivo di unità statistiche che compongono i dati storici in nostro possesso è pari a 14 giorni:

- 1 settimana del periodo estivo 2008;
- 1 settimana del periodo invernale 2008;

Nelle seguenti figure (da Figura 25 a Figura 38) **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** si mostra la rappresentazione grafica fornita attraverso il software dell'unità statistica delle 14 unità statistiche oggetto di studio. Sull'asse delle ascisse si trovano le 2112 variabili: 11 stazioni con i relativi 96 intervalli per le due classi veicolari. Sull'asse delle ordinate si individuano i valori dei flussi in ingresso. La linea nera indica l'andamento nella giornata dei transiti dei veicoli leggeri, mentre quella rossa quello dei veicoli pesanti.

Andamento giornaliero di tutte le sezioni

Lu 28/7/08

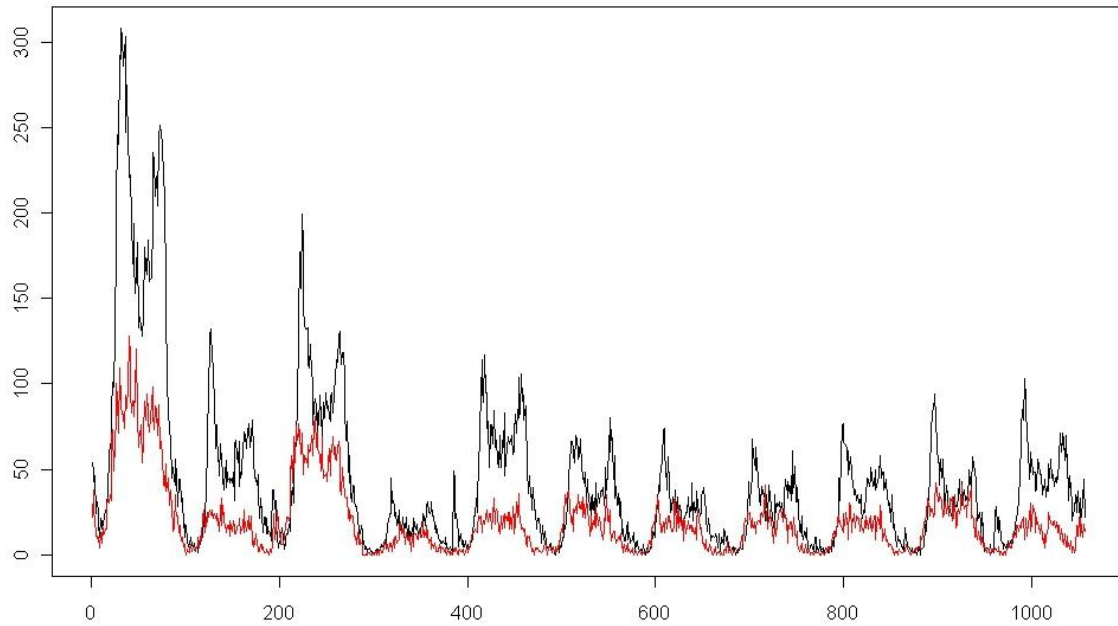


Figura 25 Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Lunedì periodo estivo

Andamento giornaliero di tutte le sezioni

Ma 29/7/08

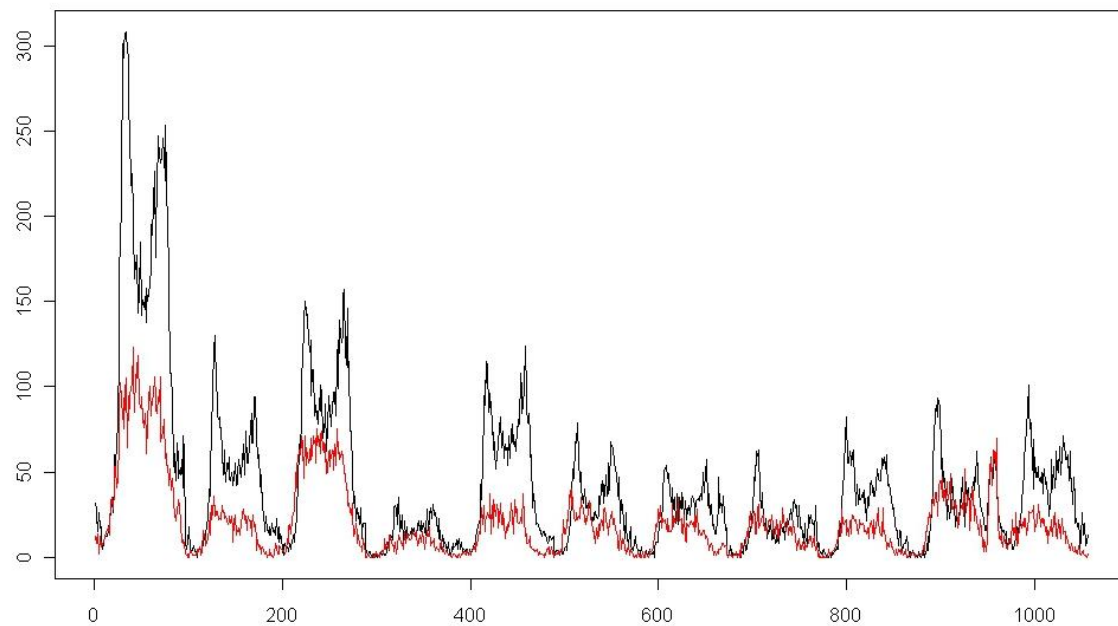


Figura 26 Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Martedì periodo estivo

Andamento giornaliero di tutte le sezioni
Me 30/7/08

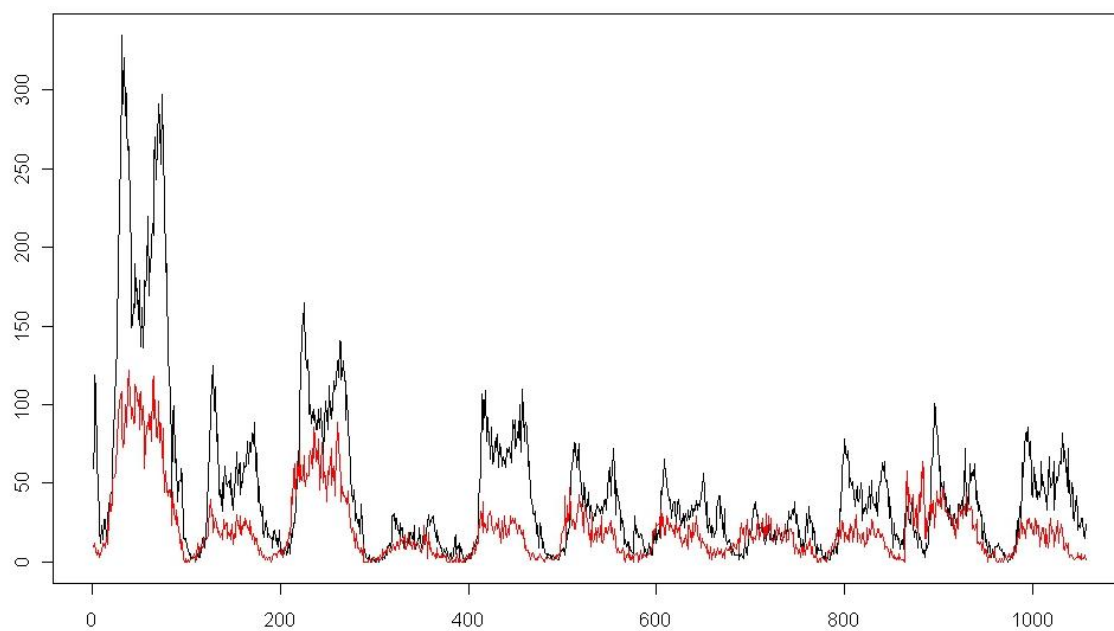


Figura 27 Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Mercoledì periodo estivo

Andamento giornaliero di tutte le sezioni
Gi 31/7/08

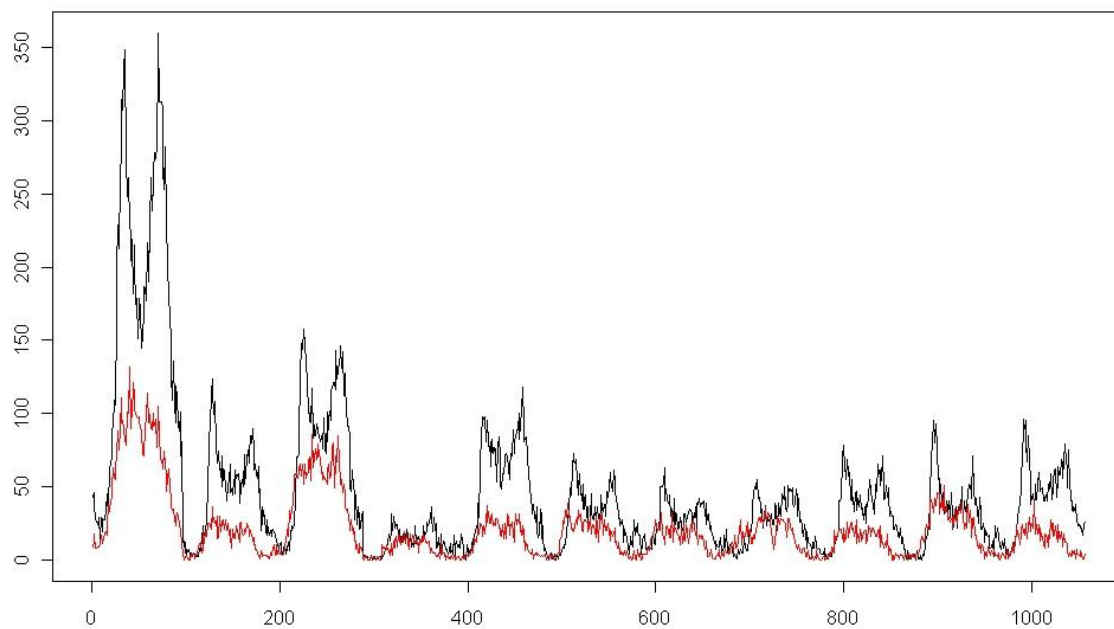


Figura 28 Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Giovedì periodo estivo

Andamento giornaliero di tutte le sezioni

Ve 1/8/08

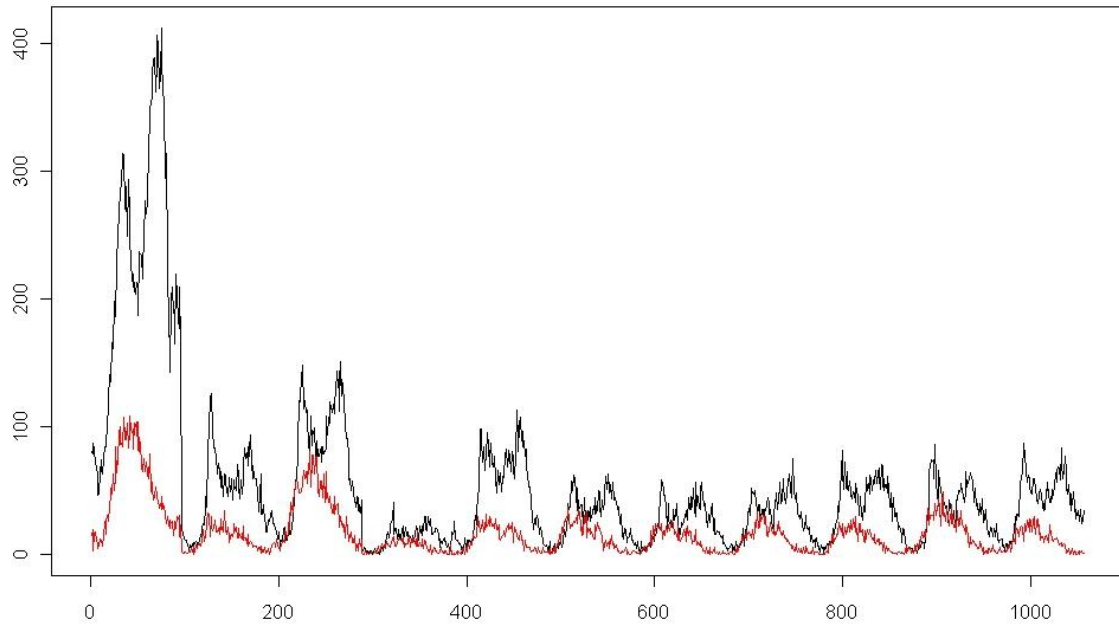


Figura 29 Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Venerdì periodo estivo

Andamento giornaliero di tutte le sezioni

Sa 2/8/08

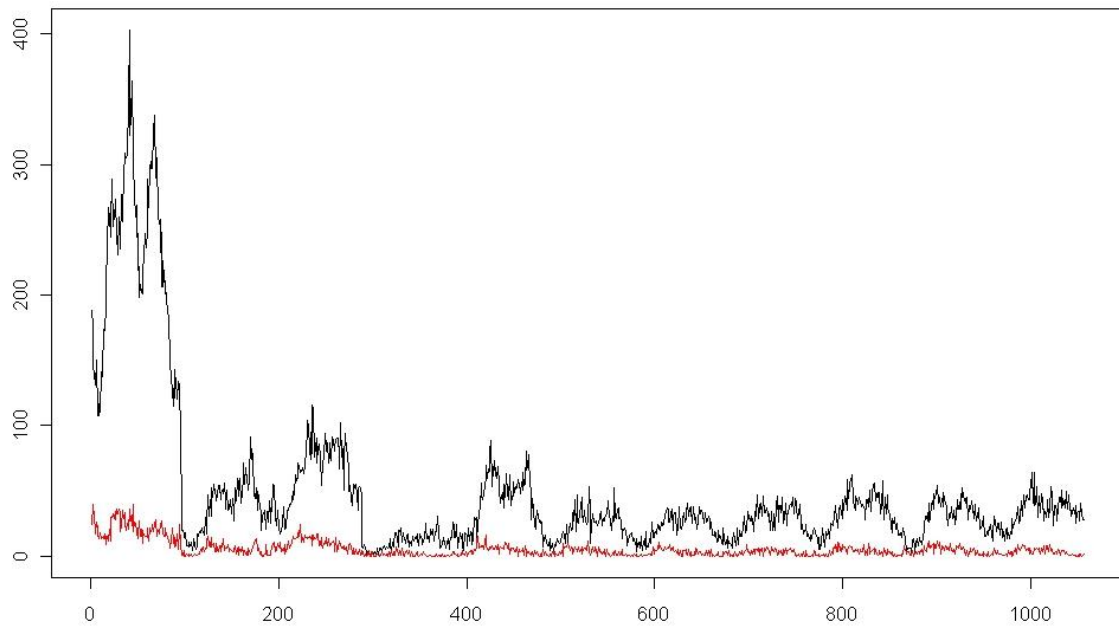


Figura 30 Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Sabato periodo estivo

Andamento giornaliero di tutte le sezioni
Do 3/8/08

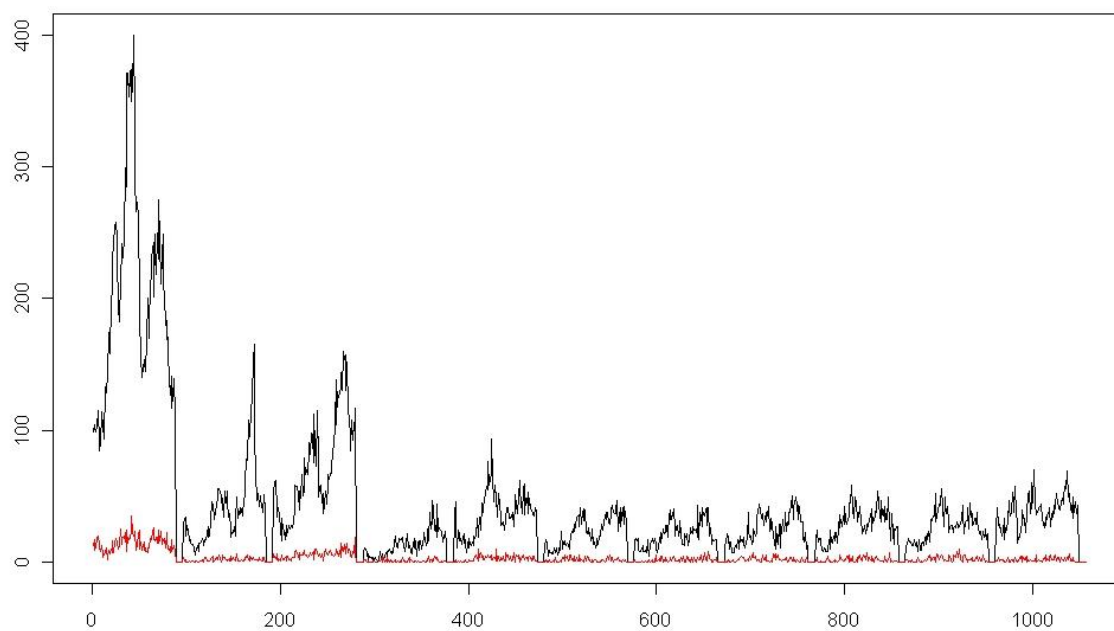


Figura 31 Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Domenica periodo estivo

Andamento giornaliero di tutte le sezioni
Lu 3/11/08

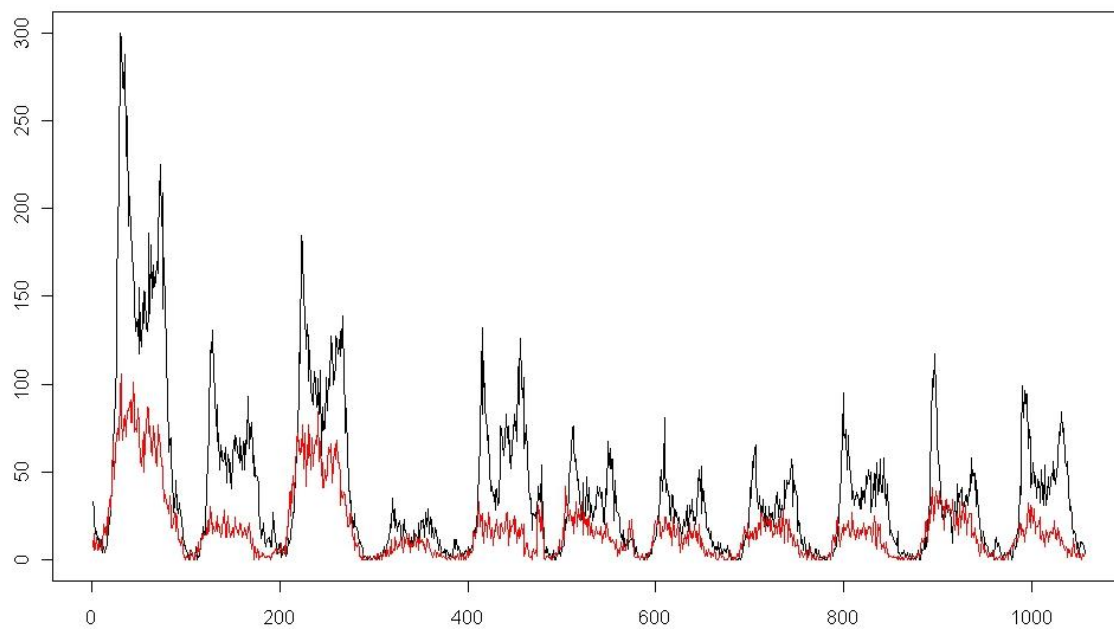


Figura 32 Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Lunedì periodo invernale

Andamento giornaliero di tutte le sezioni
Ma 4/11/08

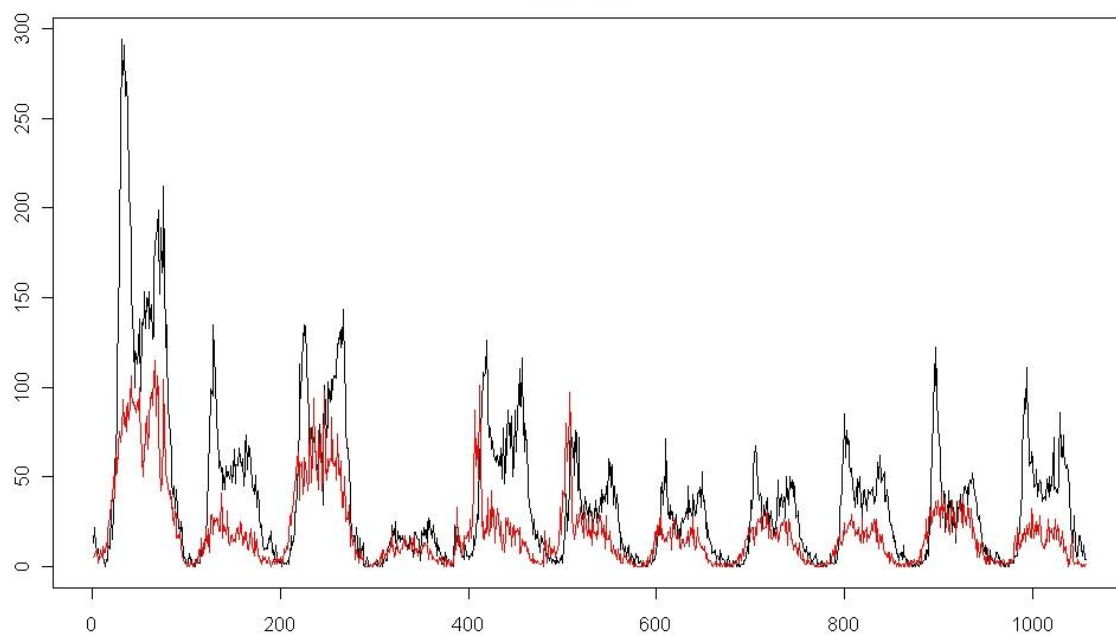


Figura 33 Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Martedì periodo invernale

Andamento giornaliero di tutte le sezioni
Me 5/11/08

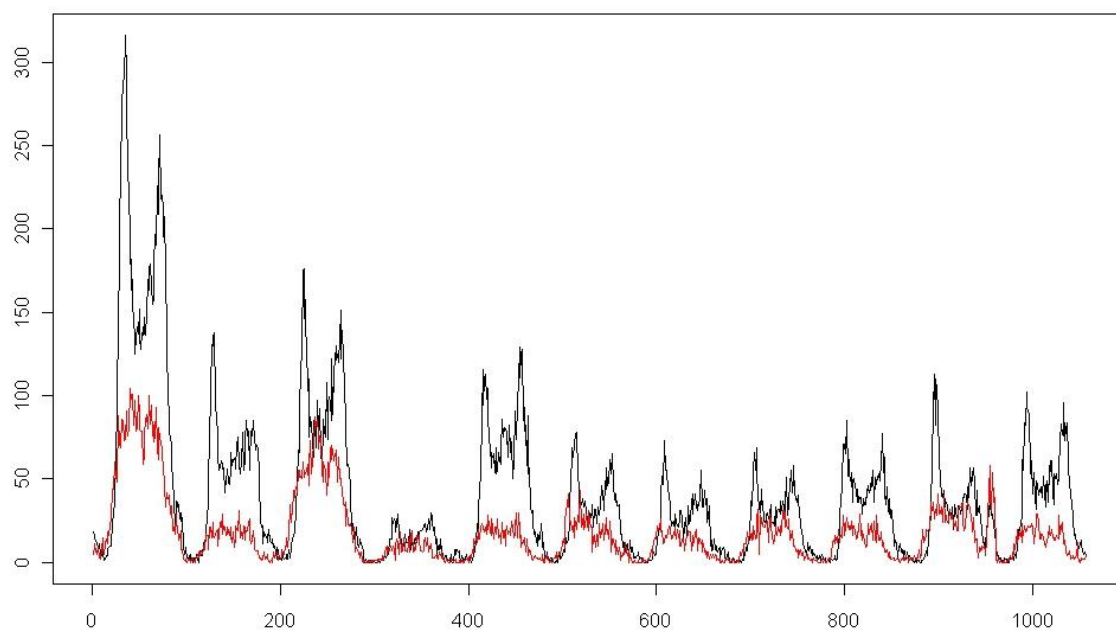


Figura 34 Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Mercoledì periodo invernale

Andamento giornaliero di tutte le sezioni
Gi 6/11/08

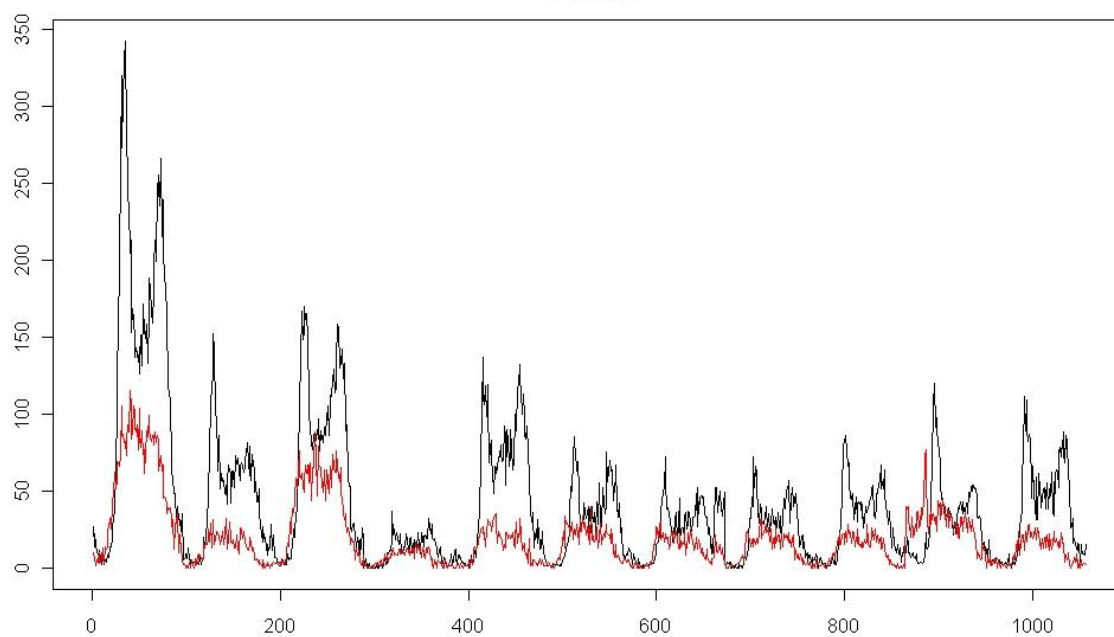


Figura 35 Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Giovedì periodo invernale

Andamento giornaliero di tutte le sezioni
Ve 7/11/08

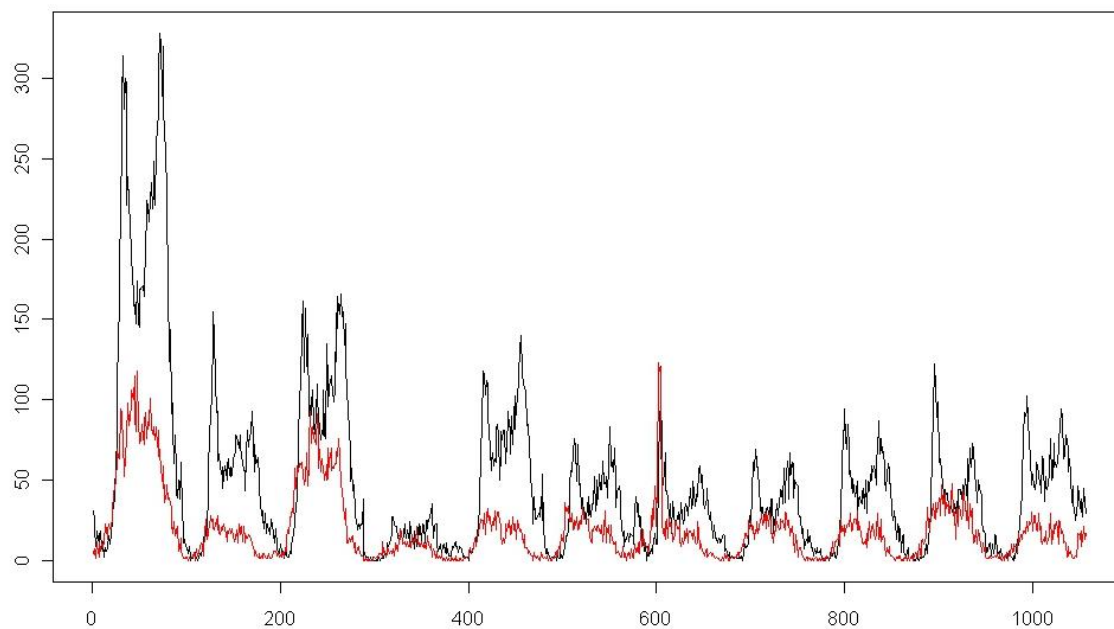


Figura 36 Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Venerdì periodo invernale

Andamento giornaliero di tutte le sezioni
Sa 8/11/08

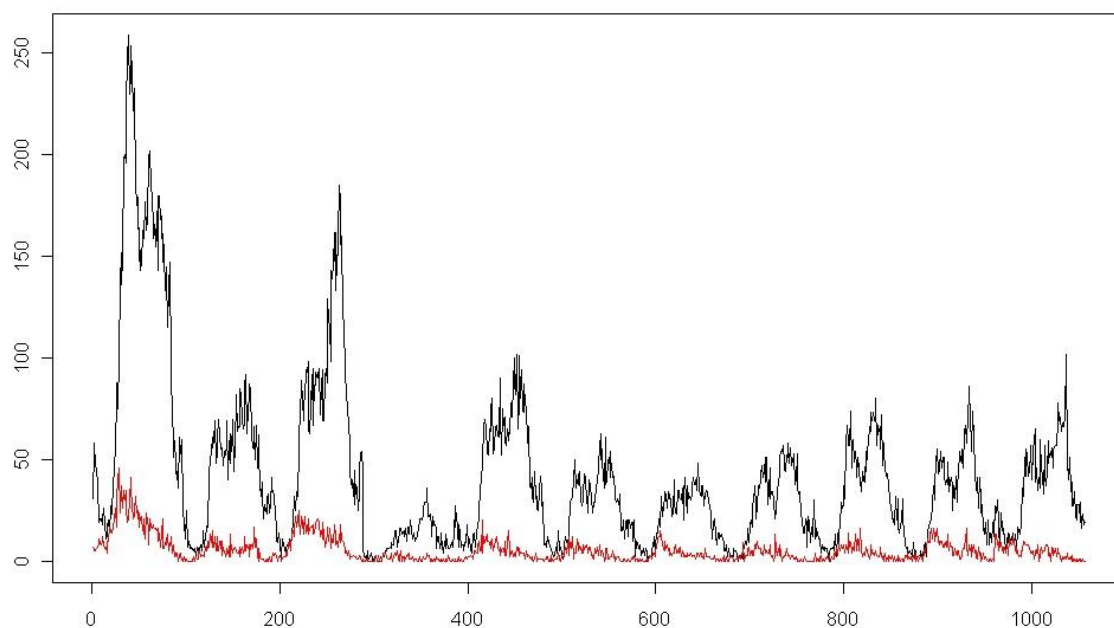


Figura 37 Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Sabato periodo invernale

Andamento giornaliero di tutte le sezioni
Do 9/11/08

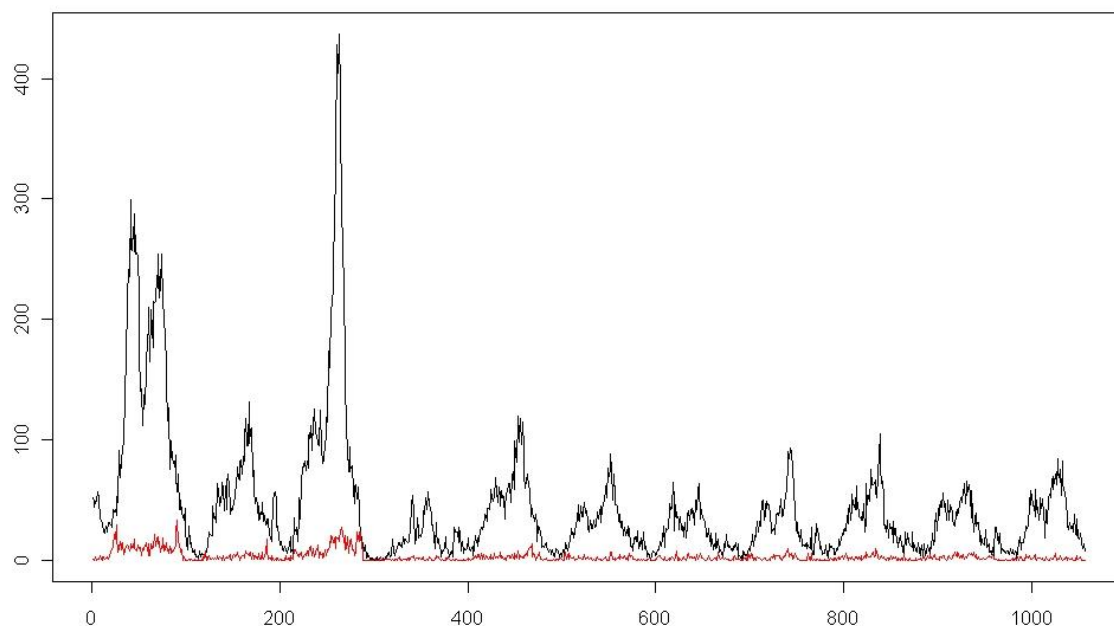


Figura 38 Rappresentazione dell'andamento dei flussi in ingresso giornalieri dalle stazioni – Domenica periodo invernale

Dal confronto tra le figure si evince che gli andamenti dei flussi di un giorno feriale e di uno festivo sono differenti. Nel giorno feriale l'andamento dei flussi dei veicoli leggeri presenta chiaramente due massimi localizzati negli intervalli delle ore di punta del giorno per ciascuna delle stazioni, nel giorno festivo invece questo andamento risulta meno marcato. Per ciò che

riguarda i veicoli pesanti si nota che i transiti durante il giorno festivo assumono valori significativamente minori rispetto al giorno ferialo, questo fenomeno può essere ricondotto alle limitazioni imposte dalla normativa italiana alla circolazione dei mezzi pesanti sulle autostrade durante il week-end.

Nelle immagini riportate di seguito (da Figura 39 a Figura 49) si mostra la variabilità di ciascuna variabile che descrive l'andamento dei flussi nei 96 intervalli di una giornata per un solo casello. La rappresentazione attraverso i box-plot indica la dispersione dei valori assunti da ciascuna delle variabili nei 14 giorni esaminati relativamente ad una sezione. I rettangoli in verde indicano la variabilità dei valori di flusso dei veicoli leggeri quelli in rosso quella dei veicoli pesanti. La maggiore dimensione del rettangolo rosso o verde indica che i valori assunti dalla variabile relativa risultano maggiormente dispersi nelle 14 osservazioni, al contrario tanto più è piccolo il rettangolo tanto più i valori risultano simili tra loro. Si può notare che nelle ore notturne il valore dei flussi registrati nei 14 giorni non registra significative variazioni, mentre nelle ore centrali della giornata tali variazioni sono maggiori.

Boxplot dei transiti ogni 15 minuti, sezione:

445

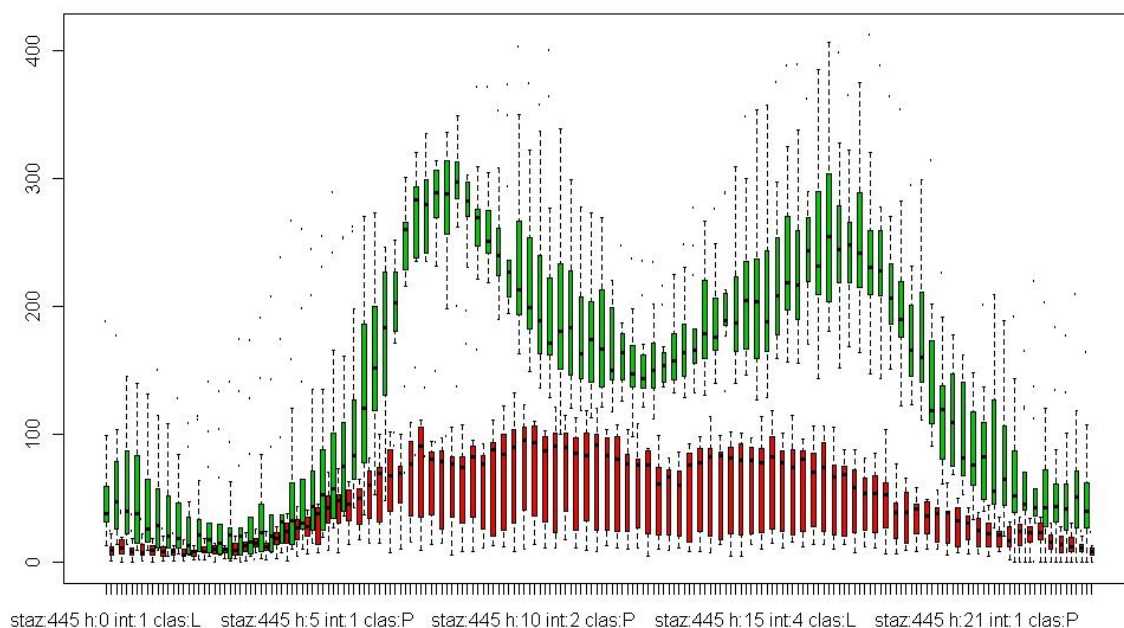


Figura 39 Grafico Box-plot relativo alla stazione 445 Barriera Villanova TO

Boxplot dei transiti ogni 15 minuti, sezione:

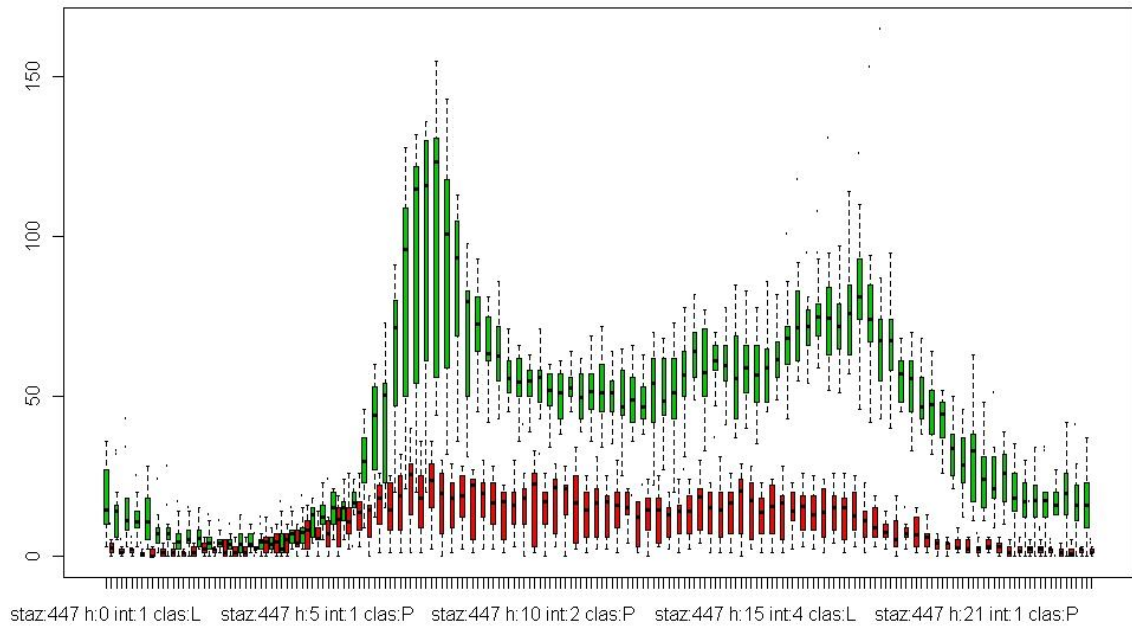


Figura 40 Grafico Box-plot relativo alla stazione 447 Asti Ovest

Boxplot dei transiti ogni 15 minuti, sezione:

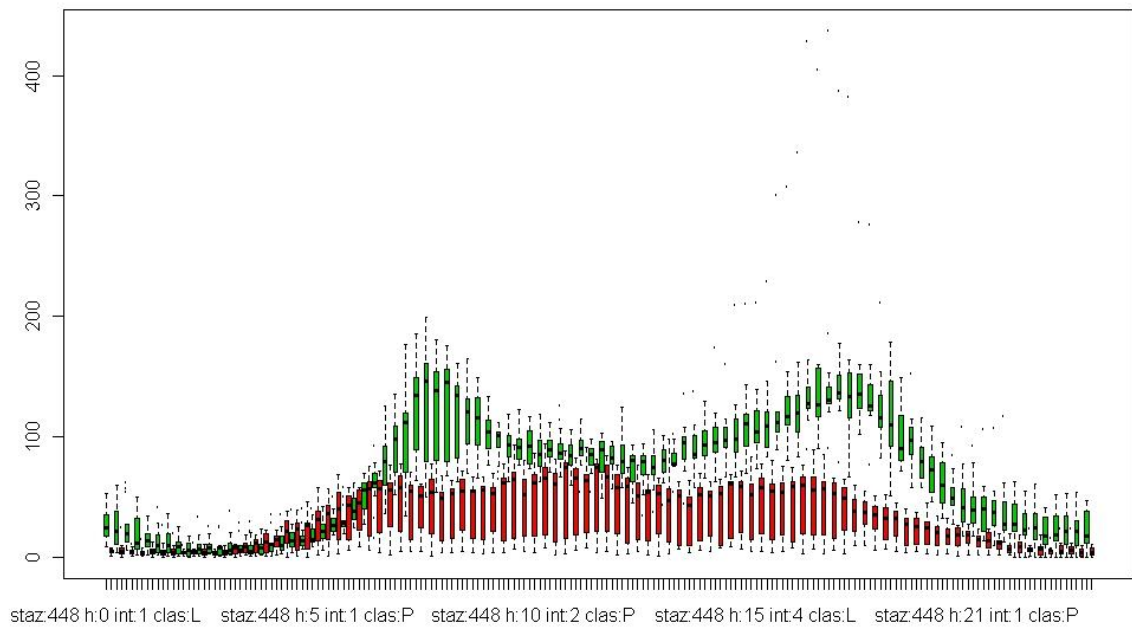


Figura 41 Grafico Box-plot relativo alla stazione 448 Asti Est

Boxplot dei transiti ogni 15 minuti, sezione:

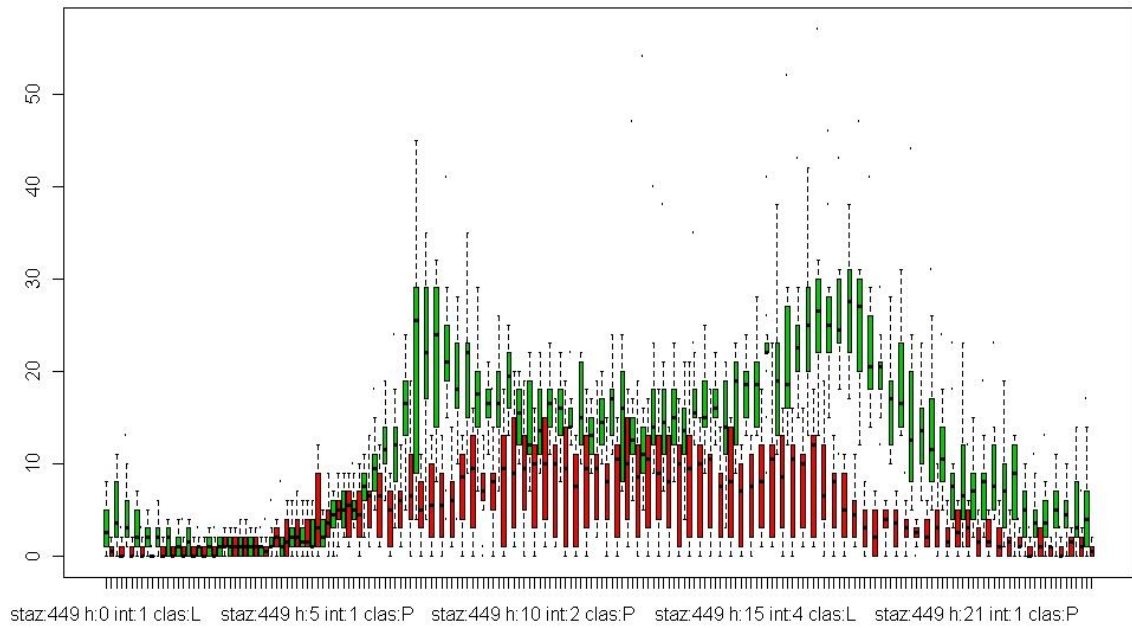


Figura 42 Grafico Box-plot relativo alla stazione 449 Felizzano

Boxplot dei transiti ogni 15 minuti, sezione:

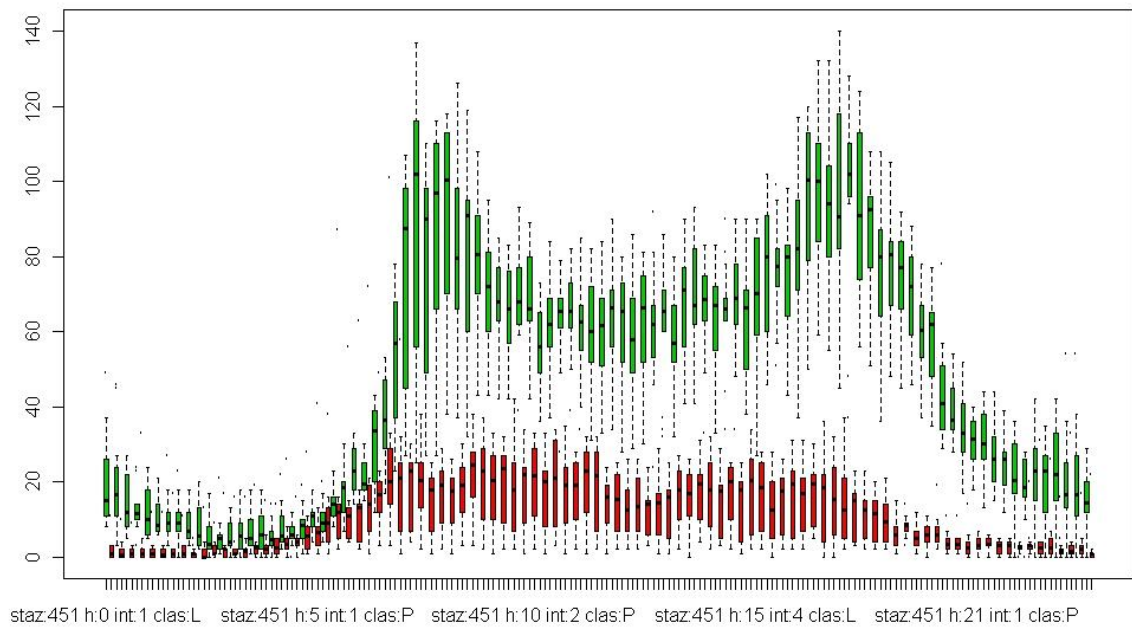


Figura 43 Grafico Box-plot relativo alla stazione 451 Alessandria Ovest

Boxplot dei transiti ogni 15 minuti, sezione:

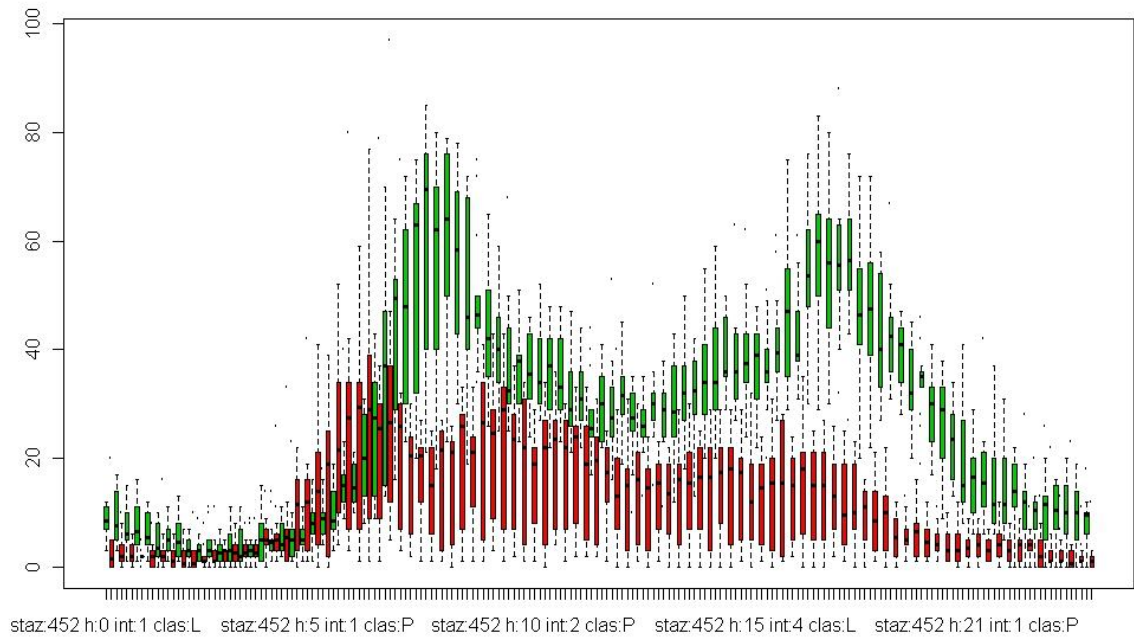


Figura 44 Grafico Box-plot relativo alla stazione 452 Alessandria Est

Boxplot dei transiti ogni 15 minuti, sezione:

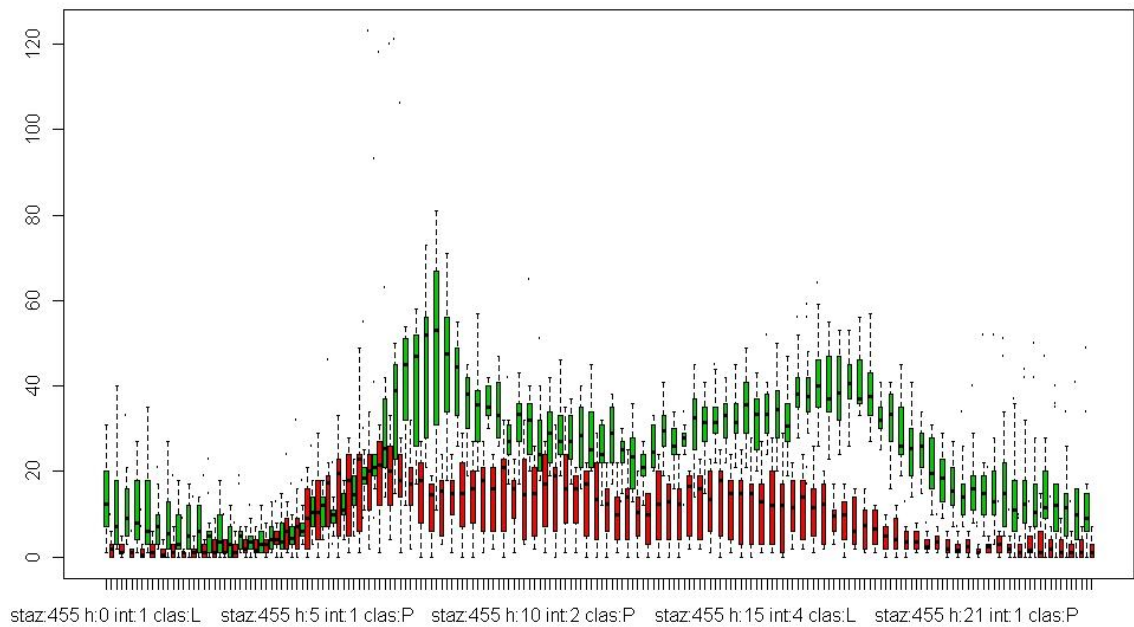


Figura 45 Grafico Box-plot relativo alla stazione 455 Voghera

Boxplot dei transiti ogni 15 minuti, sezione:

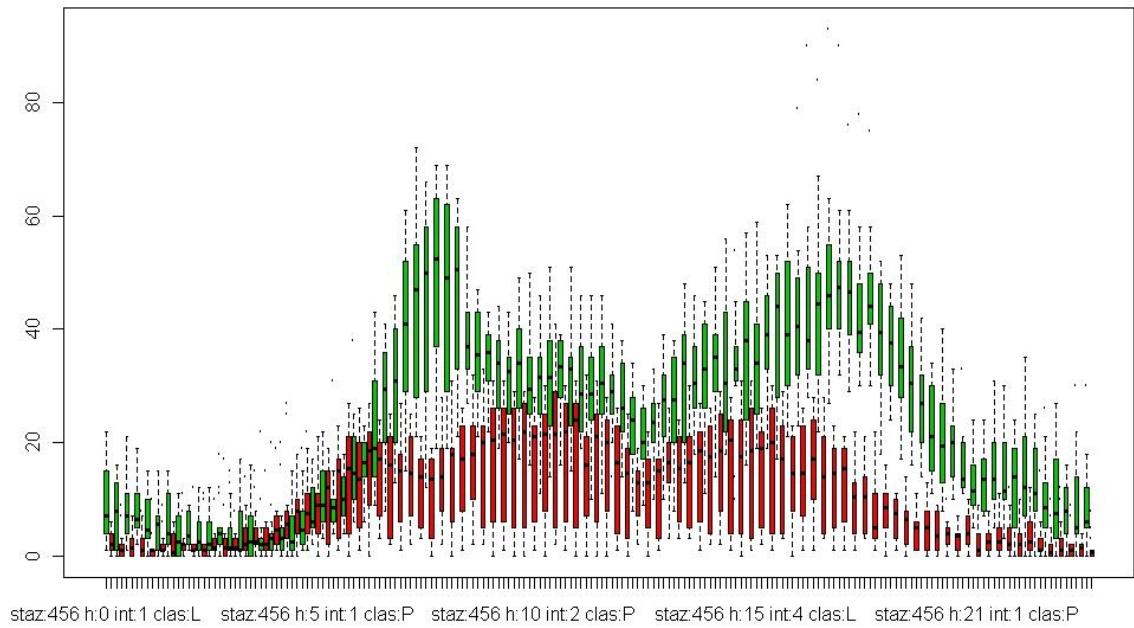


Figura 46 Grafico Box-plot relativo alla stazione 456 Casteggio

Boxplot dei transiti ogni 15 minuti, sezione:

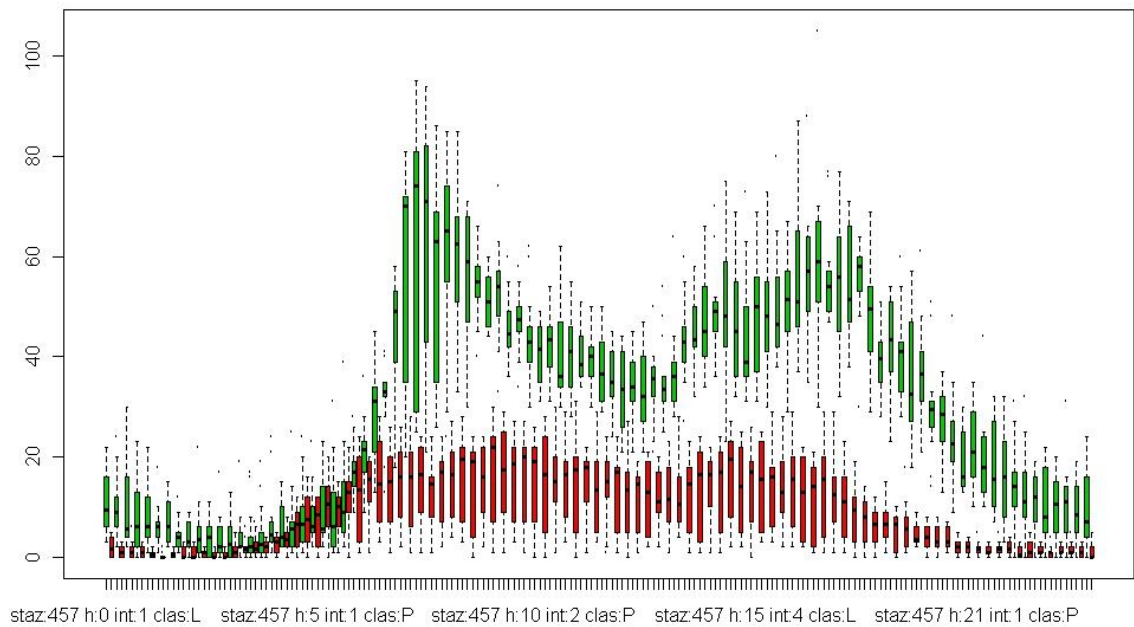


Figura 47 Grafico Box-plot relativo alla stazione 457 Broni Stradella

Boxplot dei transiti ogni 15 minuti, sezione:

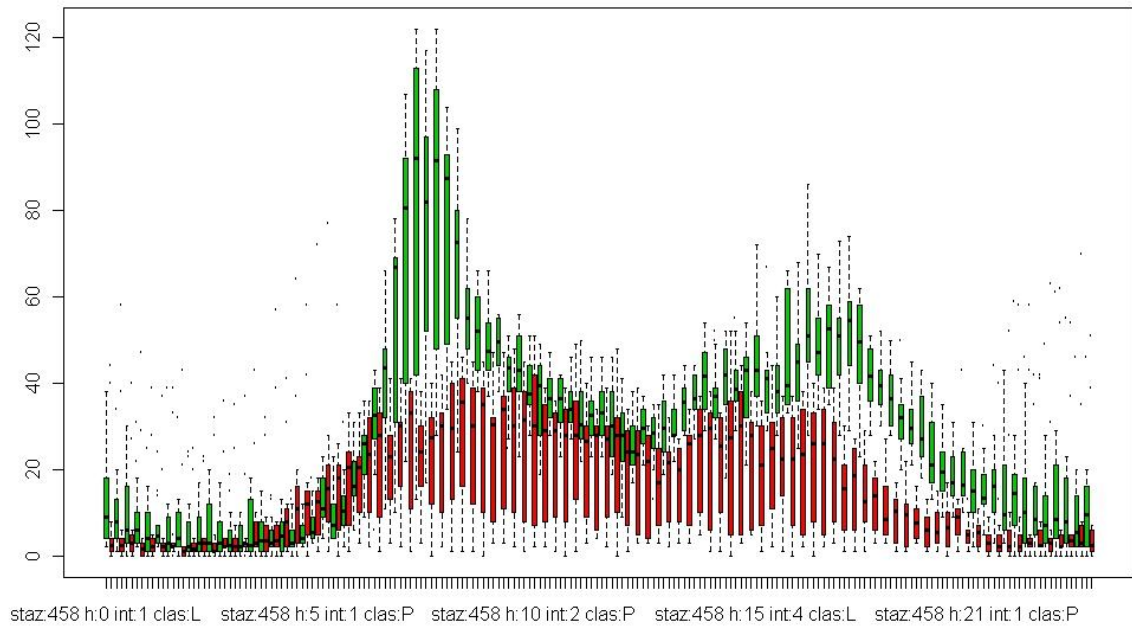


Figura 48 Grafico Box-plot relativo alla stazione 458 Castel san Giovanni

Boxplot dei transiti ogni 15 minuti, sezione:

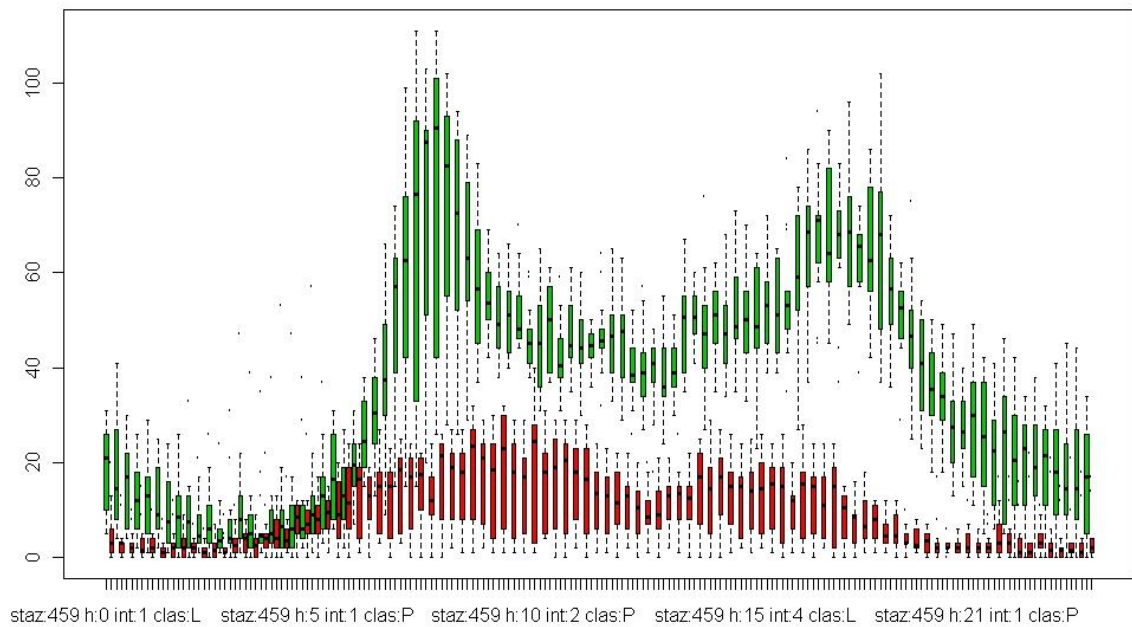


Figura 49 Grafico Box-plot relativo alla stazione 459 Piacenza Ovest

L'obiettivo del processo di cluster analysis è quello di costruire dei gruppi, partendo da un campione di grandi dimensioni di dati eterogenei, associando tra loro le unità statistiche con caratteristiche omogenee (Richard A & Dean W, 2007). I gruppi individuati vengono chiamati:

cluster. Il raggruppamento dei dati nei cluster avviene in base a quanto i valori assunti dalle variabili risultano simili tra loro secondo dei criteri adeguati.

L'analisi dei cluster può essere divisa in due fondamentali passi:

- 1) scelta di una misura di dissimilarità: si tratta di determinare per ogni coppia di osservazioni del campione la loro dissimilarità, espressa come la loro distanza. Minore risulta la distanza tra due osservazioni tanto più queste possono considerarsi simili tra loro.
- 2) scelta dei gruppi: sulla base della vicinanza tra le osservazioni si tratta di assegnare le stesse ai diversi gruppi, in modo che le distanze tra i gruppi siano elevate e i dati in un gruppo siano il più vicino (simili) possibile.

La vicinanza (similarità) tra gli oggetti è descritta attraverso una matrice D di dimensioni $n \times n$ dove n è il numero degli oggetti del campione. Gli elementi della matrice rappresentano le distanze tra una coppia di osservazioni, maggiore è il valore di tale distanza più le due osservazioni sono dissimili tra loro.

Due delle dissimilarità più utilizzate per calcolare la differenza tra due osservazioni sono la distanza di Euclide e quella di Canberra. La distanza euclidea, in un sistema bidimensionale, è la distanza tra due punti che può essere misurata in un piano con un righello e determinata attraverso la formula del teorema di Pitagora.

$$d(x, y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2}$$

eq. 8 distanza euclidea

La distanza di Canberra è determinabile tramite la formula seguente, tale distanza è definita solo per variabili non negative, ha la caratteristica di essere sensibile alle differenze relative piuttosto che a quelle assolute. Questa distanza assegna alla differenza fra i valori che una variabile assume in due osservazioni un peso inversamente proporzionale alla somma dei valori stessi: dunque, la medesima differenza ha un peso maggiore se è osservata fra due valori piccoli. Uno dei problemi di questa distanza è costituito dal fatto che, se uno dei due valori relativi ad una data variabile è uguale a zero, allora il contributo alla distanza totale sarà pari a 1, cioè il massimo possibile. La metrica di Canberra, dunque, si presta bene per trattare serie di dati eterogenei tra loro senza, però, che siano presenti molti valori nulli.

$$d(x, y) = \sum_{i=1}^p \frac{|x_i - y_i|}{(x_i + y_i)}$$

eq. 9 distanza di Canberra

L'analisi di clusterizzazione può essere condotta secondo due differenti tecniche: agglomerative o divisive hierarchical methods. Nel primo metodo si considerano in fase iniziale del processo un numero di cluster pari al numero delle osservazioni del campione. Le osservazioni vengono quindi raggruppate gradualmente secondo la loro similarità. Nel secondo metodo invece al contrario si considerano tutti gli elementi appartenenti ad un unico cluster, che viene diviso in sottocluster a seconda del grado di dissimilarità tra le osservazioni appartenenti a ciascuno.

Nel processo di clustering gerarchico i criteri di collegamento tra elementi dei differenti gruppi sono i seguenti:

- single linkage: considera la minima distanza (o la massima similarità) misurata tra gli elementi di due cluster;
- complete linkage: considera la massima distanza tra gli elementi di due cluster;
- average linkage: considera la media delle distanze tra le possibili coppie degli elementi di due cluster.

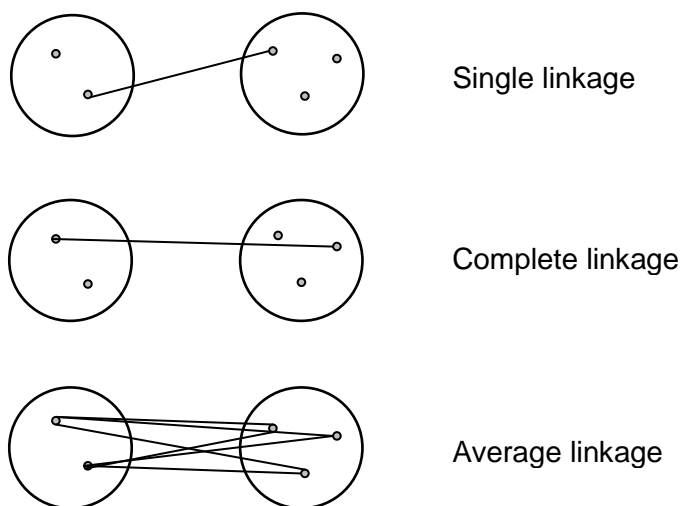


Figura 50 Rappresentazione esemplificativa dei criteri di collegamento

Per fornire una rappresentazione grafica del processo di raggruppamento delle unità statistiche nelle tecniche di [clustering](#), viene utilizzato il dendrogramma che esprime:

- sull'asse delle ordinate, la distanza logica dei cluster secondo la metrica definita;
- sull'asse delle ascisse pone le osservazioni del campione.

Il valore della distanza alla quale eseguire la sezione del dendrogramma definisce il numero di cluster in cui verranno suddivise le osservazioni del campione. La scelta della distanza deve essere eseguita secondo due criteri:

- spostandosi verticalmente nell'intorno del valore della distanza scelta non deve cambiare il numero di cluster individuati;
- il numero di cluster individuato deve essere compatibile con gli obiettivi per cui si è eseguita la cluster analysis.

Attraverso il processo di cluster analysis, a partire dalle 14 unità statistiche, sono stati individuati i seguenti dendrogrammi (Figura 51) secondo le differenti tipologie di distanze e di metodi applicati. Il dendrogramma (Figura 52) che appare meglio rappresentare l'organizzazione dei gruppi delle osservazioni è quello ottenuto utilizzando la distanza euclidea e il metodo average linkage. In tale dendrogramma (Figura 53) sono chiaramente individuabili 4 cluster. Le osservazioni appartenenti al campione risultano raggruppate nei quattro cluster come in Tabella 29:

Cluster	Nome cluster	Osservazioni
Cluster 1	Feriali	Lunedì 28/07/08 Martedì 29/07/08 Mercoledì 30/07/08 Giovedì 31/07/08 Lunedì 3/11/08 Martedì 4/11/08 Mercoledì 5/11/08 Giovedì 6/11/08 Venerdì 7/11/08
Cluster 2	Venerdì esodo	Venerdì 1/08/08
Cluster 3	Festivi estivi	Sabato 2/08/08 Domenica 3/08/08
Cluster 4	Festivi invernali	Sabato 8/11/08 Domenica 9/11/08

Tabella 29 Ripartizione delle osservazioni secondo i cluster individuati

Sul risultato ottenuto dalla cluster analysis è possibile fare alcune osservazioni che tengano conto degli andamenti dei flussi mostrati nelle figure Figura 25 - Figura 38:

- è significativo che dal processo di clusterizzazione risultino associati a cluster differenti i giorni feriali e i giorni festivi. Tale suddivisione è fortemente dipendente dalla differenza dei flussi dei mezzi pesanti nei giorni lavorativi e nei week-end;
- i giorni dei fine settimana presenti nel campione analizzato vengono suddivisi in due cluster differenti. Tale separazione può essere dovuta ai differenti flussi legati al turismo e allo svago che caratterizzano il periodo estivo e quello invernale;
- per quanto riguarda il cluster 2 costituito dal solo venerdì del periodo estivo è possibile osservare che questo giorno può essere caratterizzato da un andamento dei flussi differente da quello degli altri. Il primo venerdì di agosto potrebbe essere stato giorno di partenza per le vacanze estive per numerosi utenti. Spesso gli spostamenti per motivi turistici sono concentrati nei giorni finali della settimana e non sono caratterizzati dalla regolarità che invece è propria dei giorni lavorativi.

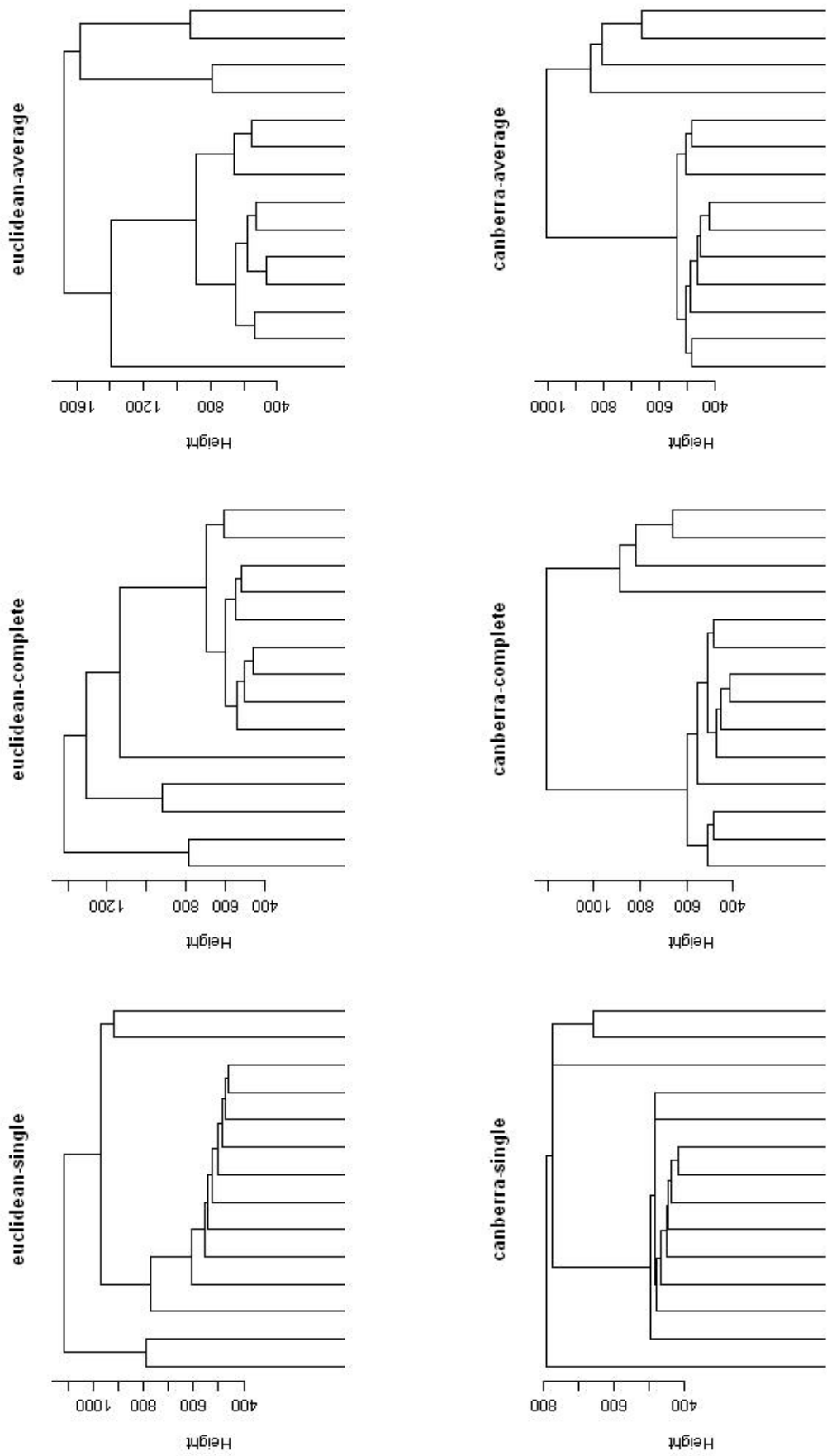


Figura 51 Rappresentazione dei dendrogrammi ottenuti con differenti distanze e metodi

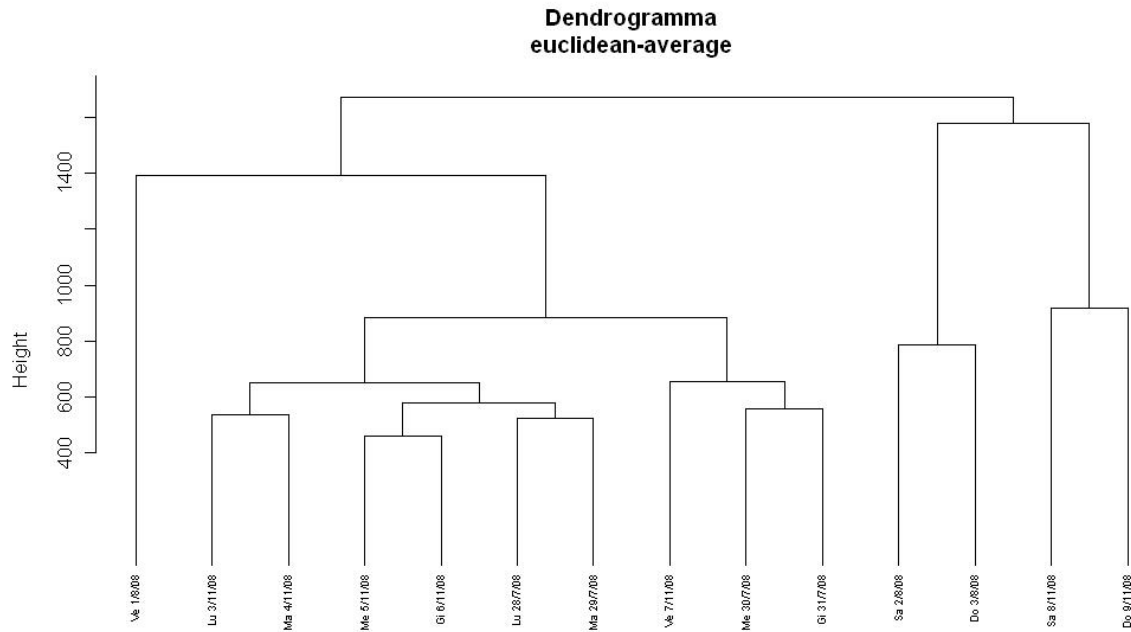


Figura 52 Dendrogramma che meglio rappresenta le distanze tra le osservazioni

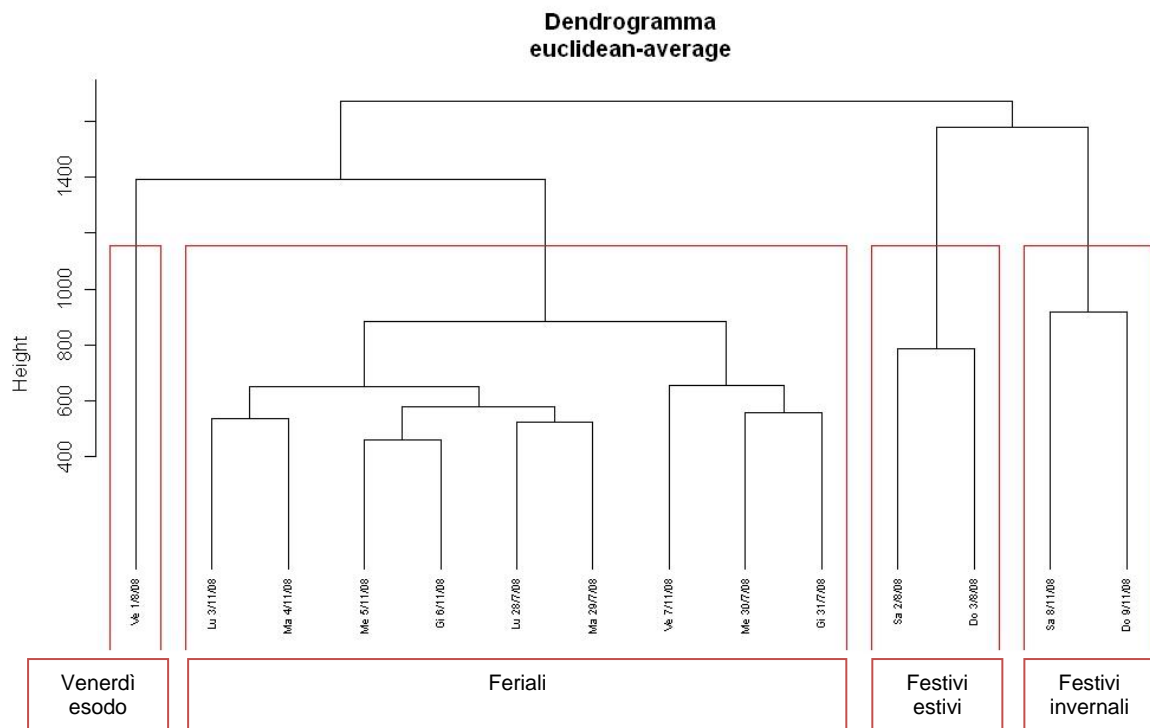


Figura 53 Dendrogramma in cui appaiono individuati i quattro cluster

Un strumento che può essere utilizzato per rappresentare in uno spazio a poche dimensioni le distanze tra le unità statistiche del campione di osservazioni è il Multidimensional Scaling (MDS). Si tratta di un algoritmo alla base del quale sta la determinazione della matrice delle distanze tra osservazioni, calcolate in N dimensioni (dove N può essere pari al numero delle variabili che descrivono ogni osservazione). Determinata tale matrice l'algoritmo assegna

una posizione ad ogni osservazione in uno spazio con un numero minore di dimensioni, rispetto allo spazio originale, cercando di mantenere le proporzioni delle distanze contenute nella matrice. In questo modo è possibile rappresentare in un piano bidimensionale la posizione delle osservazioni, mantenendo le proporzioni tra le distanze che esse avrebbero nelle 2112 variabili che le descrivono, e riconoscere in questo piano i cluster identificati tramite la cluster analysis,. In Figura 54 si riporta la rappresentazione ottenuta attraverso il MDS delle 14 osservazioni, nella quale sono chiaramente identificabili le distanze tra le osservazioni e di conseguenza i quattro cluster individuati attraverso il processo di clusterizzazione.

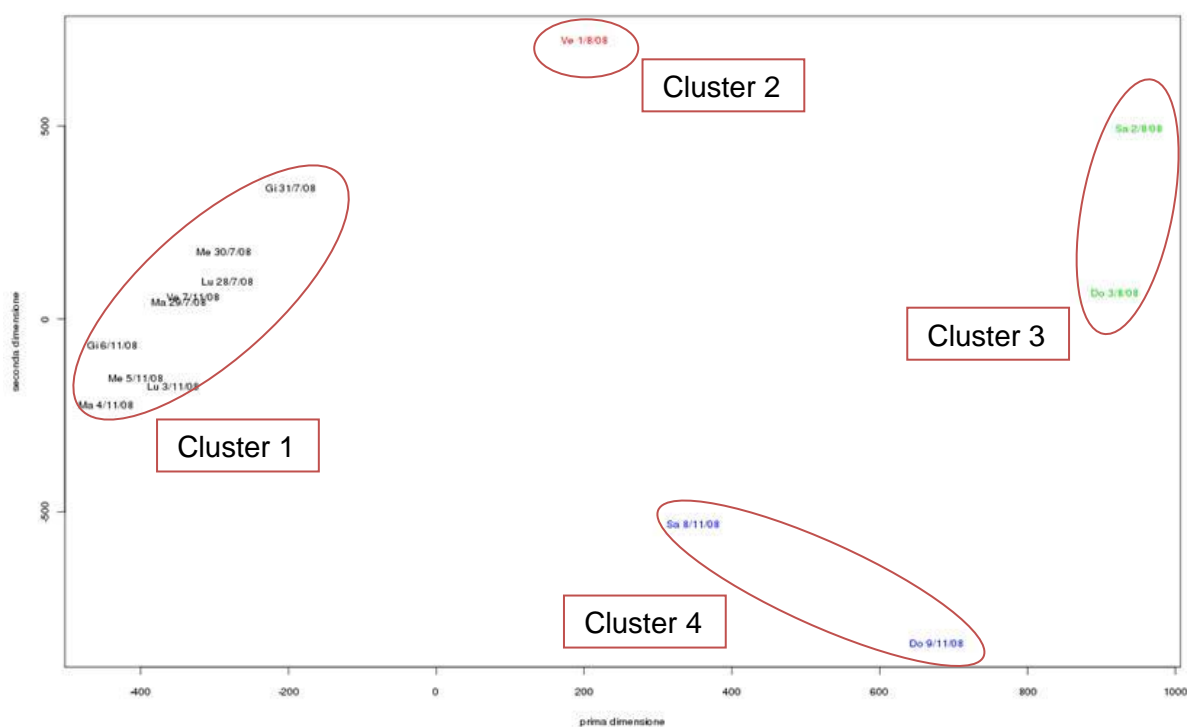


Figura 54 Rappresentazione dei cluster attraverso MDS

Una volta individuati i quattro cluster si costruiscono i profili degli andamenti dei flussi come media degli andamenti degli stessi nei giorni appartenenti a ciascun cluster (da Figura 55 a Figura 58). In Figura 59 si nota come l'andamento dei flussi dei veicoli pesanti nel cluster 1 sia caratterizzato da valori massimi in corrispondenza delle ore di punta della mattina e della sera, mentre nel cluster 3 tale andamento risulta meno marcato. In Figura 60 è possibile notare il differente andamento di flussi dei veicoli pesanti descritto dai due cluster rappresentati. La differenza tra i profili può essere ricondotta alle restrizioni sulla circolazione cui sono soggetti i mezzi nei giorni festivi, infatti analizzando i giorni associati ai due cluster confrontati si nota che al cluster 1 appartengono giorni feriali, mentre al cluster 3 appartengono giorni festivi.

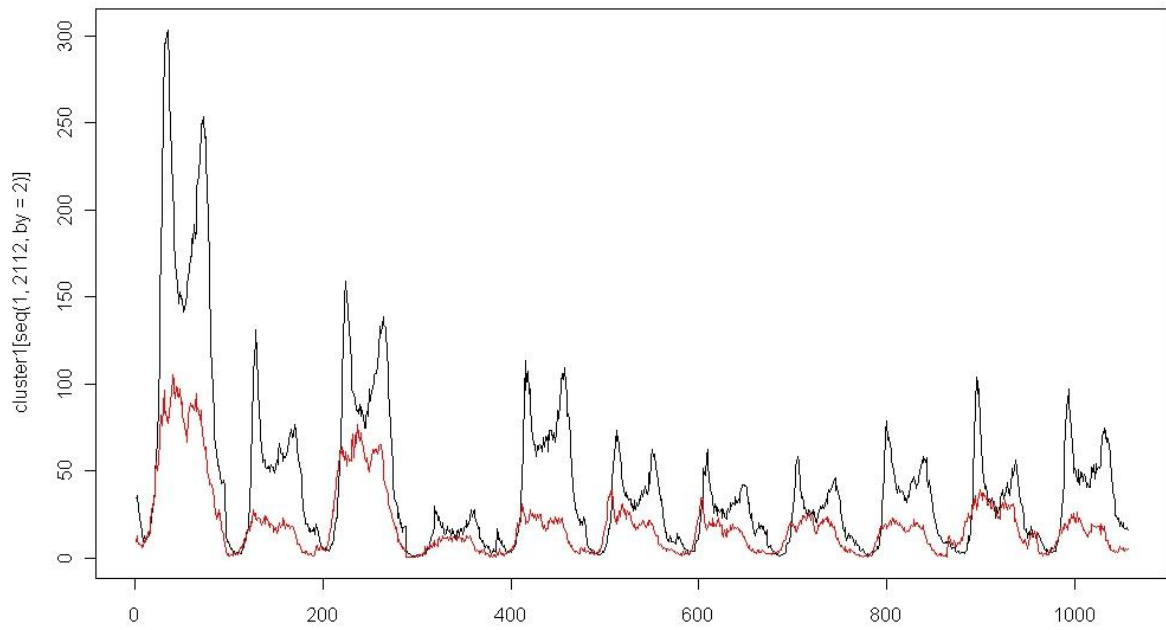


Figura 55 Andamento dei flussi del cluster 1 feriali

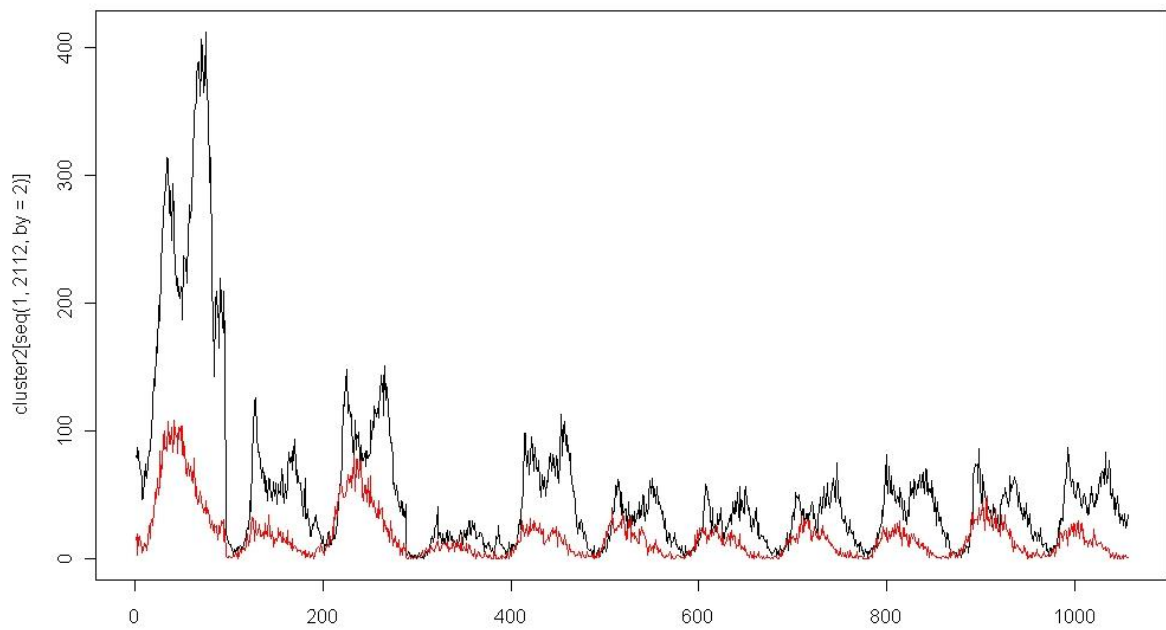


Figura 56 Andamento dei flussi del cluster 2 venerdì esodo

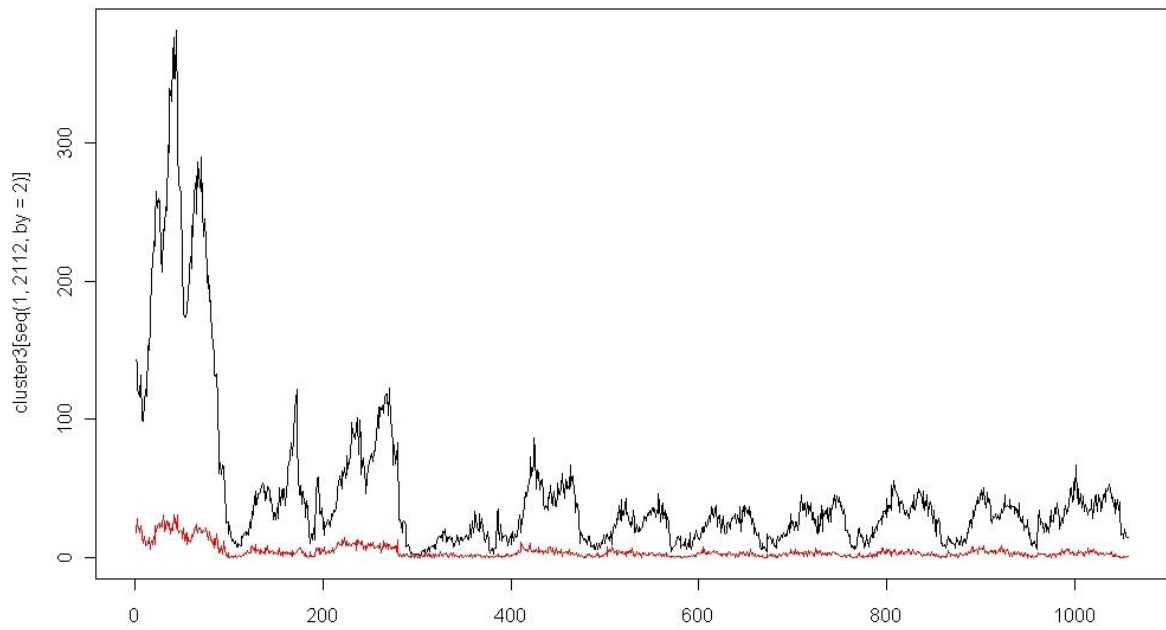


Figura 57 Andamento dei flussi del cluster 3 festivi estivi

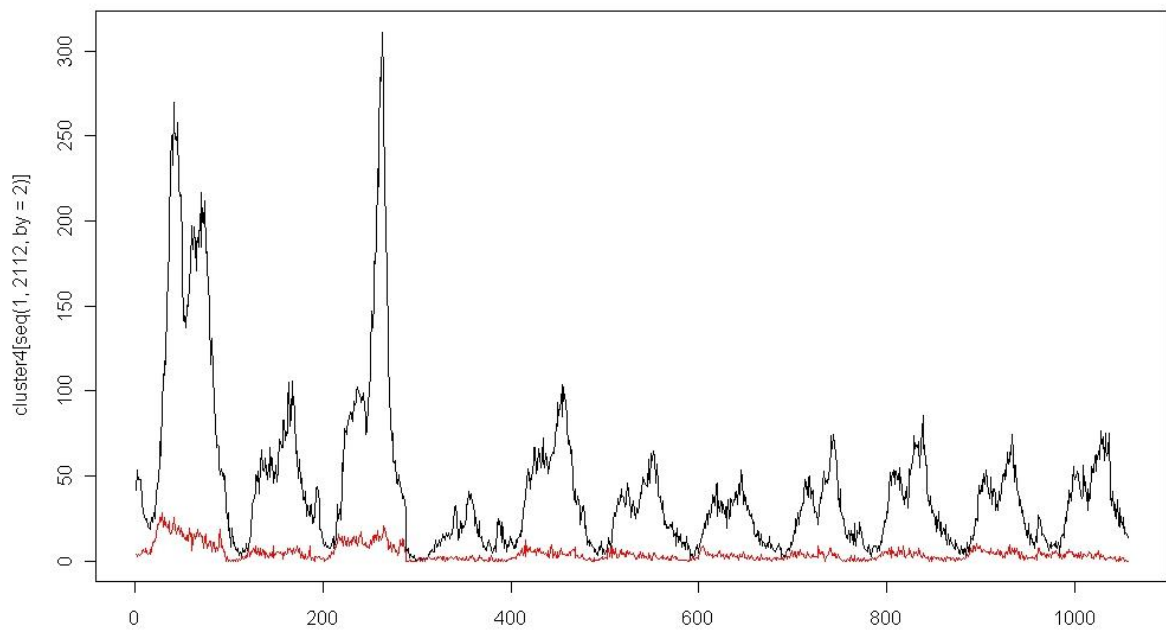


Figura 58 Andamento dei flussi del cluster 4 festivi invernali

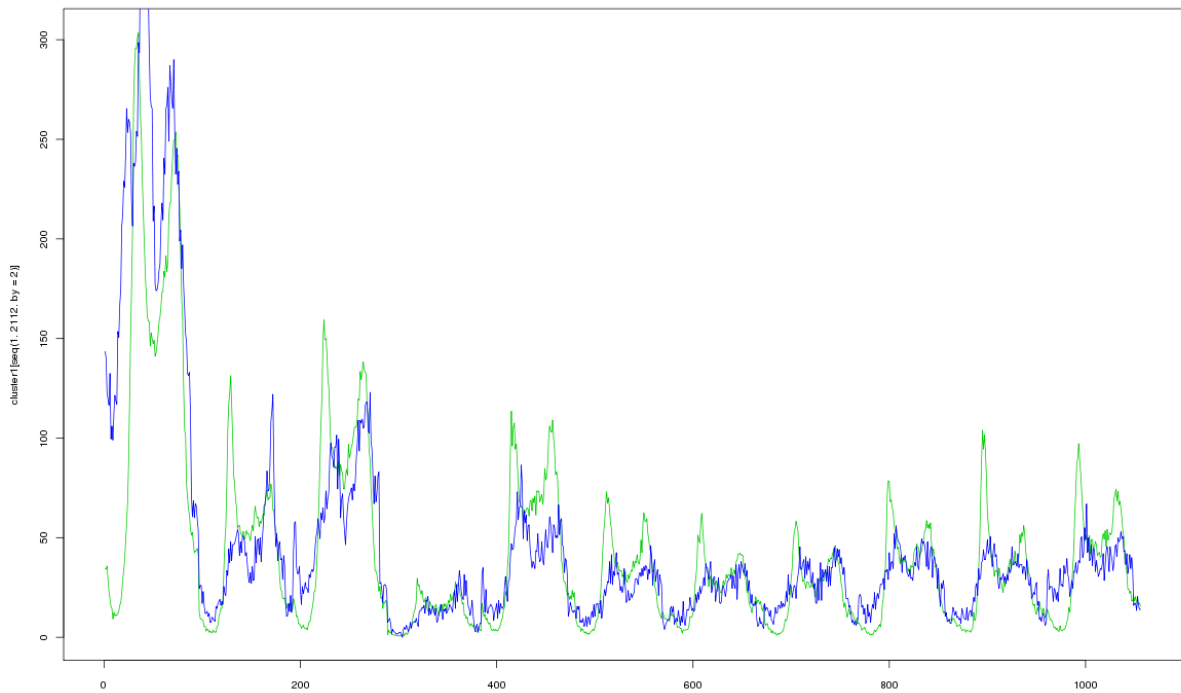


Figura 59 Confronto tra i profili dei flussi dei veicoli leggeri del cluster 1 feriali e 3 festivi estivi

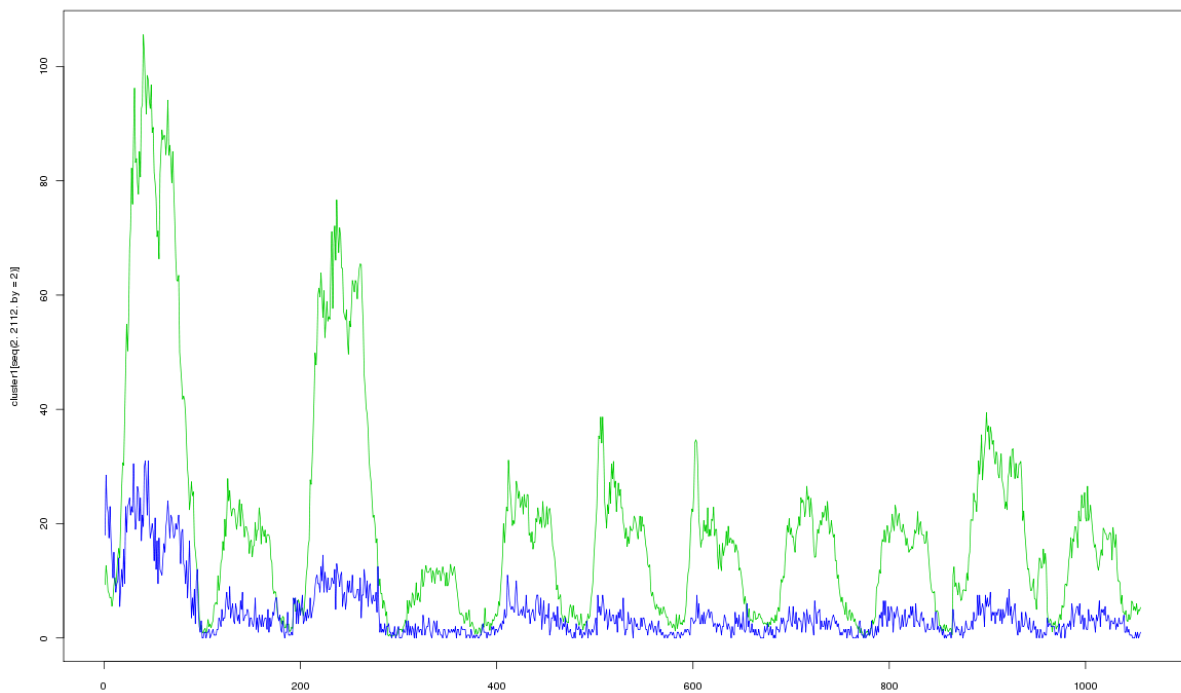


Figura 60 Confronto tra i profili dei flussi dei veicoli pesanti del cluster 1 feriali e 3 festivi estivi

Definiti i cluster delle giornate tipo e i loro profili si può procedere alla fase online di identificazione del cluster più simile al giorno attuale. Questa seconda fase dell'analisi della domanda in ingresso è la fase di identificazione, nella quale si associa una nuova osservazione al cluster ad essa più simile. Questa operazione viene eseguita creando una

matrice delle dissimilarità, cioè una matrice i cui elementi siano le distanze tra la nuova osservazione e i cluster individuati. La matrice di dissimilarità è una matrice simmetrica con gli elementi sulla diagonale nulli. La distanza utilizzata per la costruzione della matrice di dissimilarità, sarà la stessa adottata per la definizione del dendrogramma dal quale si sono ottenuti i cluster. La nuova osservazione verrà associata ad uno dei cluster secondo il criterio di minore dissimilarità, cioè di minore distanza.

	Cluster i	...	Cluster n	Nuovo giorno
Cluster i				
...				
Cluster n				
Nuovo giorno				

Tabella 30 Matrice di dissimilarità tra cluster e il giorno attuale

Questo processo di associazione del giorno attuale ad uno dei cluster avviene iterativamente al termine di ciascun intervallo di tempo in cui sono state scomposte le 24 ore della giornata. Tale operazione deve avvenire online, cioè con i dati rilevati in real-time alle stazioni di ingresso dalla società di gestione dell'autostrada. Ad ogni intervallo prefissato dovrà essere aggiornato il profilo d'andamento degli ingressi con il nuovo flusso registrato e il nuovo profilo dovrà essere confrontato con quello dei cluster individuati ricercando quale tra questi risulti il più simile. Si costruisce quindi la matrice di dissimilarità tra i cluster e questa nuova osservazione, calcolando le distanze con lo stesso metodo usato per il dendrogramma, e si individua per quale coppia formata dal cluster-iesimo e dal nuovo giorno la dissimilarità risulta minima.

A questo punto sviluppata in forma teorica la parte di modello che esegue l'identificazione del cluster più simile al giorno attuale è stata eseguita una simulazione della procedura tramite il modello. Tale simulazione dovrebbe essere eseguita con un nuovo giorno esterno al campione, ma a causa dell'esigua base di dati disponibile questa prova è stata compiuta estraendo uno dei 14 giorni dal campione e procedendo come verrà spiegato di seguito.

Prendendo uno dei 14 giorni del campione è stata simulata la fase di identificazione on-line del cluster nelle diverse ore della giornata. Il modello sviluppato cioè simula l'applicazione on-line e per ciascuna ora del giorno considerato come quello attuale, esegue il processo di identificazione precedentemente spiegato. Al trascorrere di ogni ora individua il cluster che più è simile fino a quel momento al nuovo giorno. Tale risultato è presentato in Figura 61 prendendo come giorno attuale un martedì del periodo estivo, in Figura 62 un mercoledì del periodo invernale, in Figura 63 una domenica del periodo estivo e in Figura 64 un sabato del periodo invernale. Si nota come il processo di identificazione sia instabile, soprattutto nel caso di giorni infrasettimanali, nelle prime ore della giornata per poi stabilizzarsi per il resto della giornata. Tale incertezza può essere accettata in quanto l'errore di associazione del cluster si verifica nelle ore notturne in cui i flussi hanno andamento simile per ciascun cluster e quindi questo non si ripercuote in un errore significativo per quel che riguarda la stima dei flussi nel periodo previsionale.

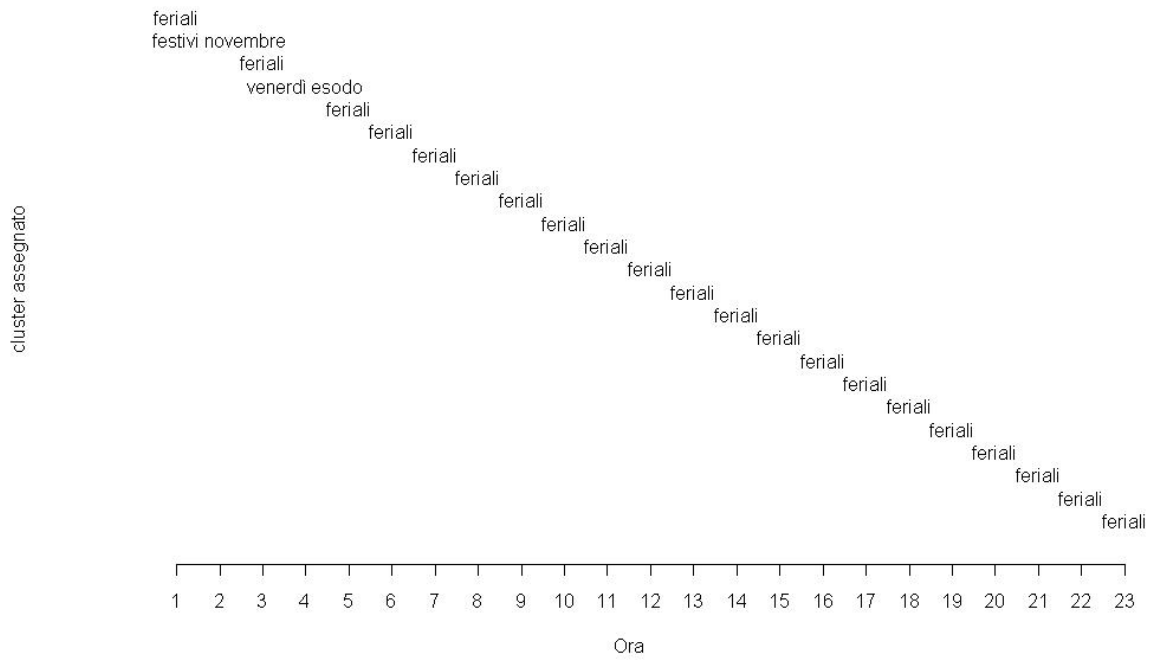


Figura 61 processo di identificazione del cluster per il giorno attuale un martedì del periodo estivo

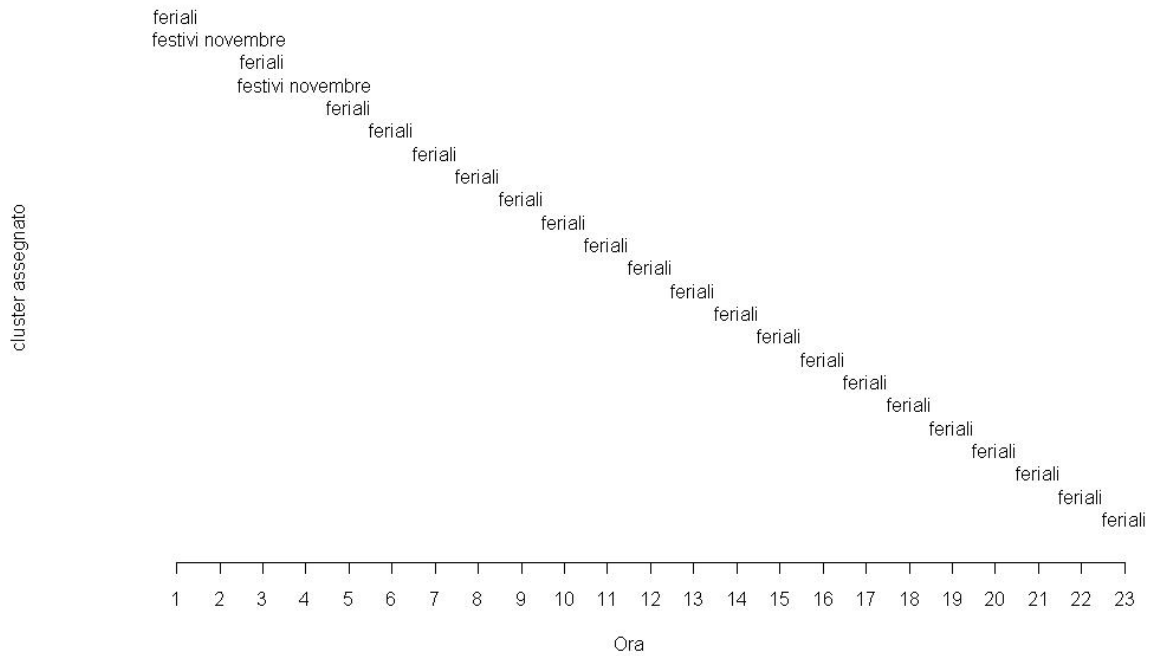


Figura 62 Processo di identificazione del cluster per il giorno attuale un mercoledì del periodo invernale

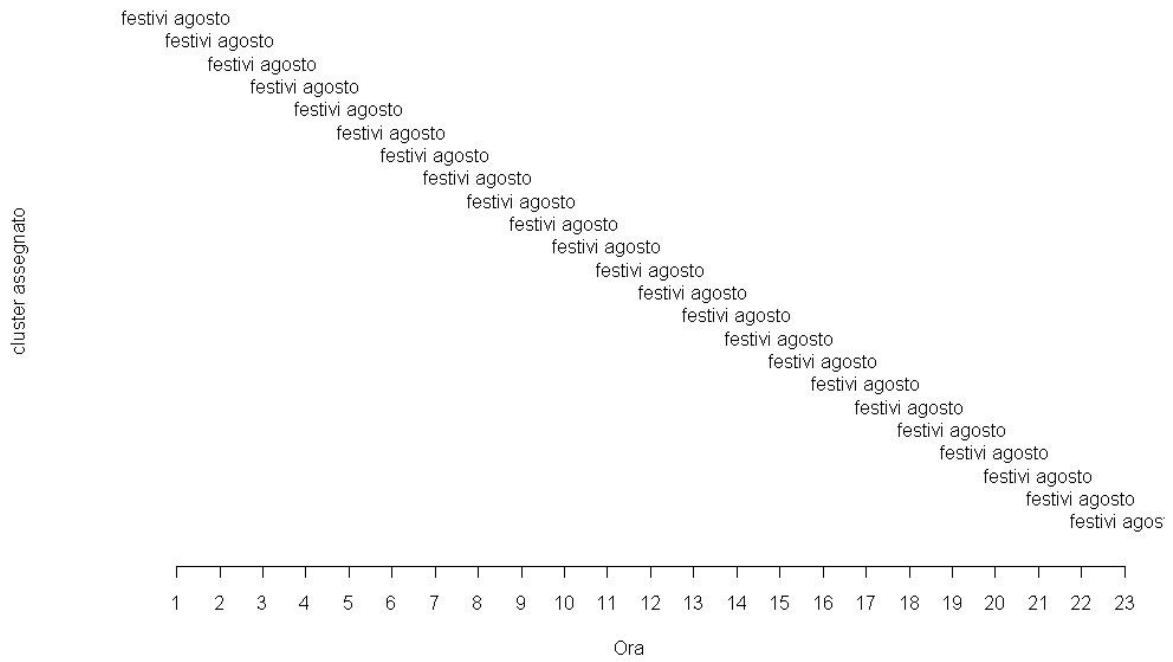


Figura 63 Processo di identificazione del cluster per il giorno attuale domenica 3/08/08

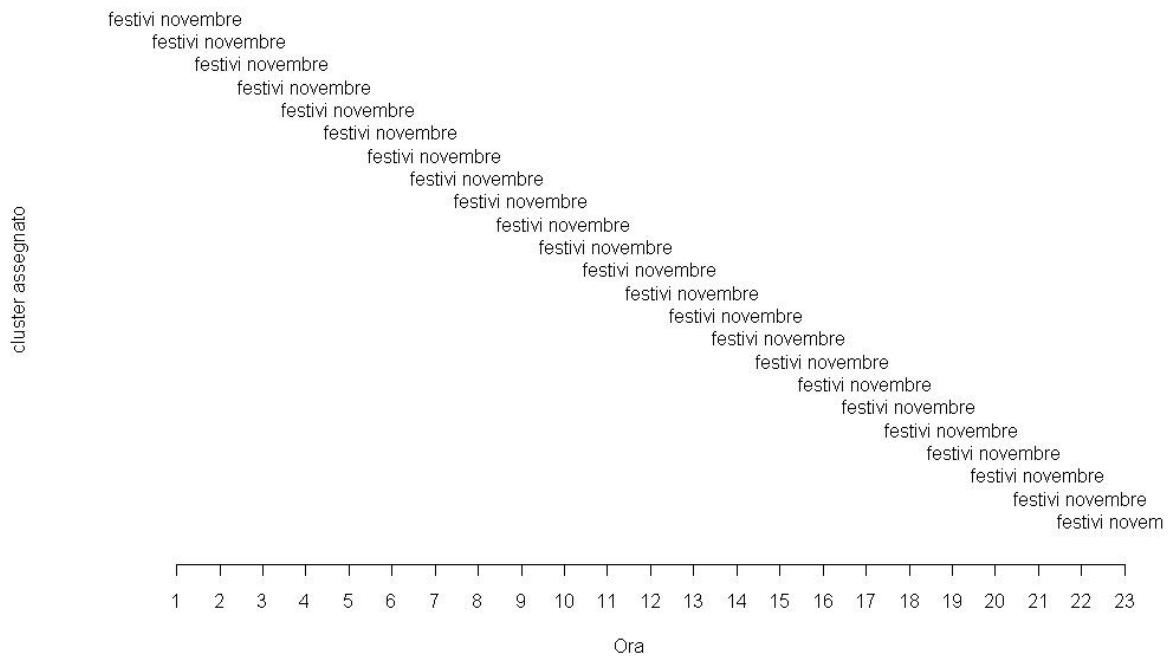


Figura 64 Processo di identificazione del cluster per il giorno attuale sabato 8/11/08

La fase di analisi della domanda in ingresso sull'autostrada si conclude con la determinazione dei flussi previsti per l'orizzonte temporale scelto. Successivamente

all'individuazione del cluster che all'istante attuale risulta quello più simile, si potrà procedere alla determinazione dei flussi previsti sulla base dell'andamento del profilo del cluster.

Come mostrato in Figura 65, Figura 66 e Figura 67 si può notare l'andamento del profilo del giorno attuale e identificato il cluster con andamento più simile fino a questo istante al nuovo giorno, si commetterebbe un errore utilizzando per il carico della rete nell'intervallo di previsione il valore assoluto dei flussi di ingresso del cluster. Risulta allora necessario riprodurre solo l'andamento in termini percentuali del profilo del cluster e non il valore assoluto dei flussi. Per determinare quindi il valore del flusso dell'intervallo di tempo dei 15 minuti futuri bisogna conoscere l'andamento delle variazioni percentuali del flusso avvenute tra questi due intervalli temporali successivi. Moltiplicando quindi la variazione percentuale per il flusso noto si determina il flusso futuro.

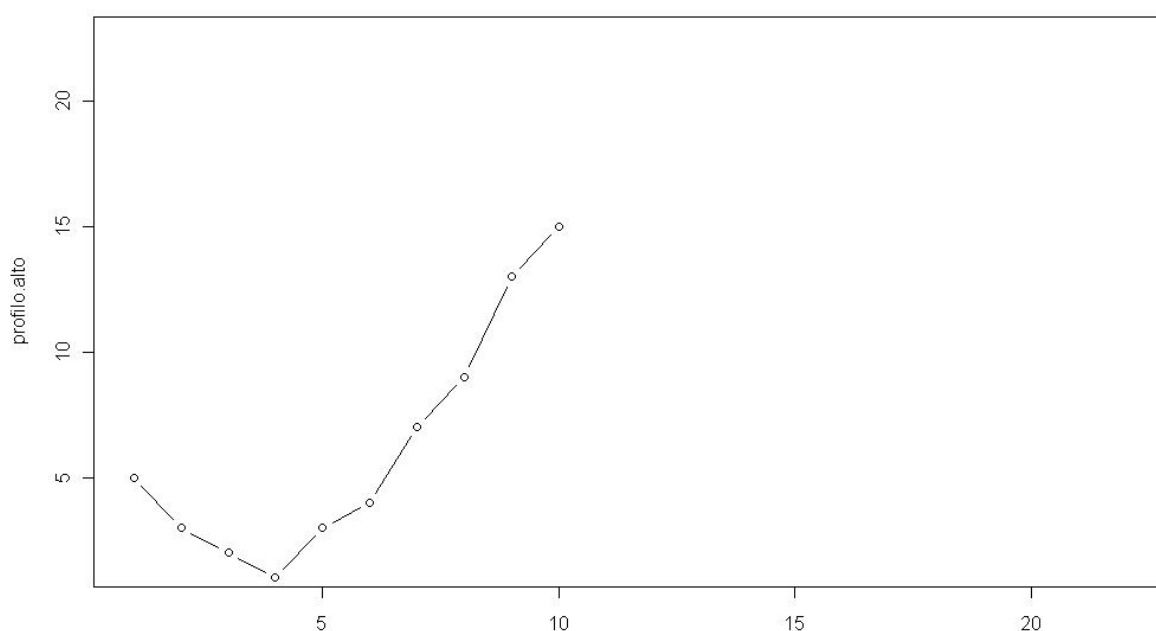


Figura 65 andamento dei flussi in ingresso fino all'istante attuale

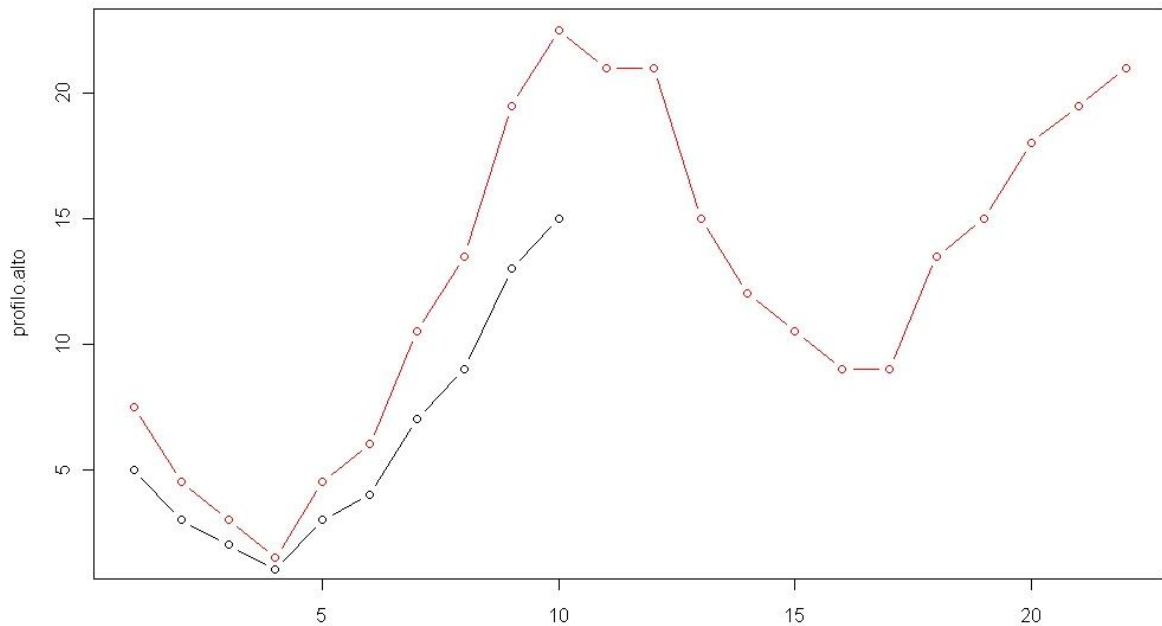


Figura 66 andamento dei flussi reali e dei flussi del cluster più simile

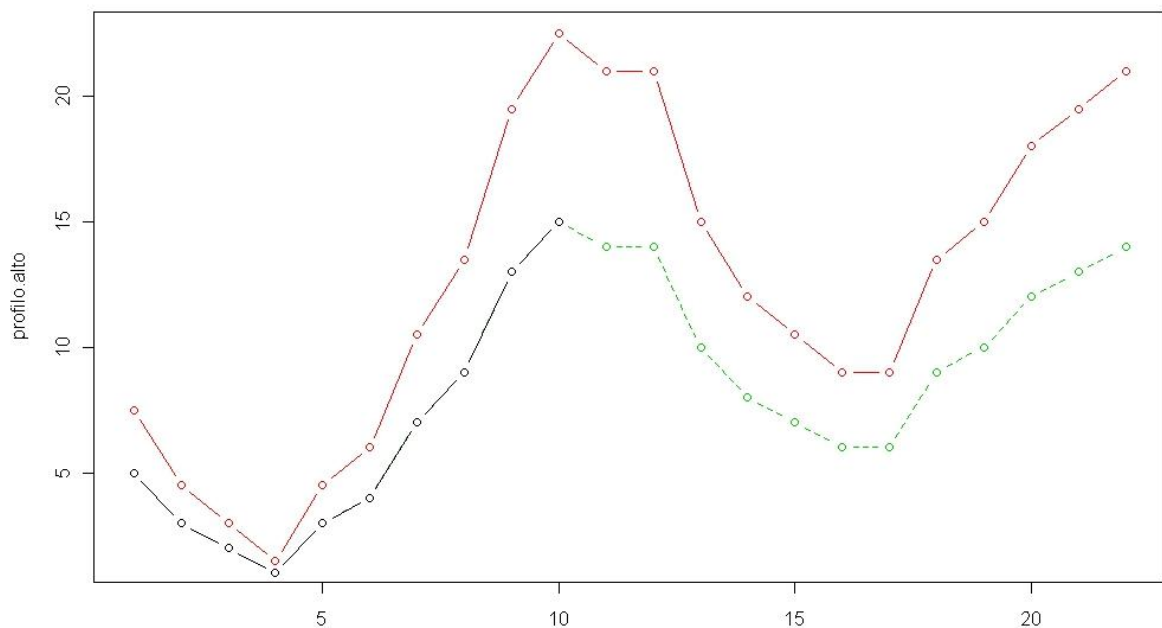


Figura 67 andamento dei flussi futuri

Partendo quindi dai profili dei flussi in ingresso di ciascun cluster sono stati costruiti gli andamenti delle variazioni percentuali relative, da utilizzare per determinare il valore dei flussi previsti sulla rete nell'intervallo previsionale. In si riporta l'andamento del flusso dei veicoli leggeri e pesanti del cluster 1. In figura si riportano le variazioni percentuali calcolate tra il valore del flusso dell'istante precedente e quello dell'istante successivo.

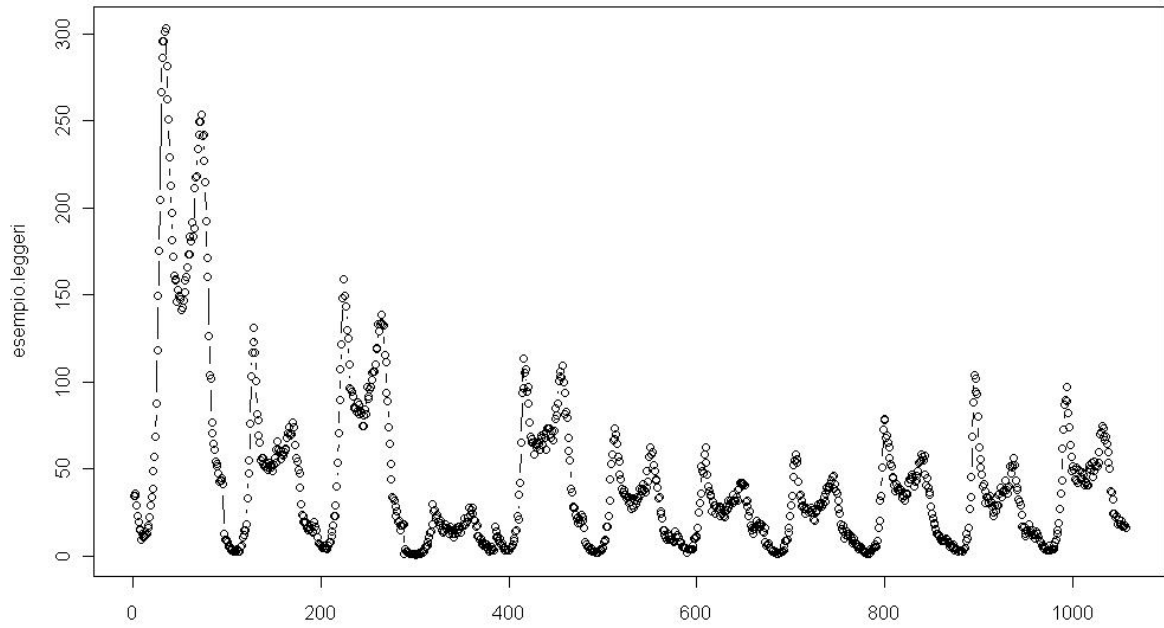


Figura 68 Profilo del cluster 1 dei flussi in ingresso dei veicoli leggeri

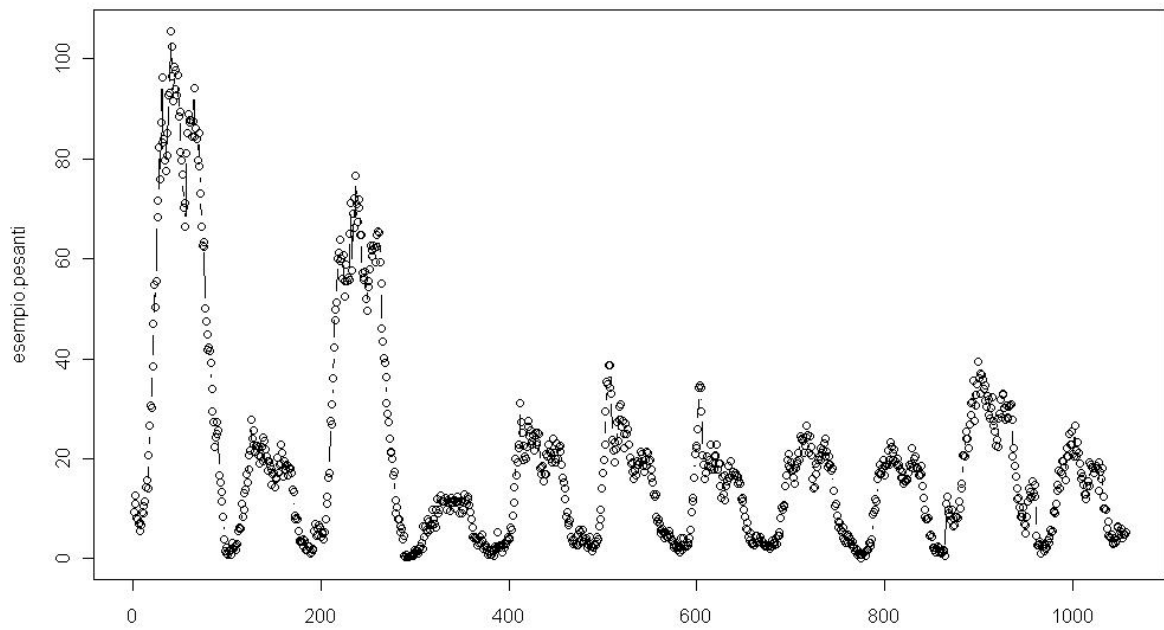


Figura 69 Profilo del cluster 1 dei flussi in ingresso dei veicoli pesanti

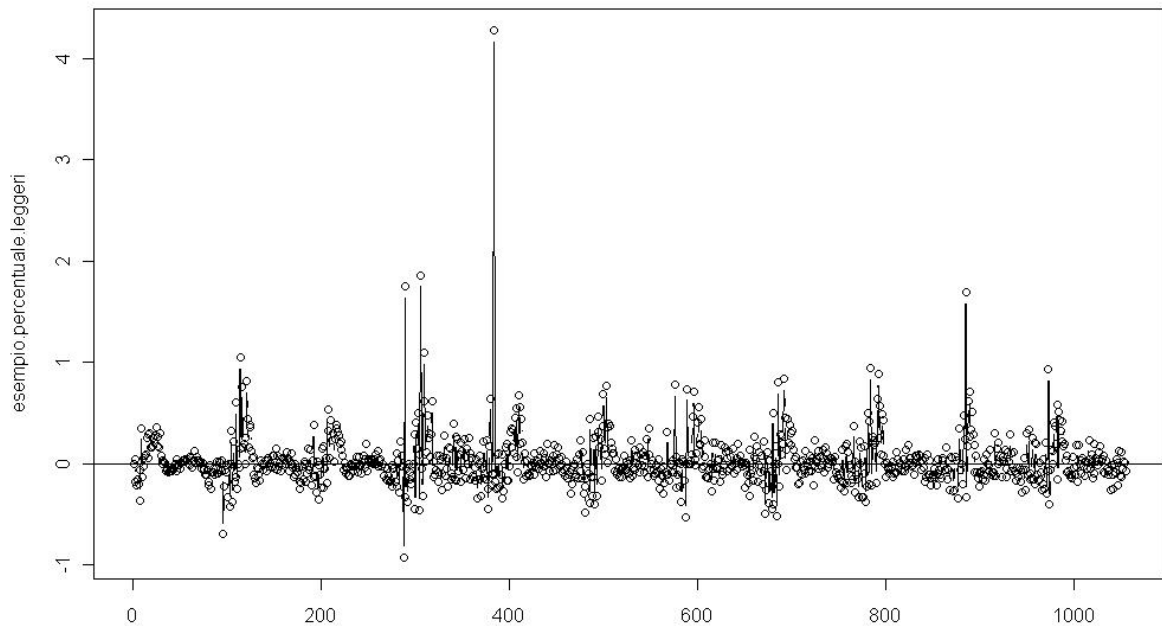


Figura 70 Andamento delle variazioni percentuali tra intervalli di 15 minuti successivi per i flussi dei veicoli leggeri

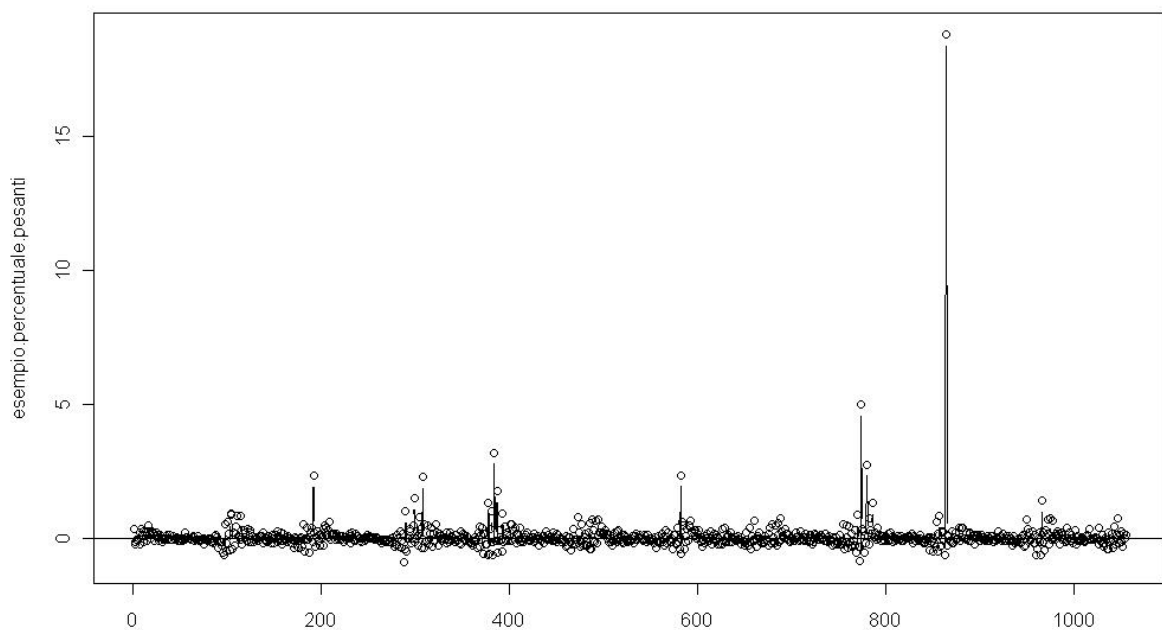


Figura 71 Andamento delle variazioni percentuali tra intervalli di 15 minuti successivi per i flussi dei veicoli pesanti

Come per la fase di identificazione, anche per quella di determinazione dei flussi previsti è stata condotta una simulazione della procedura online estrapolando un giorno dai 14 a disposizione. Immaginando di far iniziare la simulazione conoscendo i flussi reali raccolti dalle ore 00:00 alle ore 07:00 si è individuato il cluster più simile e poi sono stati determinati i flussi previsti per l'orizzonte previsionale di 1 ora costituito da 4 intervalli di 15 minuti ciascuno. Sono stati poi confrontati i valori dei flussi stimati con i valori reali. Nelle figure

seguenti la retta rappresenta l'uguaglianza tra il valore del flusso stimato e flusso reale, mentre i valori individuati dal cerchietto e dal numero progressivo delle 11 stazioni indicano i valori del flusso stimato. La distanza tra il valore di flusso stimato e la retta rappresenta l'errore di stima. Se tale distanza risulta minima e quindi accettabile.

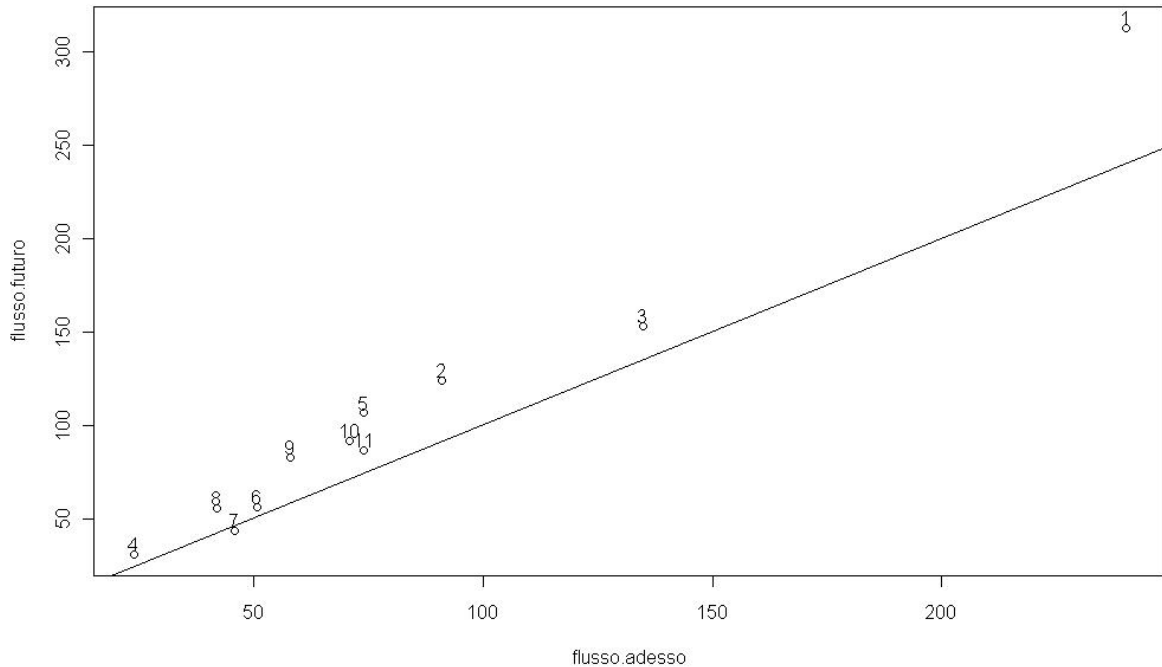


Figura 72 Rappresentazione del valore del flusso in ingresso previsto dalle 11 stazioni per l'intervallo di 15 minuti

La prima simulazione è stata eseguita utilizzando un lunedì del periodo estivo, per il quale si sono ottenuti i seguenti valori di flusso stimati nei quattro intervalli successivi all'istante attuale. La stima del flusso futuro è stata eseguita solo per i veicoli leggeri, in quanto per quelli pesanti il procedimento sarebbe il medesimo semplicemente basato sul profilo relativo alla corretta classe veicolare.

1

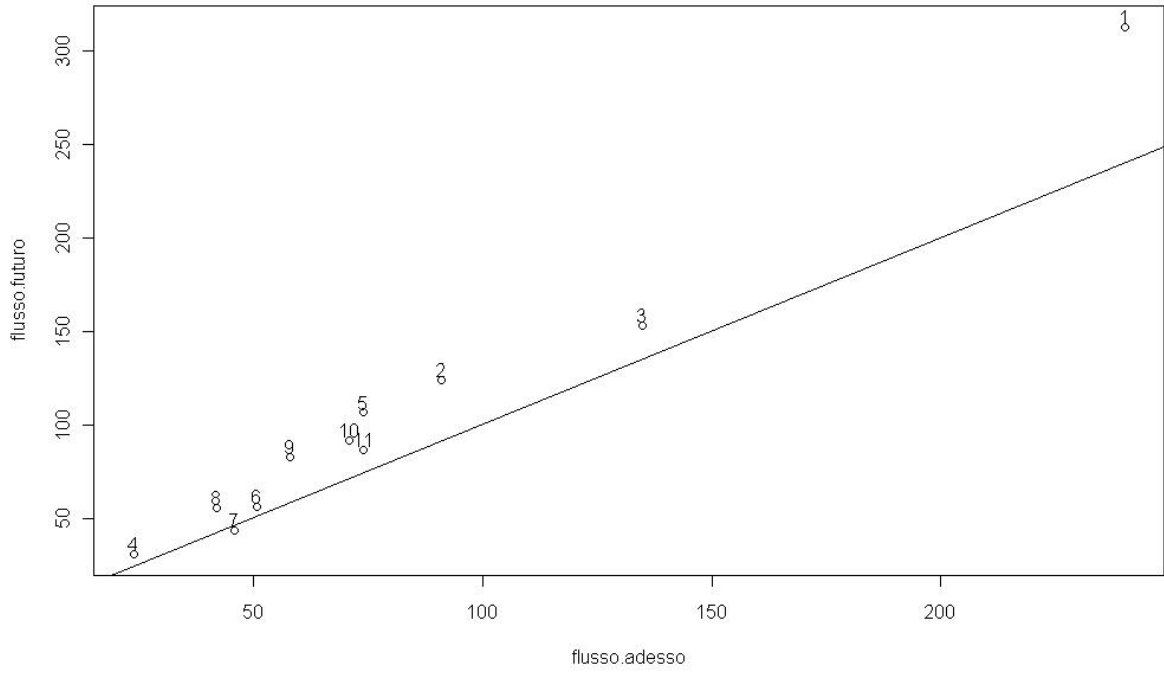


Figura 73 Flusso previsto in ingresso dalle 11 stazioni nel primo intervallo previsionale del giorno attuale lunedì periodo estivo – veicoli leggeri -

2

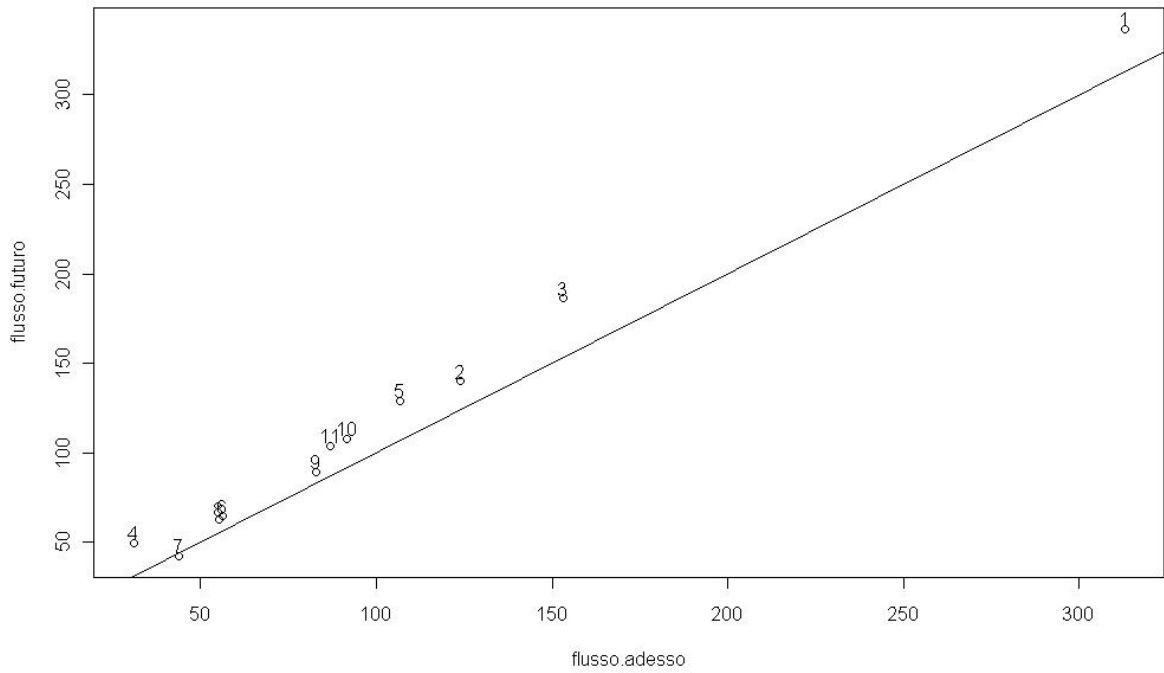


Figura 74 Flusso previsto in ingresso dalle 11 stazioni nel secondo intervallo previsionale del giorno attuale lunedì periodo estivo – veicoli leggeri -

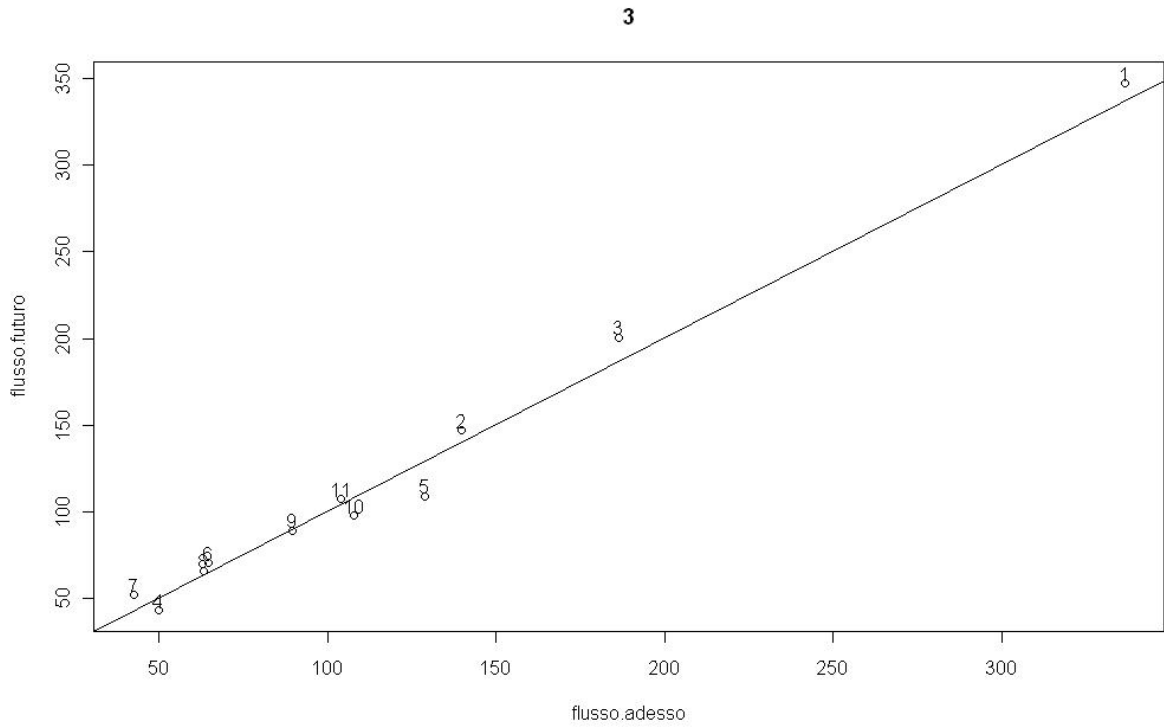


Figura 75 Flusso previsto in ingresso dalle 11 stazioni nel terzo intervallo previsionale del giorno attuale lunedì periodo estivo – veicoli leggeri -

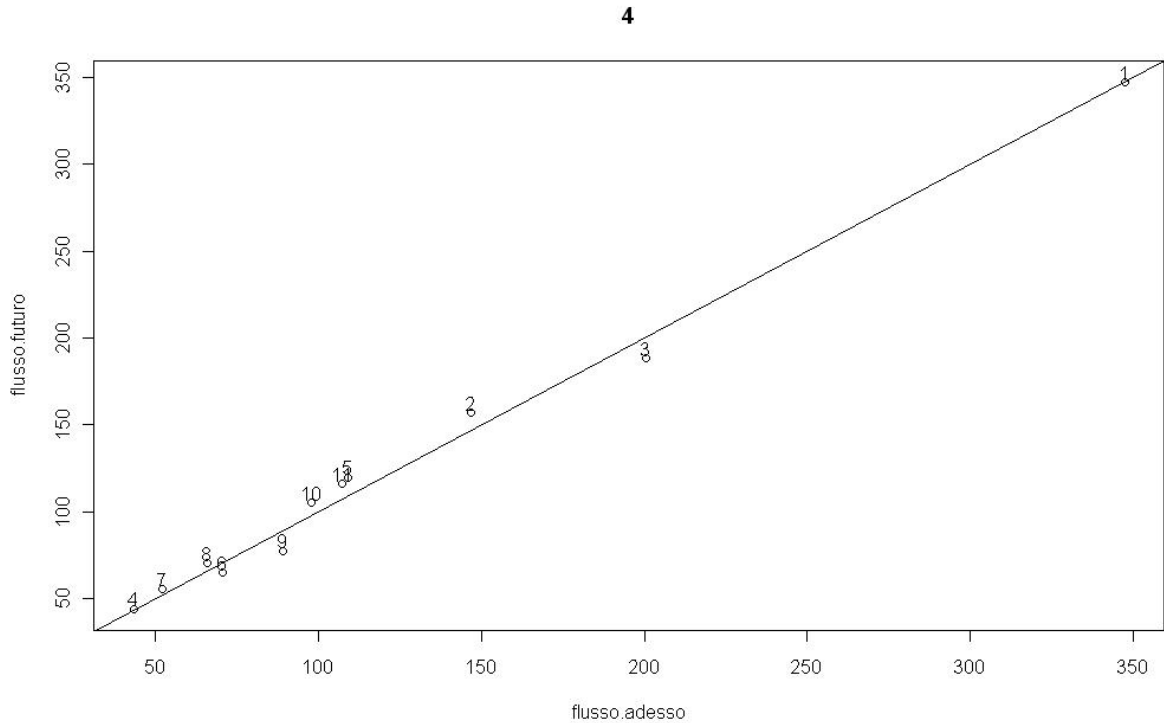


Figura 76 Flusso previsto in ingresso dalle 11 stazioni nel quarto intervallo previsionale del giorno attuale lunedì periodo estivo – veicoli leggeri -

La seconda simulazione è stata eseguita utilizzando un mercoledì del periodo invernale, per il quale si sono ottenuti i seguenti valori di flusso stimati nei quattro intervalli successivi all'istante attuale.

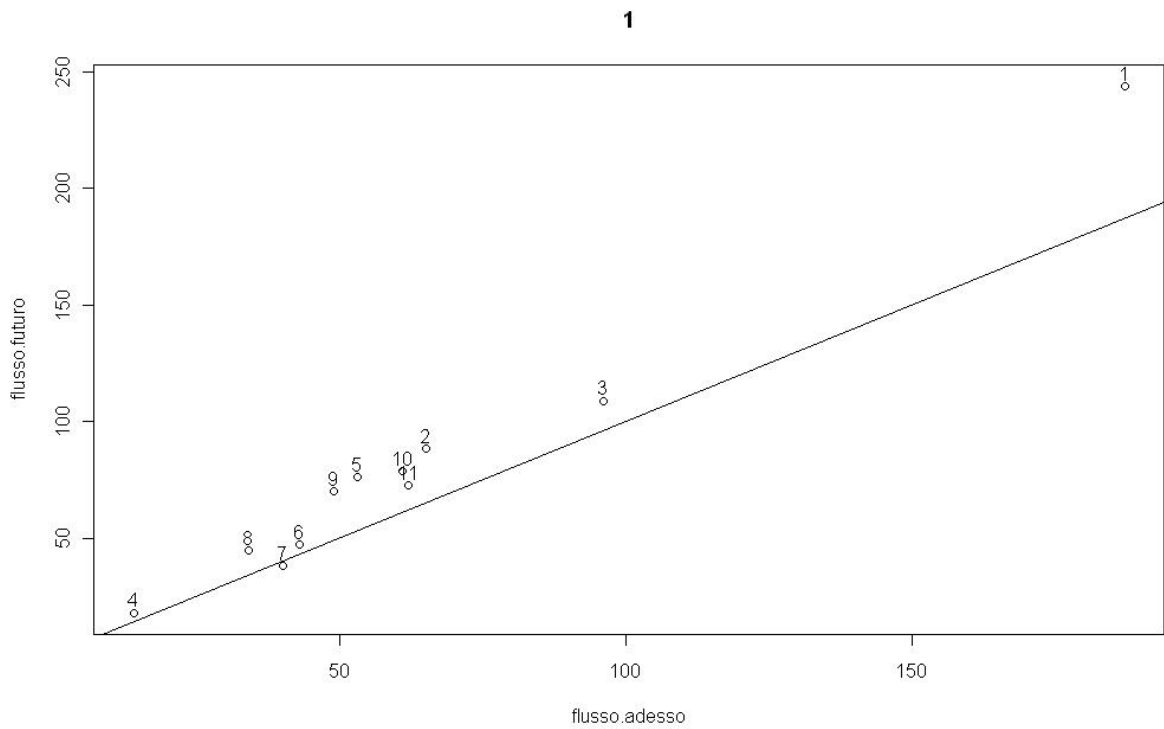


Figura 77 Flusso previsto in ingresso dalle 11 stazioni nel primo intervallo previsionale del giorno attuale mercoledì periodo invernale – veicoli leggeri -

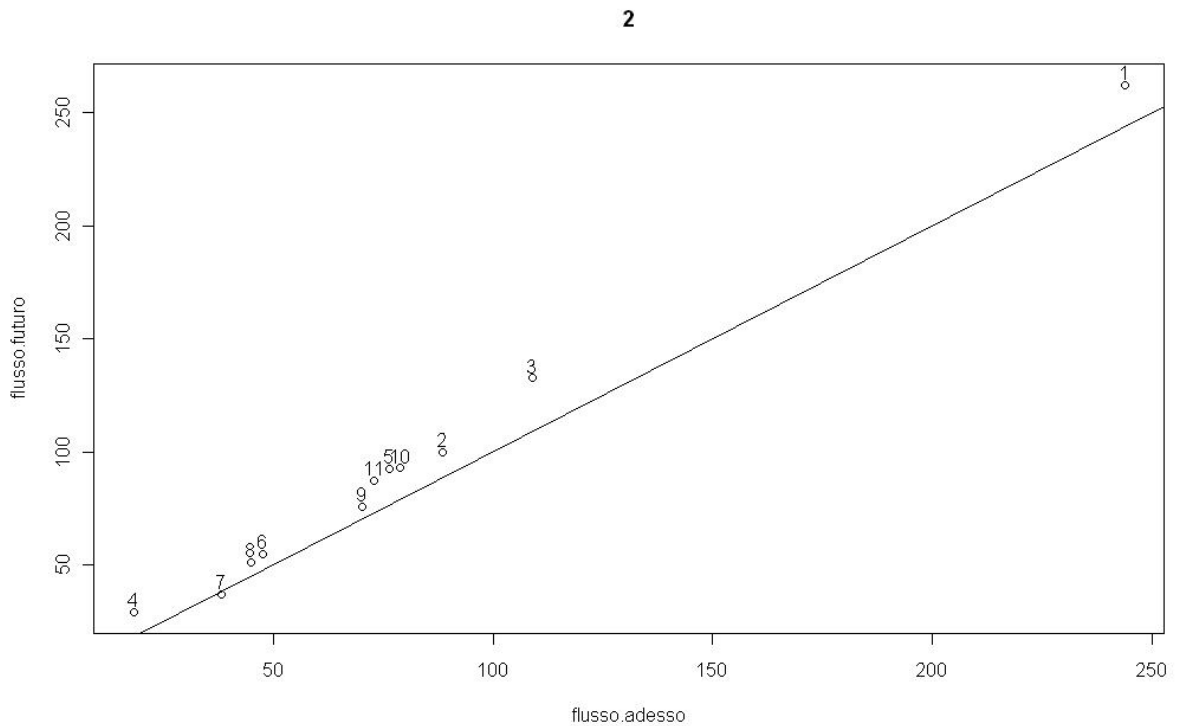


Figura 78 Flusso previsto in ingresso dalle 11 stazioni nel secondo intervallo previsionale del giorno attuale mercoledì periodo invernale – veicoli leggeri -

3

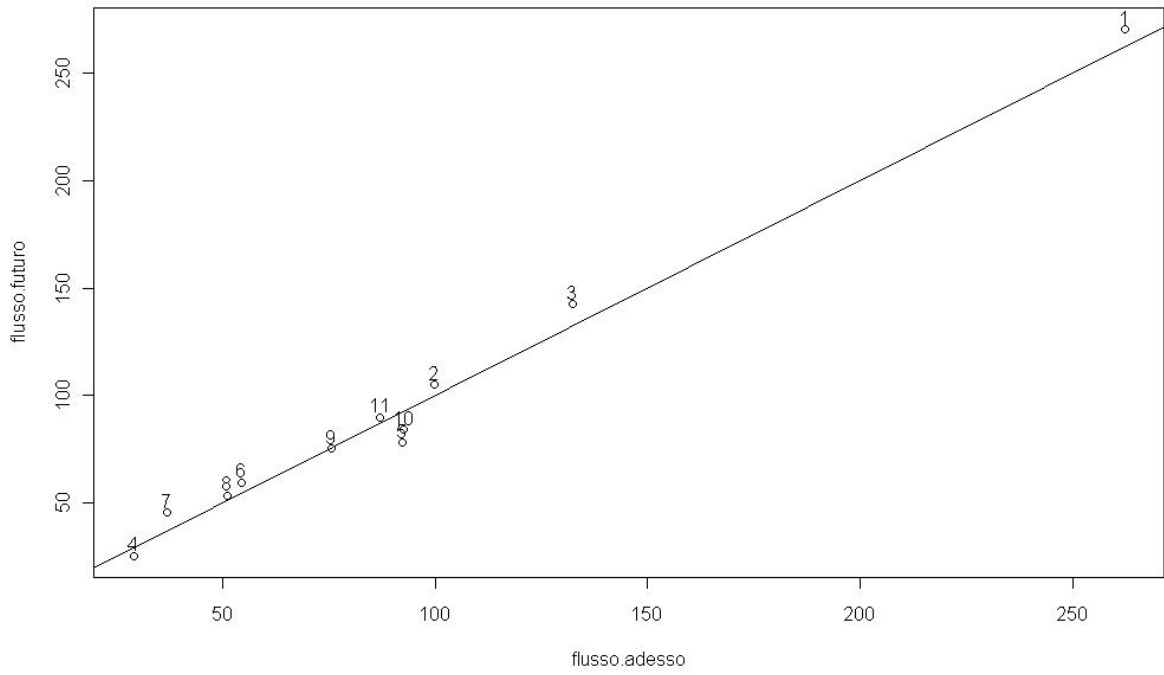


Figura 79 Flusso previsto in ingresso dalle 11 stazioni nel terzo intervallo previsionale del giorno attuale mercoledì periodo invernale – veicoli leggeri -

4

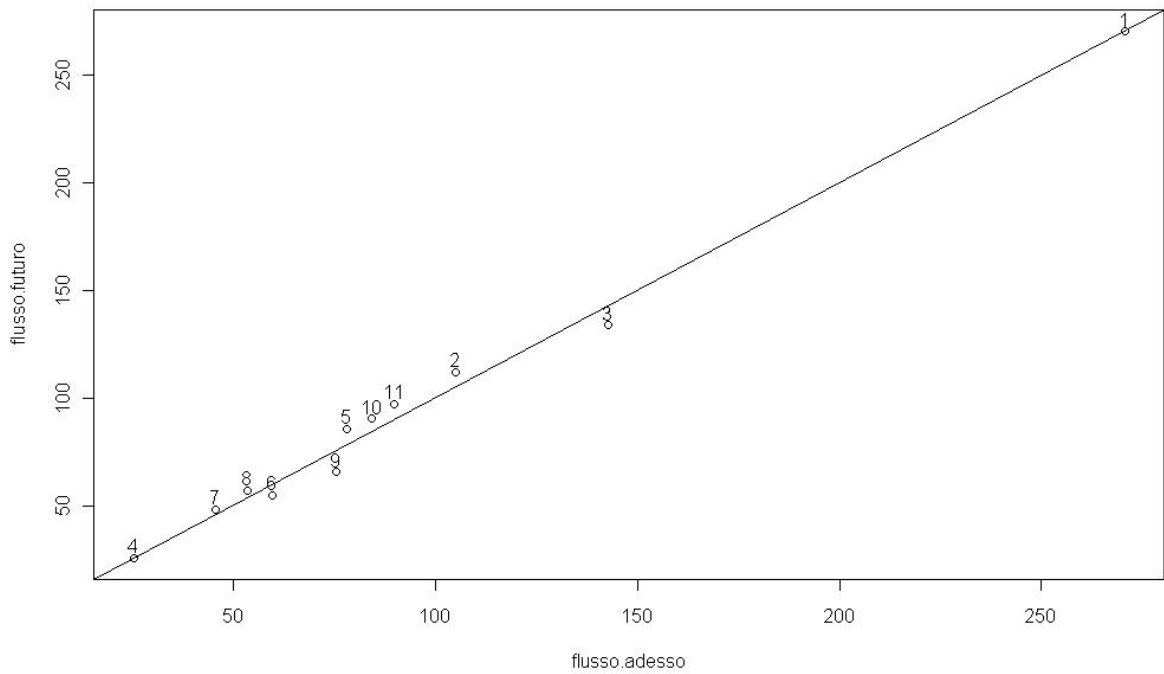


Figura 80 Flusso previsto in ingresso dalle 11 stazioni nel quarto intervallo previsionale del giorno attuale mercoledì periodo invernale – veicoli leggeri -

In entrambi i casi la simulazione ha evidenziato piccoli scostamenti tra il valore reale del flusso in ingresso dalle stazioni nell'intervallo di 15 minuti considerato, perciò il modello risulta attendibile.

6.2.2.3 Matrici Origine-Destinazione

La matrice Origine-Destinazione è uno strumento utilizzato per descrivere la distribuzione dei flussi presenti sulla rete in base ai percorsi che gli utenti della rete possono compiere. Questo strumento gioca perciò, un ruolo fondamentale durante l'assegnazione dei flussi alla rete. Nel caso in cui l'assegnazione dei flussi alla rete di trasporto sia una assegnazione dinamica risulta necessario definire un numero di matrici OD consono con la discretizzazione temporale utilizzata nel modello di assegnazione.

Le matrici OD per un'infrastruttura autostradale sono anche chiamate matrici Casello-Casello, perché le origini e le destinazioni dei percorsi compiuti dai veicoli sulla rete sono rappresentate dalle stazioni di ingresso e di uscita dell'autostrada. Tali stazioni costituiscono perciò i nodi della rete (Tabella 11) attraverso i quali i veicoli possono entrare all'inizio del loro viaggio e uscire dopo aver compiuto il loro percorso.

Per la determinazione delle matrici OD sarà necessario analizzare i dati storici della domanda di mobilità forniti dal sistema di riscossione del pedaggio. Come già mostrato in Tabella 22 a partire da tali dati è possibile determinare:

- i veicoli entranti da ciascuna stazione in un preciso intervallo di tempo suddivisi per classi veicolari;
- i veicoli che hanno compiuto un particolare percorso tra una coppia OD della rete.

È importante a questo punto fare alcune precisazioni che hanno portato a considerare una rete infrastrutturale ridotta rispetto a quella considerata fino a questo punto.

Le due interconnessioni autostradali della A21 con la A26 Genova - Gravellona Toce e con la A7 Milano - Genova (Figura 14) generano due particolari nodi nei quali l'ingresso e l'uscita dei veicoli non vengono registrati dalla società autostradale perché in corrispondenza di questi svincoli non è presente la stazione di riscossione del pedaggio. Risultano perciò mancanti le informazioni relative al numero di veicoli entranti e uscenti da questi due nodi e quindi la matrice risulta incompleta. La società di gestione sta predisponendo però in corrispondenza di questi due punti dei portali telepass in grado di registrare il transito dei veicoli e le informazioni relative ai singoli veicoli quali l'istante di transito, la provenienza, la classe veicolare. Tali informazioni saranno utili alla determinazione di quei dati mancanti delle matrici OD.

Un altro punto della rete infrastrutturale in corrispondenza del quale non avviene la registrazione delle informazioni dei veicoli in transito, si trova a Piacenza. Qui recentemente è stata eliminata la barriera e l'autostrada prosegue verso Brescia e si interconnette con l'autostrada A1. L'eliminazione della stazione comporta, come per il caso delle interconnessioni, l'assenza dei dati relativi ai flussi entranti e uscenti da questo nodo e quindi la mancanza di tali dati all'interno della matrice OD. Anche in questo punto la società di gestione prevede l'installazione di boe telepass che siano in grado di fornire i dati di traffico necessari alla determinazione dei flussi in circolo sulla rete. Di seguito si mostra la matrice

OD completa di tutti i nodi della rete. Il simbolo "x" indica i dati mancanti di questa matrice a causa delle ragioni spiegate precedentemente.

		Villanova Barriera	Asti Ovest	Asti Est	Felizzano	Innesto A26	Alessandria Ovest	Alessandria Est	Innesto A7	Voghera	Casteggio Casatisma	Broni stradella	Castel san Giovanni	Piacenza Ovest	Innesto A21 Brescia Padova
		445	447	448	449	450	451	452	454	455	456	457	458	459	461
Villanova Barriera	445					x			x						x
Asti Ovest	447					x			x						x
Asti Est	448					x			x						x
Felizzano	449					x			x						x
Innesto A26	450	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Alessandria Ovest	451					x			x						x
Alessandria Est	452					x			x						x
Innesto A7	454	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Voghera	455					x			x						x
Casteggio Casatisma	456					x			x						x
Broni stradella	457					x			x						x
Castel san Giovanni	458					x			x						x
Piacenza Ovest	459					x			x						x
Innesto A21 Brescia Padova	461	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabella 31 Matrice OD completa dell'autostrada A21

Mancando al momento dello svolgimento della presente tesi i dati storici relativi alle installazioni delle boe telepass si è scelto di continuare nello sviluppo del modello restringendo la rete alla parte della quale risultano noti tutti i flussi di ingresso e uscita dall'autostrada. La rete infrastrutturale ridotta comprende allora il tratto di autostrada A21 che inizia alla barriera di Torino e termina all'altezza della prima interconnessione autostradale con la A26, analizzando unicamente le corsie di marcia percorse dai veicoli in direzione di Piacenza. La scelta obbligata di considerare la sola direzione ovest-est è dettata ancora una volta dalla mancanza dei dati degli ingressi provenienti dalle interconnessioni con le altre autostrade e dal tratto di A21 Piacenza - Padova.

		Villanova Barriera	Asti Ovest	Asti Est	Felizzano	Tutte le direzioni
		445	447	448	449	500
Villanova Barriera	445					
Asti Ovest	447					
Asti Est	448					
Felizzano	449					

Tabella 32 Matrice OD grafo di rete ridotto

Definita la rete ridotta sono state eseguite le analisi necessarie alla determinazione dei flussi contenuti nelle matrici.

L'analisi di clusterizzazione presentata nel paragrafo precedente ha portato alla determinazione di quattro cluster, o giorni tipo, grazie ai quali attraverso il processo di identificazione è possibile determinare i flussi in ingresso dalle stazioni per gli intervalli di 15 minuti ciascuno, nei quali vengono scomposte le 24 ore della giornata. Così come il processo di identificazione individua il giorno tipo più simile a quello attuale e sulla base di tale riconoscimento fornisce una stima dei flussi di traffico, è necessario che anche le matrici OD vengano determinate analizzando i dati storici secondo le associazioni di questi dati forniti dall'analisi di clusterizzazione. Questo significa che per ciascun gruppo di giorni storici associati a ciascun cluster sarà necessario determinare le matrici OD. Dai dati di ingresso raccolti in tempo reale verrà individuato il cluster da associare al giorno attuale, quindi i flussi in ingresso stimati e verranno anche individuate quelle matrici OD relative al cluster necessarie alla redistribuzione sulla rete dei flussi stimati.

Come per la stima dei flussi futuri viene mantenuta la suddivisione in veicoli leggeri e pesanti anche le matrici OD dovranno essere generate mantenendo tale distinzione.

Da una prima analisi dei dati è risultato poco significativo determinare le matrici OD mantenendo la scansione temporale di 15 minuti utilizzata per la generazione dei flussi. Si è deciso quindi di creare le matrici OD utilizzando un passo temporale pari a 1 ora. La matrice OD oraria verrà quindi utilizzata all'interno del modello per redistribuire i flussi di ciascuno dei quattro intervalli di 15 minuti che compongono l'ora alla quale essa si riferisce.

Il procedimento utilizzato per la creazione delle matrici OD orarie relative ai quattro cluster tipo serve a determinare per ciascuno dei quattro cluster quarantotto matrici OD relative a ciascuna ora della giornata e suddivise per le due classi veicolari leggeri e pesanti. Il numero totale delle matrici generate sarà perciò pari a 192. A titolo di esempio si riporta il procedimento utilizzato per la creazione delle matrici OD relative al cluster 2 "giorni infrasettimanali/lavorativi" per le ore 8.00 e per le ore 9.00, sia per veicoli leggeri che per

veicoli pesanti. Verranno generate dall'analisi delle due ore di punte della mattina di tutti i giorni storici associati al cluster quattro matrici OD:

- ore 8.00 - 8.59 veicoli leggeri;
- ore 8.00 - 8.59 veicoli pesanti;
- ore 9.00 - 9.59 veicoli leggeri;
- ore 9.00 - 9.59 veicoli pesanti.

Il primo passo da compiere per la determinazione della matrice OD è quello di determinare i flussi entranti nell'ora da ciascuna delle quattro stazioni di interesse comprese nella rete ridotta dai dati forniti dalla tabella A21_Entrate:

- 445 Villanova Barriera (Torino);
- 447 Asti Ovest;
- 448 Asti Est;
- 449 Felizzano.

Il secondo passo è quello di determinare, attraverso l'analisi dei dati raccolti nella tabella A21_Uscite, i flussi di veicoli che, dopo essere entrati sulla rete, sono usciti in una delle cinque possibili destinazioni:

- 445 Villanova Barriera (Torino);
- 447 Asti Ovest;
- 448 Asti Est;
- 449 Felizzano;
- 500 tutte le direzioni.

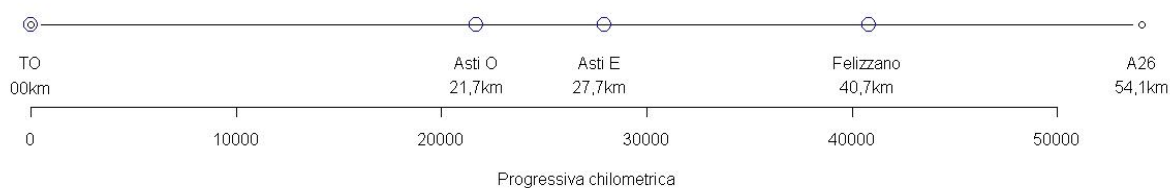


Figura 81 Rete infrastrutturale ridotta

Questi due passi devono essere compiuti mantenendo la separazione dei veicoli nelle due classi leggeri e pesanti, coerentemente con i flussi determinati attraverso il processo di clusterizzazione divisi anch'essi in veicoli leggeri e pesanti. Una volta determinate le matrici dei flussi delle ore considerate per ciascuno dei giorni storici appartenenti al cluster, devono essere determinate le matrici in termini percentuali, ossia calcolare la percentuale dei veicoli che sono entrati in una precisa origine O e che sono usciti in una delle destinazioni D. La determinazione delle matrici OD in termini percentuali è importante perché la redistribuzione dei flussi previsti dal modello deve avvenire secondo tale criterio.

ORA 8.00-8.59 Veicoli leggeri

	445	447	448	449	500	Flusso entrante per stazione	Flusso in direzione PC	Flusso in direzione TO
445	0	345	158	16	739	1258	1258	0
447	273	0	72	15	133	493	220	273
448	206	52	0	22	370	650	392	258
449	24	10	19	0	32	85	32	53

Tabella 33 Matrice dei flussi dei veicoli leggeri delle ore 8.00 di un giorno storico appartenente al cluster 2

ORA 8.00-8.59 Veicoli leggeri

	445	447	448	449	500	Flusso entrante per stazione	Flusso in direzione PC	Flusso in direzione TO
445	0%	27%	13%	1%	59%	100%	100%	0%
447	55%	0%	15%	3%	27%	100%	45%	55%
448	32%	8%	0%	3%	57%	100%	60%	40%
449	28%	12%	22%	0%	38%	100%	38%	62%

Tabella 34 Matrice percentuale dei veicoli leggeri delle ore 8.00 di un giorno storico appartenente al cluster 2

ORA 8.00-8.59 Veicoli pesanti

	445	447	448	449	500	Flusso entrante per stazione	Flusso in direzione PC	Flusso in direzione TO
445	0	43	54	10	216	323	323	0
447	23	0	31	6	26	86	63	23
448	60	23	0	4	147	234	151	83
449	7	2	8	0	17	34	17	17

Tabella 35 Matrice dei flussi dei veicoli pesanti delle ore 8.00 di un giorno storico appartenente al cluster 2

ORA 8.00-8.59 Veicoli pesanti

	445	447	448	449	500	Flusso entrante per stazione	Flusso in direzione PC	Flusso in direzione TO
445	0%	13%	17%	3%	67%	100%	100%	0%
447	27%	0%	36%	7%	30%	100%	73%	27%
448	26%	10%	0%	2%	63%	100%	65%	35%
449	21%	6%	24%	0%	50%	100%	50%	50%

Tabella 36 Matrice percentuale dei veicoli pesanti delle ore 8.00 di un giorno storico appartenente al cluster 2

Dal totale delle matrici percentuali, determinate per ciascuno dei giorni storici, vengono calcolate due matrici medie delle percentuali, da associare al cluster 2 “giorni infrasettimanali/lavorativi” per l’ora considerata, per ciascuna delle classi veicolari. La matrice media viene calcolata utilizzando il calcolo della media pesata sui flussi veicolari delle matrici orarie dei giorni appartenenti al cluster 2.

ORA 8.00-8.59						direzione	
	445	447	448	449	500	TO	PC
445	0%	15%	13%	2%	70%	0%	100%
447	49%	0%	11%	3%	38%	49%	51%
448	28%	5%	0%	2%	65%	33%	67%
449	24%	8%	11%	0%	57%	43%	57%

Tabella 37 Matrice media percentuale relativa ai veicoli leggeri, ore 8.00, associata al cluster 2

ORA 9.00-9.59						direzione	
	445	447	448	449	500	TO	PC
445	0%	18%	14%	3%	65%	0%	100%
447	49%	0%	10%	2%	39%	49%	51%
448	29%	5%	0%	2%	64%	34%	66%
449	25%	6%	9%	0%	60%	40%	60%

Tabella 38 Matrice media percentuale relativa ai veicoli leggeri, ore 9.00, associata al cluster 2

ORA 8.00-8.59						direzione	
	445	447	448	449	500	TO	PC
445	0%	9%	15%	2%	74%	0%	100%
447	22%	0%	21%	5%	52%	22%	78%
448	17%	7%	0%	2%	74%	24%	76%
449	13%	3%	14%	0%	71%	29%	71%

Tabella 39 Matrice media percentuale relativa ai veicoli pesanti, ore 8.00, associata al cluster 2

ORA 9.00-9.59						direzione	
	445	447	448	449	500	TO	PC
445	0%	7%	12%	2%	79%	0%	100%
447	23%	0%	20%	3%	55%	23%	77%
448	17%	6%	0%	2%	75%	23%	77%
449	13%	5%	13%	0%	69%	31%	69%

Tabella 40 Matrice media percentuale relativa ai veicoli leggeri, ore 9.00, associata al cluster 2

6.3 Dynamic Traffic Assignment

I modelli di assegnazione dinamica, indicati anche con l'acronimo DTA Dynamic traffic assignment, permettono di studiare fenomeni legati alle variazioni temporali della domanda e dell'offerta (Chirico P., Di Gangi M., 2000). Tali modelli rimuovono le ipotesi di stazionarietà² che sono alla base dei modelli statici. Per la formulazione dei modelli DTA è necessario introdurre la dimensione temporale per poter riprodurre l'evoluzione del sistema nel tempo. La dimensione temporale può essere considerata all'interno del problema di assegnazione dinamica tramite due diversi metodi:

- introducendo una variabile t continua definita nell'intervallo temporale di riferimento $[0, T]$, e pertanto simulando l'evoluzione del sistema in modo continuo (modelli a tempo continuo);
- suddividendo l'intervallo $[0, T]$ in n sottointervalli di ampiezza Δt ed introducendo una variabile t discreta il cui valore indica il generico sottointervallo (modelli a tempo discreto).

Coerentemente con la scelta di sviluppare un modello mesoscopico per la previsione nel breve periodo dei flussi di traffico, si svilupperà un DTA a tempo discreto. La discretizzazione delle 24 ore di una giornata in intervalli di 15 minuti adottata per la generazione dei flussi della domanda, dato di input per il modello di assegnazione dinamica, sarà utilizzata anche per l'applicazione del modello di assegnazione. A differenza dei modelli di assegnazione statica dei flussi di traffico che necessitano di un'unica matrice OD, i modelli di assegnazione dinamica è fondamentale definire differenti matrici OD per i singoli intervalli in cui viene suddiviso l'intero arco temporale da simulare (Festa, Longo, Mazzulla, & Musolino, 2000). Nel caso di studio, per ciascuno degli intervalli di 15 minuti in cui è stato suddiviso l'intero arco della giornata, l'analisi della domanda ha portato alla definizione di:

- flusso di ingresso sull'autostrada dalle stazioni e dalle interconnessioni autostradali;
- matrice OD.

La formulazione matematica di un modello di assegnazione dinamica deve considerare alcuni aspetti fondamentali:

- il flusso di utenti che in un determinato intervallo t è presente in un arco varia di sezione in sezione, ed inoltre il flusso relativo ad una determinata sezione non è costante al variare del tempo; di conseguenza non è possibile definire un flusso d'arco costante nel tempo ed uniforme per tutta la lunghezza dell'arco, ma è necessario definire il flusso sia nella dimensione temporale sia in quella spaziale, riferendolo ad una determinata sezione di arco ed a un preciso intervallo di tempo;

² Ipotesi di stazionarietà:

- interperiodale: consiste nell'assumere che le variazioni di domanda relative ad intervalli temporali di caratteristiche simili siano nulle, in altri termini che il sistema possa raggiungere una configurazione di equilibrio stabile nel tempo;
- intraperiodale: consiste nell'assumere nulle le variazioni di domanda all'interno di un intervallo di riferimento sufficientemente ampio da consentire al sistema di raggiungere una condizione di stazionarietà. (Chirico P., Di Gangi M., 2000)

- i tempi di arco possono assumere valori differenti per differenti intervalli di tempo, in funzione delle variazioni delle condizioni di offerta e domanda nel tempo (ad esempio: condizioni di congestione);
- la domanda di mobilità sarà variabile negli intervalli di tempo sia per quanto riguarda i flussi sia per la composizione della matrice OD.

Attraverso l'assegnazione dinamica dei flussi è possibile identificare il movimento dei pacchetti sulla rete infrastrutturale, analizzando le condizioni di deflusso generate dalla loro interazione.

6.4 Formulazione del modello

Nei paragrafi precedenti di questo capitolo sono stati approfonditamente spiegati i differenti moduli che compongono il modello sviluppato nel presente lavoro di tesi. In questo paragrafo si intende spiegare come l'unione di ciascuna delle parte permette di giungere al conseguimento degli obiettivi prefissati.

Il modello sviluppato permette di visualizzare i flussi previsti durante l'orizzonte temporale sulla rete e di stimare i tempi di percorrenza per i diversi tratti.

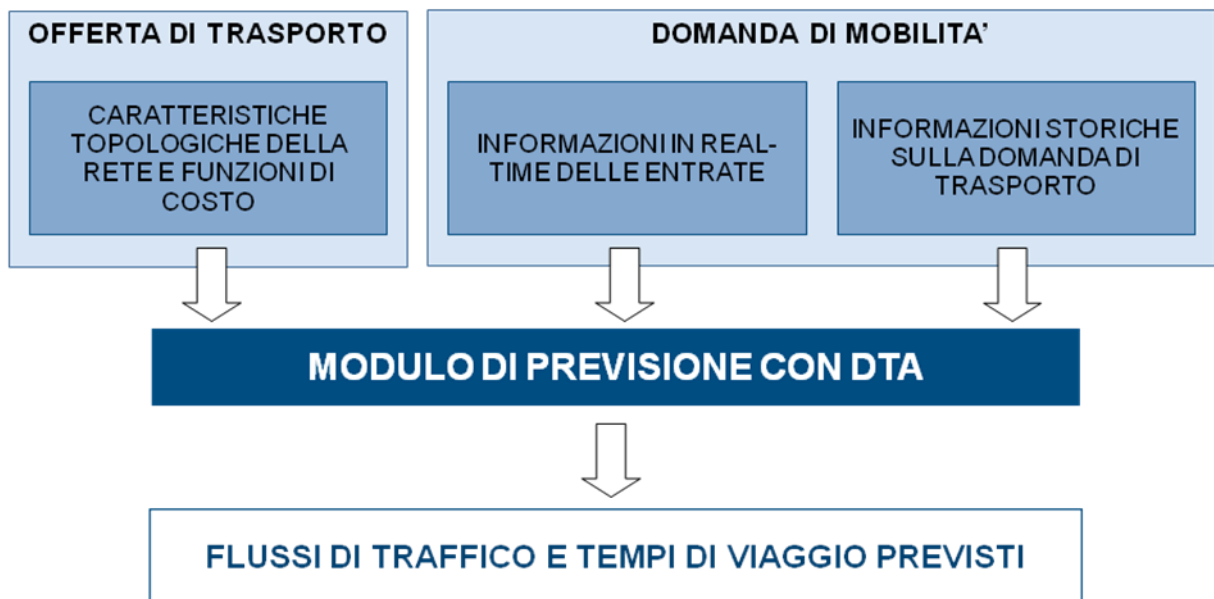


Figura 82 Struttura generale del modello di previsione

Per quanto riguarda l'offerta di trasporto il modello permette di rappresentare la rete di trasporto, che per le motivazioni precedentemente esposte, sarà una rete ridotta - costituita solo da una parte dell'autostrada A21 - e di muovere su tale rete i veicoli secondo la legge di deflusso scelta.

Per quanto riguarda la rete di trasporto è necessario indicare la lunghezza complessiva della tratta e le progressive dei diversi nodi o stazioni. Queste progressive verranno richiamate nel modello quali punti di ingresso e di uscita dei pacchetti in transito sulla rete.

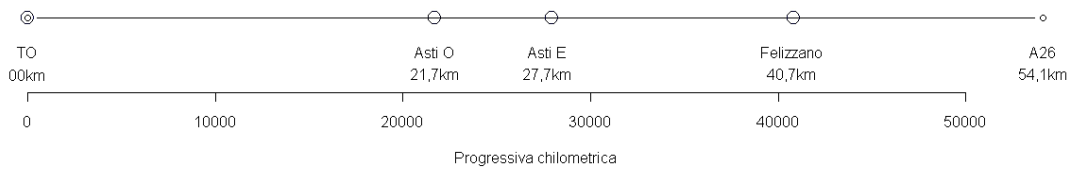


Figura 83 Rappresentazione attraverso il modello della rete di trasporto

La curva di deflusso scelta per il movimento dei pacchetti è la curva analitica di Drake et al. Le informazioni da fornire al modello relative a questa curva sono: la formulazione matematica della curva e i due parametri fondamentali cioè la Velocità di Flusso Libero e la capacità massima dell'infrastruttura. Questi due parametri della curva sono stati determinati sulla base dei dati storici in nostro possesso relativi ai veicoli in circolazione sull'autostrada, tuttavia in fase di calibrazione e validazione del modello potranno essere variati affinché la simulazione del modello si avvicini il più possibile alle reali condizioni di circolazione dei veicoli sull'autostrada.

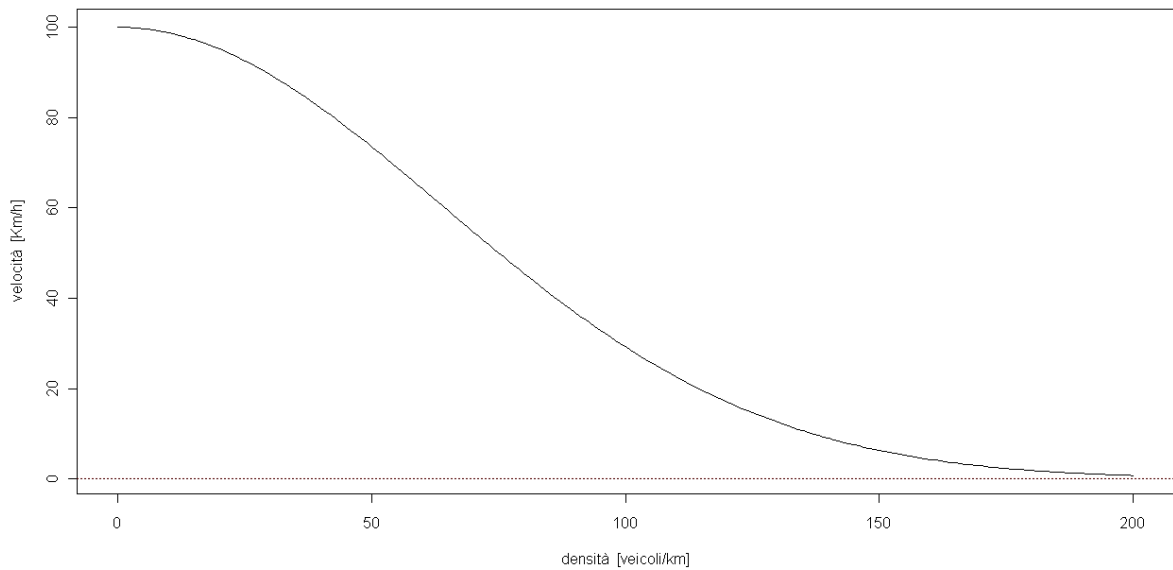


Figura 84 Rappresentazione della curva densità - velocità

Per quanto riguarda la domanda di mobilità è necessario riassumere con attenzione quanto spiegato precedentemente in modo da chiarire quali informazioni in ingresso è necessario fornire al modello. Il modello elaborato permette conoscendo i flussi veicolari in ingresso dai vari caselli sulla rete, di raggrupparli in pacchetti e di spostarli lungo la rete, in base alle loro origini e destinazioni, tenendo conto delle condizioni di traffico generate dalla loro presenza contemporanea sulla rete. Il dato di ingresso perciò è costituito semplicemente dalle intensità, cioè dal numero di veicoli, di ciascun pacchetto che entra sulla rete e dalla progressiva di ingresso. La distribuzione di questi pacchetti avviene secondo le matrici Origine Destinazione che devono essere inserite nel modello. Queste matrici forniscono la progressiva di uscita di ciascun pacchetto.

La domanda di mobilità sarà perciò costituita da due elementi:

- intensità dei pacchetti in ingresso sulla rete;
- matrici Origine Destinazione.

Ciascuno di questi due elementi verrà fornito mantenendo separate le due classi veicolari: Leggeri e pesanti.

Le intensità dei pacchetti entranti sulla rete derivano dal processo di analisi di clusterizzazione. Questo processo prevede l'utilizzo sia dei dati relativi alla domanda storica che di quelli raccolti in tempo reale dal sistema di esazione del pedaggio. L'analisi statistica di clusterizzazione svolta sui dati storici raggruppa i giorni appartenenti al campione in differenti cluster, o gruppi, in base a quanto gli andamenti dei flussi veicolari nei diversi giorni appaiono simili tra loro. Identificati i cluster - giorni tipo - per ciascuno viene determinato l'andamento dei flussi dei veicoli leggeri e pesanti durante la giornata in ingresso per ciascuna stazione. A questo punto utilizzando i dati della domanda raccolti in tempo reale è possibile riconoscere a quale dei giorni tipo individuati si avvicina maggiormente il giorno attuale e quindi individuare il profilo dei flussi in ingresso futuri seguendo l'andamento che questi hanno nel cluster individuato. Perciò attraverso l'utilizzo combinato dei dati storici e dei dati raccolti in tempo reale il modello esegue la previsione dei veicoli in ingresso da ciascun casello autostradale della rete durante l'intervallo previsionale.

Per quanto riguarda la determinazione delle matrici OD i dati utilizzati sono stati unicamente quelli forniti dalla domanda storica. Mantenendo il medesimo raggruppamento dei giorni storici fornito dall'analisi di clusterizzazione le matrici OD orarie sono state ottenute calcolando la media delle matrici OD dei giorni appartenenti a ciascun cluster. Le matrici OD sono state determinate per ciascun giorno tipo suddivise per veicoli leggeri e pesanti.

Per ciò che riguarda la domanda di mobilità attraverso lo schema riportato in Figura 85 è possibile comprendere il processo di determinazione dei dati di ingresso del modello.

Riassunte brevemente le elaborazioni necessarie ad ottenere i dati di ingresso del modello ora si illustra la discretizzazione temporale operata dal modello durante il suo funzionamento.

Il primo passo di discretizzazione è dettato dall'orizzonte di simulazione T , esso consiste nel periodo simulato dal modello allo scopo di determinare i tempi di percorrenza previsti sulla rete. L'orizzonte di simulazione viene a sua volta suddiviso in intervalli Δt , essi rappresentano i periodi durante i quali vengono raggruppati i veicoli in ingresso al fine di individuare l'intensità dei pacchetti. Questo secondo passo di discretizzazione viene usato nell'analisi di

clusterizzazione e quindi i flussi di veicoli che derivano dai profili dei cluster sono forniti per intervalli temporali pari a Δt . Anche le matrici OD erano state determinate secondo questa discretizzazione temporale, ma le matrici così ottenute non risultavano significative. Perciò sono state realizzate matrici OD orarie, con le quali verranno ripartiti i flussi in ingresso per tutti i Δt appartenenti all'ora cui si riferiscono. Precisamente sono stati considerati: un orizzonte di simulazione pari a 1 ora e gli intervalli Δt pari a 15 minuti. In questo modo ciascuno degli intervalli Δt appartenenti ad un'ora fornirà i valori dei flussi in ingresso dai caselli della rete che verranno suddivisi per percorsi secondo la matrice OD relativa all'ora cui appartiene l'intervallo Δt . Così a titolo di esempio per ripartire i flussi in ingresso del Δt relativo alle 08:15 – 08:30 utilizzeremo la matrice OD relativa alle ore 08:00 – 08:59.

Al fine di assimilare il flusso dei veicoli raggruppati in pacchetti al flusso dei singoli veicoli il modello suddivide ulteriormente gli intervalli temporali in passi di simulazione $\Delta \tau$, da questa ulteriore discretizzazione temporale dipenderà il movimento dei pacchetti sulla rete. L'intensità dei pacchetti di ciascun Δt verrà ripartita nei sotto intervalli $\Delta \tau$ che lo costituiscono. Mentre l'ampiezza dell'orizzonte di simulazione T e degli intervalli Δt è stata dettata rispettivamente dall'obiettivo di fornire l'indicazione dei tempi di percorrenza agli utenti che in quell'ora si troveranno a percorrere l'autostrada sotto le stimate condizioni di traffico e dalla necessità di raggruppare la domanda in pacchetti di veicoli come vuole il modello mesoscopico, per quanto riguarda l'ampiezza del passo di simulazione $\Delta \tau$ essa costituisce un parametro del modello la cui scelta potrà essere modificata secondo le esigenze riscontrate in fase di calibrazione e validazione. Il valore associato a $\Delta \tau$ in prima approssimazione è pari a 30 secondi.

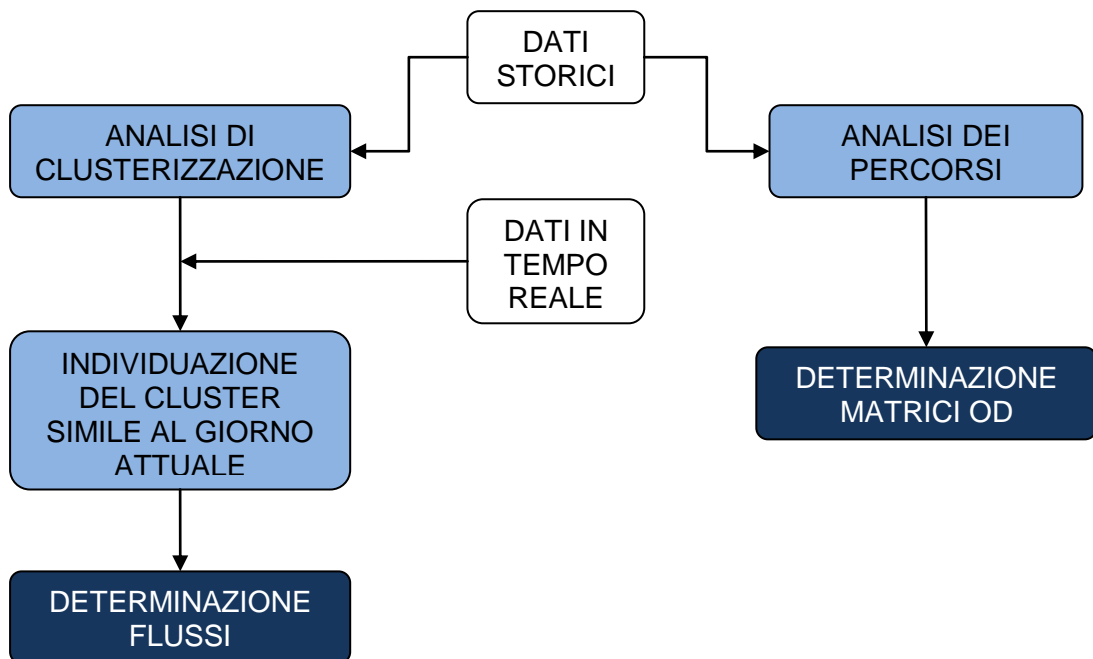


Figura 85 Procedimento di determinazione dei dati di ingresso del modello relativi alla domanda di mobilità

Noti quali dati di ingresso l'offerta di trasporto e la domanda di mobilità la fase successiva eseguita dal modello è quella di assegnazione dei flussi veicolari alla rete di trasporto. Il

modello segue la logica dell'assegnazione dinamica del traffico perciò per il tempo di simulazione secondo un processo iterativo, con passi temporali $\Delta\tau$, esegue i seguenti step:

1. acquisizione dei veicoli in ingresso dai caselli;
2. associazione ai pacchetti delle destinazioni secondo le matrici OD;
3. determinazione dell'intensità dei pacchetti in veicoli equivalenti eliminando a questo punto la suddivisione nelle due classi veicolari;
4. determinazione delle condizioni di traffico generate dai pacchetti tenendo conto di quelli già presenti sulla rete e di quelli in ingresso all'istante attuale;
5. spostamento dei pacchetti secondo la velocità desunta dalla curva velocità-densità del modello di Drake et al.

La fase di determinazione delle condizioni di traffico sull'autostrada, ed in particolare della densità veicolare è fondamentale al fine di individuare a quale velocità riescono a muoversi i veicoli. Allo scopo di passare dal numero di veicoli che costituiscono un pacchetto alla loro densità è stato necessario tracciare la curva flusso-velocità del modello di Drake et al. secondo la seguente espressione.

$$f(v) = k_c * v \sqrt{-2 \ln \frac{v}{v_0}}$$

eq. 10 curva flusso-velocità del modello analitico di Drake et al.

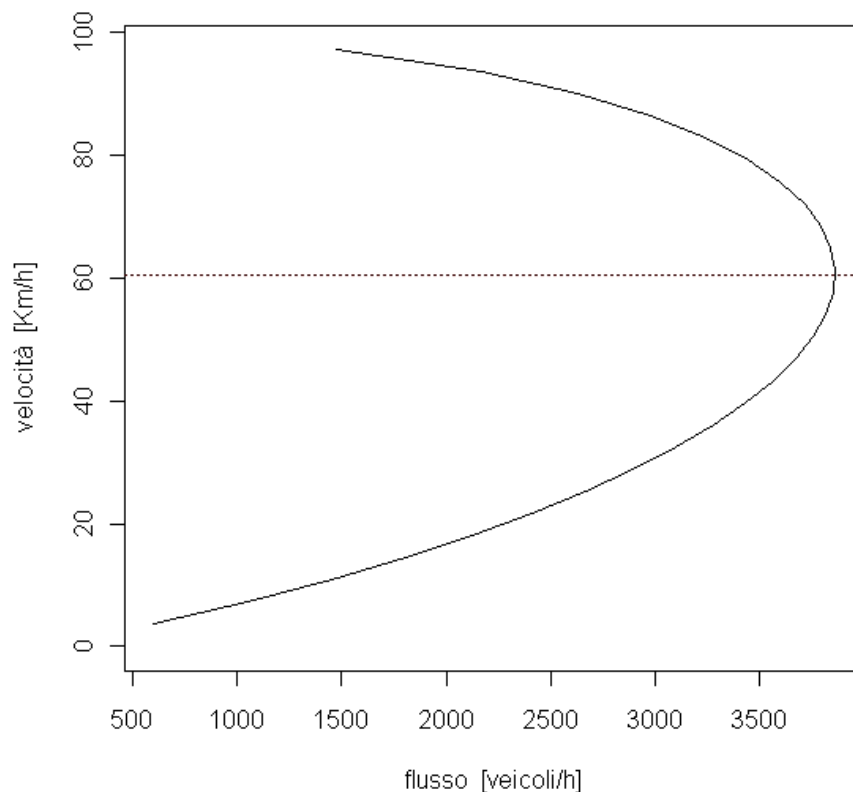


Figura 86 Rappresentazione della curva flusso - velocità

Partendo dall'ipotesi che il numero di veicoli in ingresso da ciascun casello è riconducibile alla condizione di flusso stabile individuamo a partire dal valore del flusso il valore della velocità che tali veicoli avrebbero in questa condizione. Il modello considera l'intensità – numero di veicoli – del pacchetto entranti nell'intervallo di tempo $\Delta\tau$ e lo trasforma in un flusso orario semplicemente moltiplicandolo per il numero degli intervalli $\Delta\tau$ presenti in un'ora. Utilizzando questo valore del flusso orario attraverso la curva flusso-velocità il modello determina il valore della velocità dei veicoli in condizione di flusso stabile. Da questo valore di velocità utilizzando la curva velocità-densità si determina il valore della densità corrispondente. Dividendo quindi l'intensità del pacchetto per il valore di densità determinato si ottiene un intervallo spaziale che chiameremo intorno del pacchetto Δi .

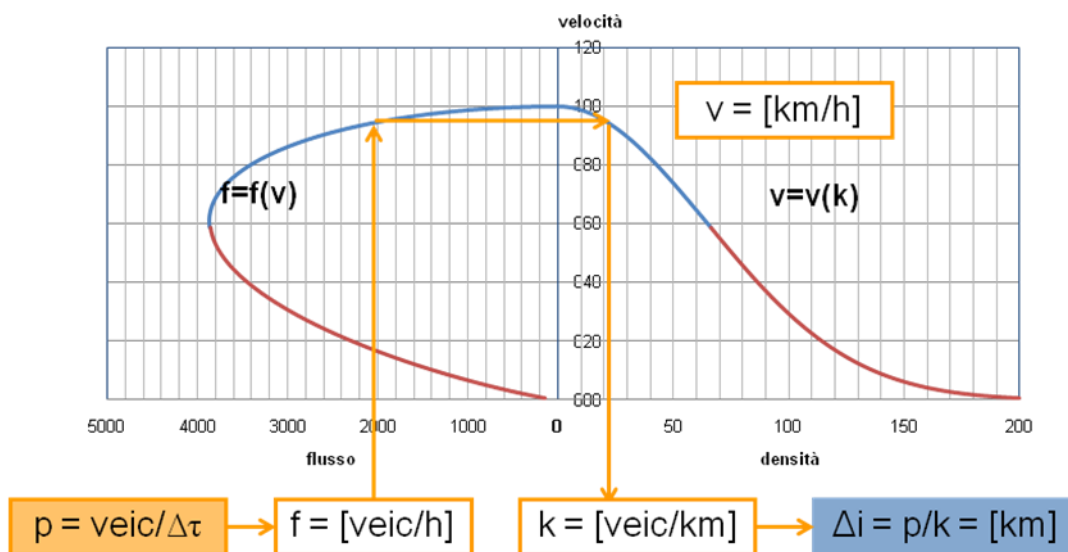


Figura 87 Processo di determinazione dell'ampiezza dell'intorno dei pacchetti

Una volta determinato l'intorno del pacchetto dei veicoli entranti, questo rimane costante durante tutto il percorso compiuto dal pacchetto stesso. La velocità reale del pacchetto, quando questo percorre la rete influenzato dalla presenza degli altri pacchetti, sarà determinata considerando un nuovo valore di densità calcolato come il rapporto tra il numero dei veicoli che costituiscono il pacchetto al quale vengono sommate le intensità dei pacchetti che in quel passo di simulazione $\Delta\tau$ si trovano all'interno del suo intorno, e la dimensione dell'intorno del pacchetto precedentemente calcolata. Considerando che il moto dei veicoli viene influenzato dai veicoli che precedono l'ampiezza dell'intorno verrà considerata a partire dalla posizione in cui si trova il pacchetto nella direzione di moto dei veicoli. In tale modo l'intorno risulterà occupato dai pacchetti di veicoli che hanno una posizione compresa tra la coordinata del pacchetto e la stessa aumentata della dimensione dell'intorno.

L'ampiezza del Δi dipende dal valore del passo di simulazione $\Delta\tau$ responsabile a sua volta della determinazione della quota parte relativa a ciascun $\Delta\tau$ del flusso entrante nel intervallo Δt . Tale ampiezza condiziona la capacità dei singoli pacchetti di essere influenzati da quelli che li precedono sulla rete. Al fine di poter modificare il grado di condizionamento tra pacchetti si è scelto di introdurre nel modello un coefficiente di amplificazione dell'intorno. Il valore di tale coefficiente potrà essere variato in fase di calibrazione e validazione in modo da assimilare il comportamento simulato dal modello al comportamento reale.

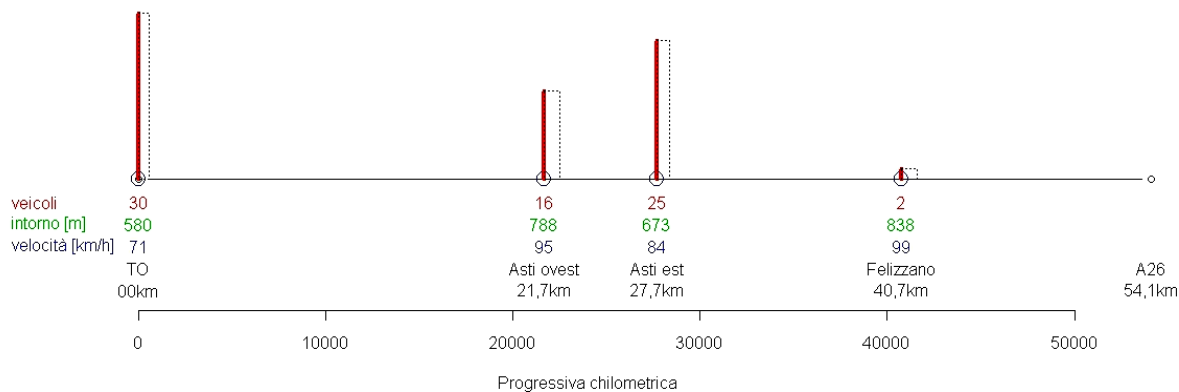


Figura 88 Rappresentazione della rete carica durante un passo di simulazione

Da diverse simulazioni attuate con questo modello si sono potuti osservare i fenomeni di propagazione della coda e della sua risoluzione. Infatti nel caso in cui un pacchetto si trovi ad avere nel suo intorno un valore di densità molto elevato - cioè incontra sul suo percorso pacchetti con intensità maggiore che viaggiano a velocità inferiori – diminuisce anch’egli la sua velocità accodandosi a questi pacchetti e così via per gli altri pacchetti che seguono. Si verifica in questo modo la formazione di una coda che si propaga all’indietro come un’onda. I pacchetti che seguono ridurranno quindi la loro velocità perché influenzati dalla condizione di traffico congestionato formatasi a valle. Questo fenomeno di propagazione all’indietro della coda è dovuto appunto dalla dimensione dell’intorno dei pacchetti e dal fatto che tale intorno è localizzato a valle della posizione del pacchetto. Allo stesso modo questo posizionamento dell’intorno permette di verificare anche il fenomeno inverso di risoluzione della coda. Infatti se i pacchetti in coda riducono la loro velocità per effetto della congestione, avviene che l’intorno dei pacchetti che si trovano in testa alla coda presenta valori di densità inferiori – a causa dell’uscita dalla rete di alcuni pacchetti giunti a destinazione – e quindi avranno velocità più elevate. Se il pacchetto precedente ha velocità maggiore del pacchetto che segue percorrerà durante il passo temporale di simulazione $\Delta\tau$ uno spazio maggiore e quindi successivamente si troverà all’esterno dell’intorno del pacchetto che lo seguiva. A questo punto la densità dell’intorno del pacchetto che seguiva è diminuita e la sua velocità sarà conseguentemente aumentata. Questo fenomeno fa sì che i pacchetti in testa alla coda tendano ad allontanarsi più velocemente favorendo la risoluzione della congestione.

Di seguito le immagini mostrano come il modello rappresenta questi due fenomeni nella loro evoluzione. La situazione rappresentata non è tratta da condizioni reali, ma ha solo valore esemplificativo. Le immagini sono state tratte fotografando la condizione della rete ad intervalli di 5 minuti durante l’ora simulata dal modello.

Intensità dei pacchetti

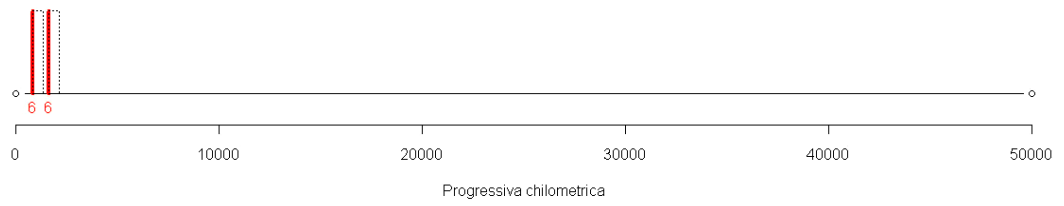


Figura 89 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 00 min -

Intensità dei pacchetti

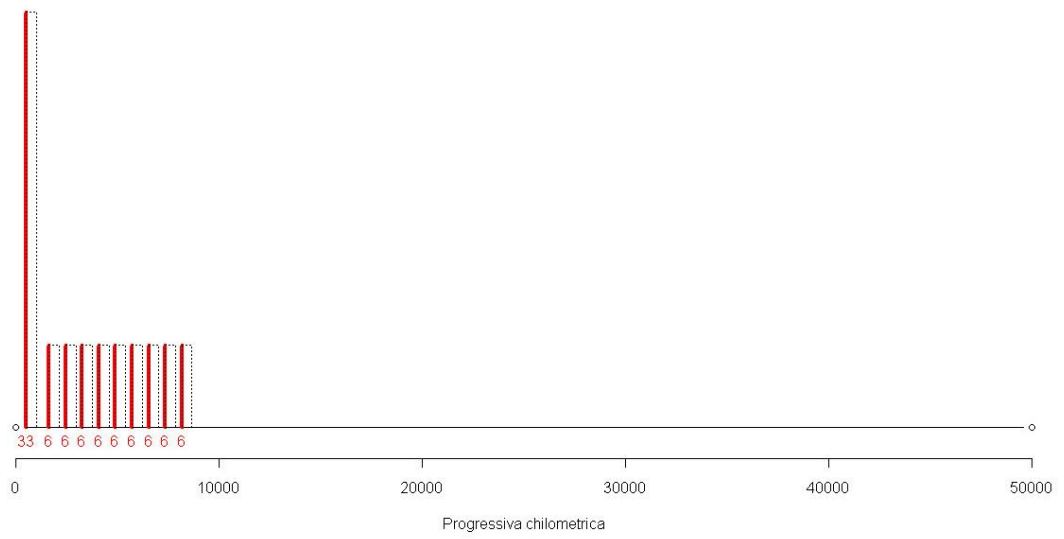


Figura 90 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 05 min -

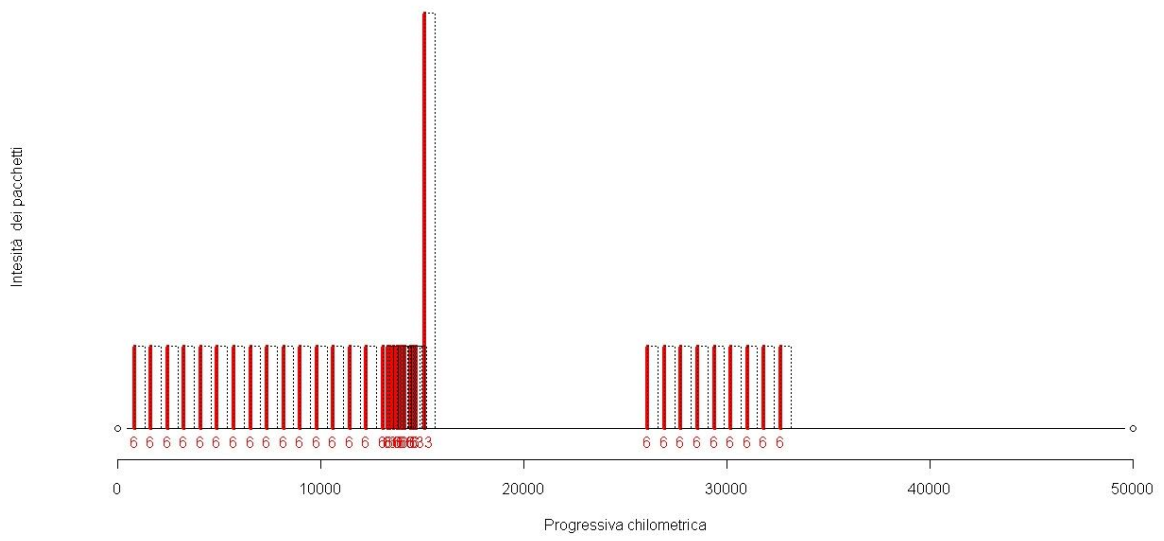


Figura 93 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 20 min -

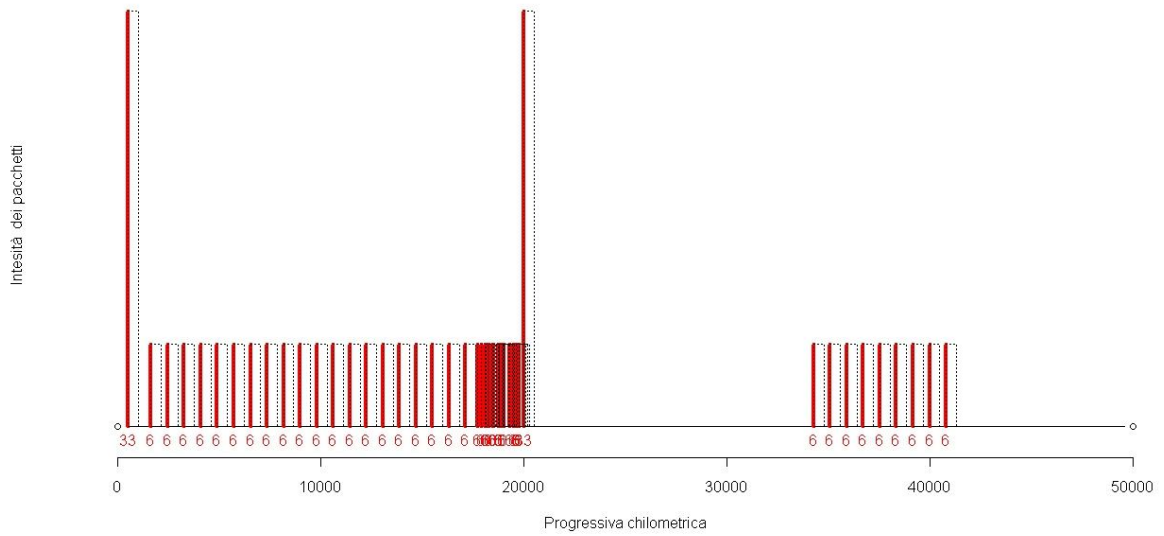


Figura 94 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 25 min -

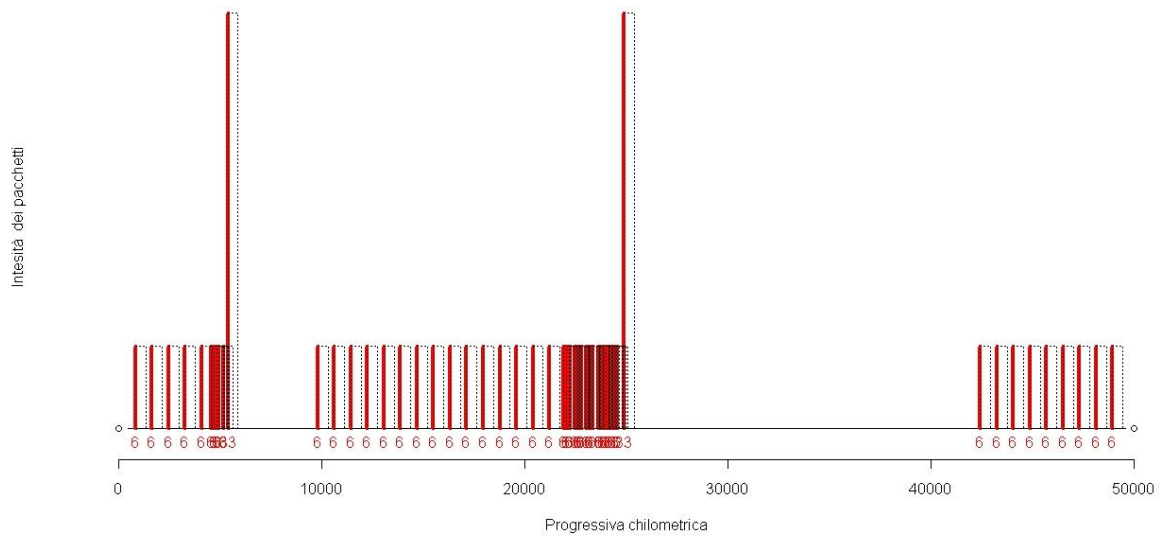


Figura 95 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 30 min -

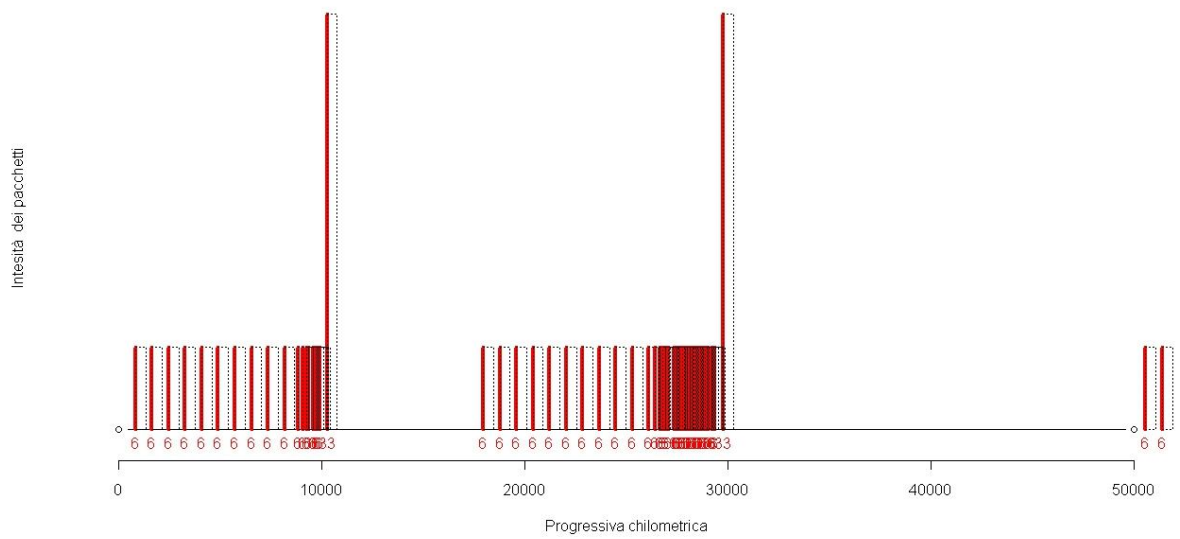


Figura 96 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 35 min -

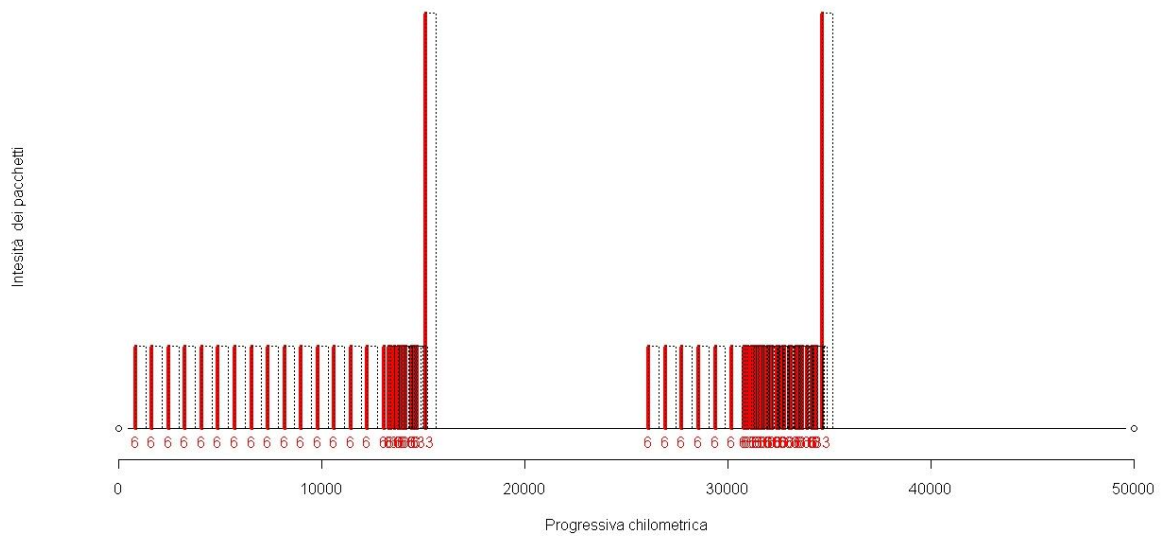


Figura 97 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 40 min -

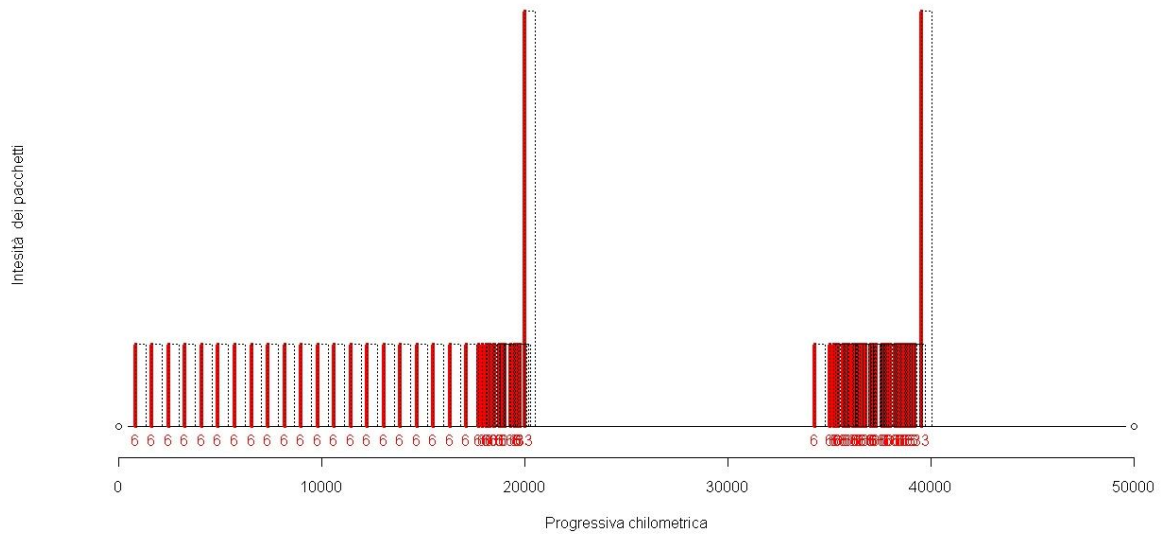


Figura 98 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 45 min -

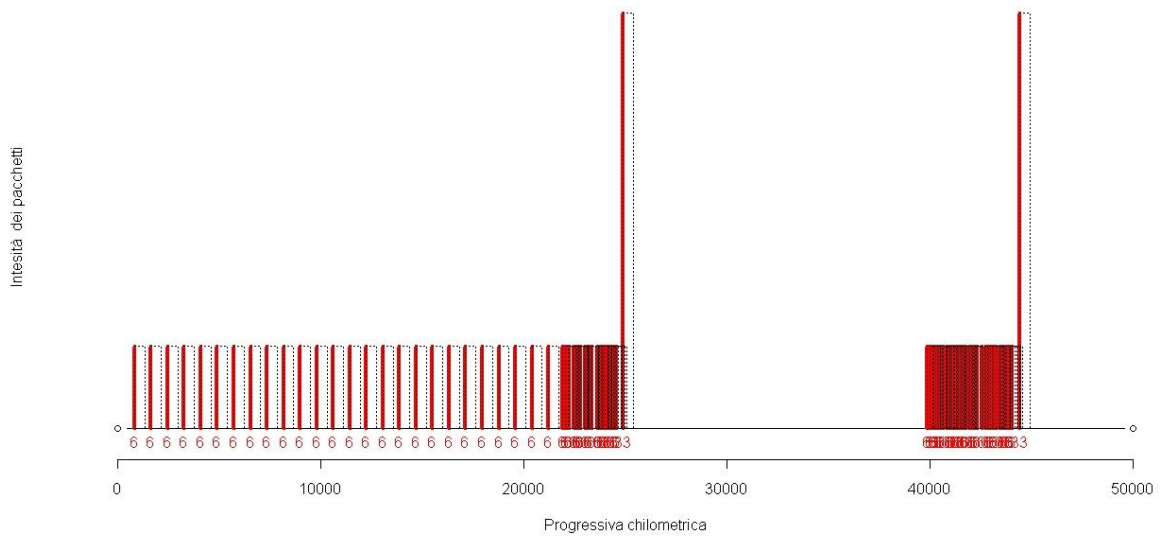


Figura 99 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 50 min -

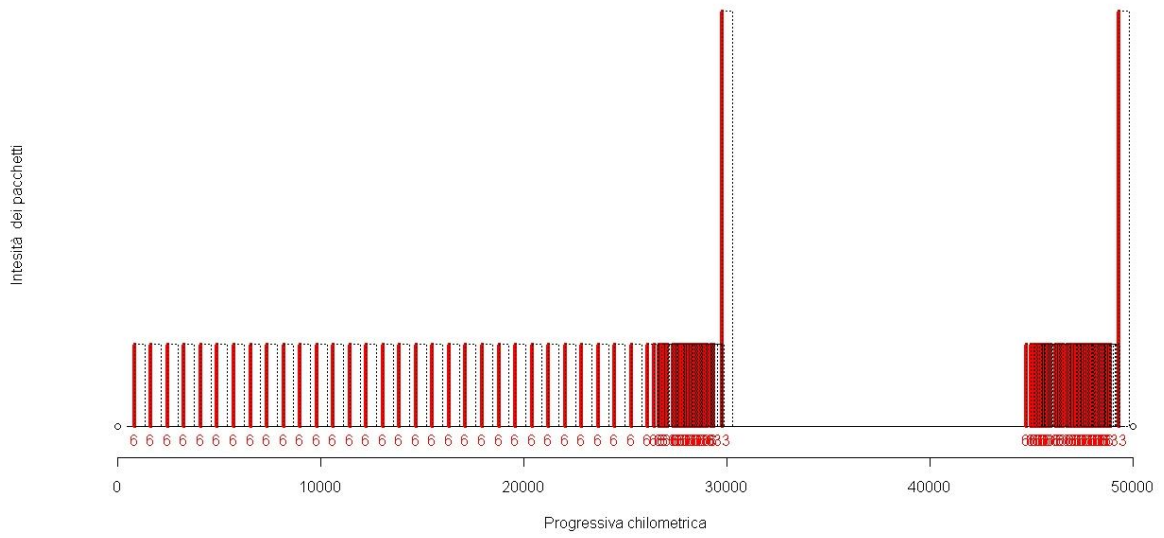


Figura 100 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 55 min -

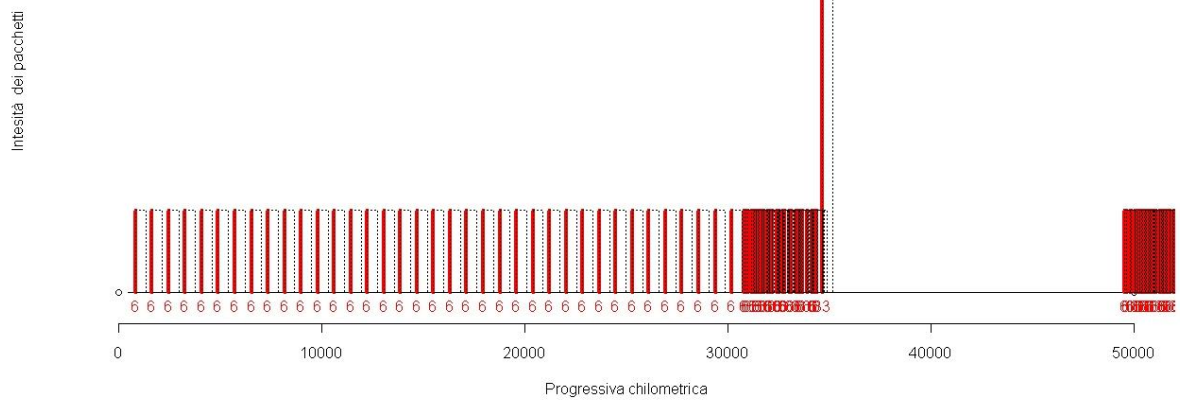


Figura 101 Fenomeno di creazione della coda - istante di simulazione 60 min -

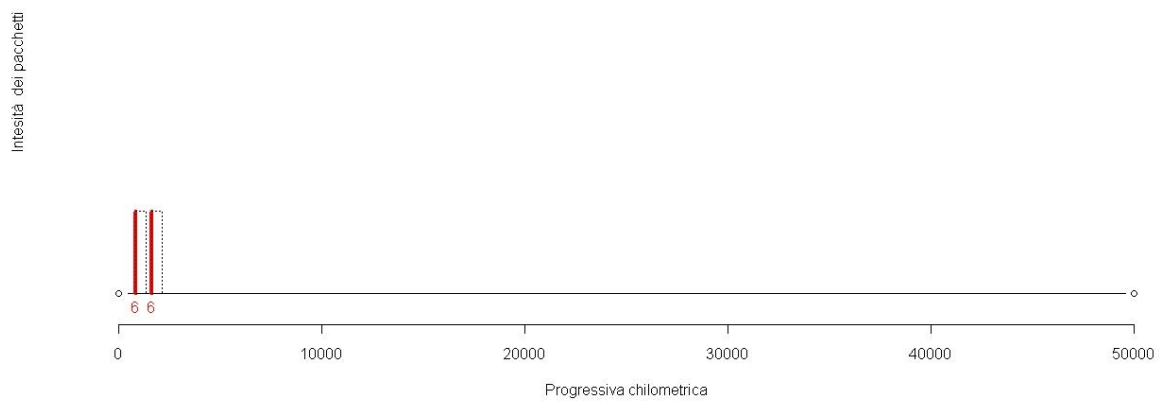


Figura 102 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 00 min -

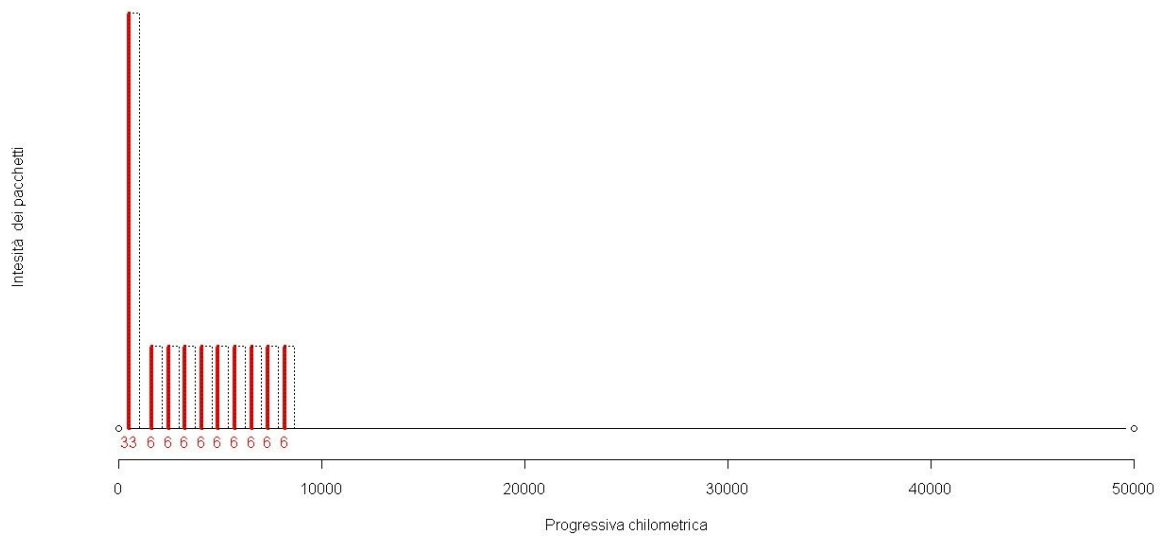


Figura 103 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 05 min -

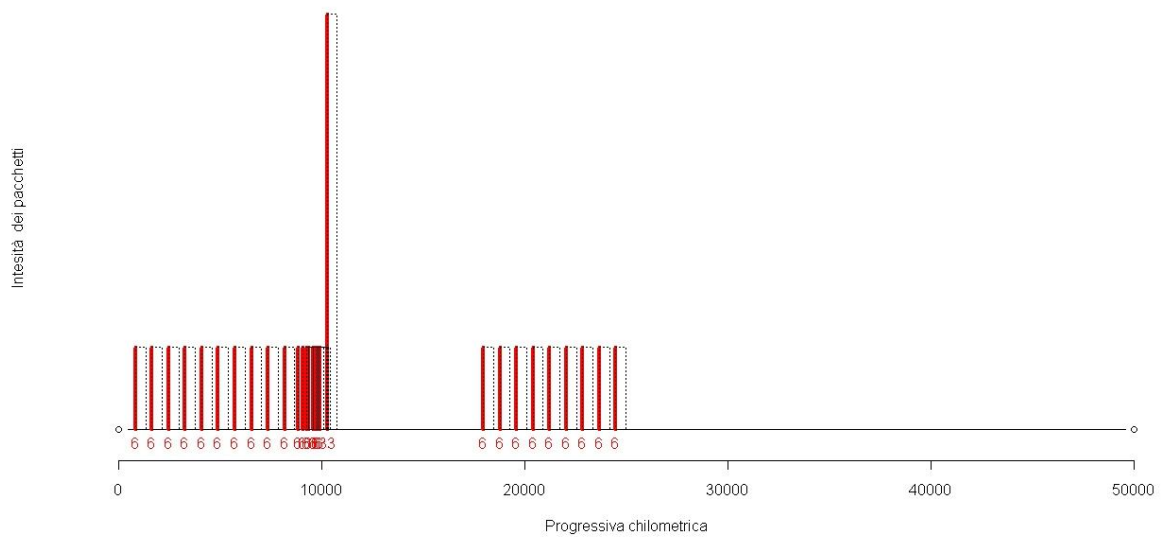


Figura 104 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 15 min -

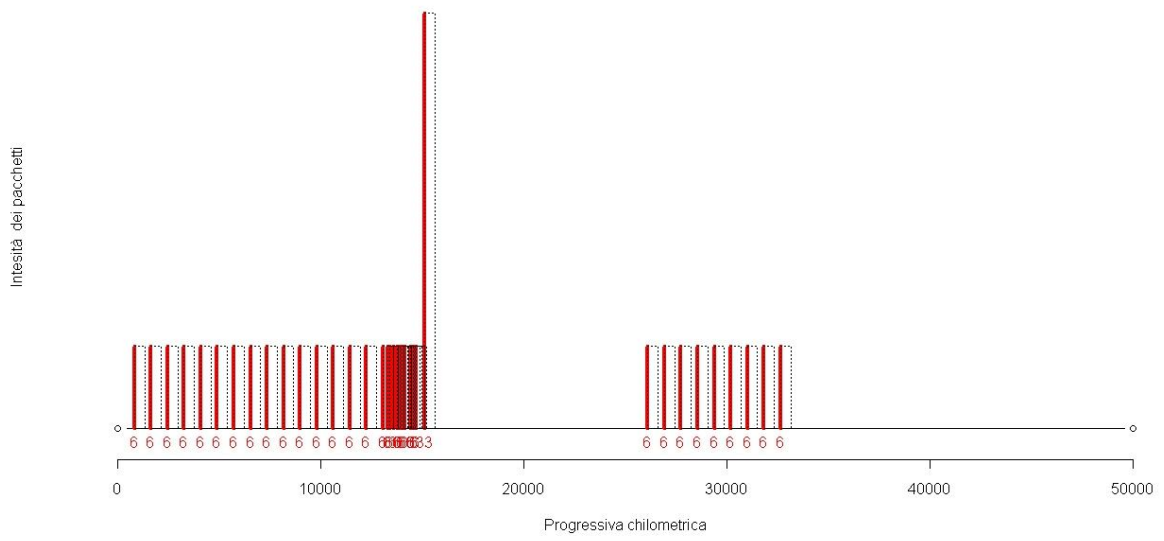


Figura 105 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 20 min -

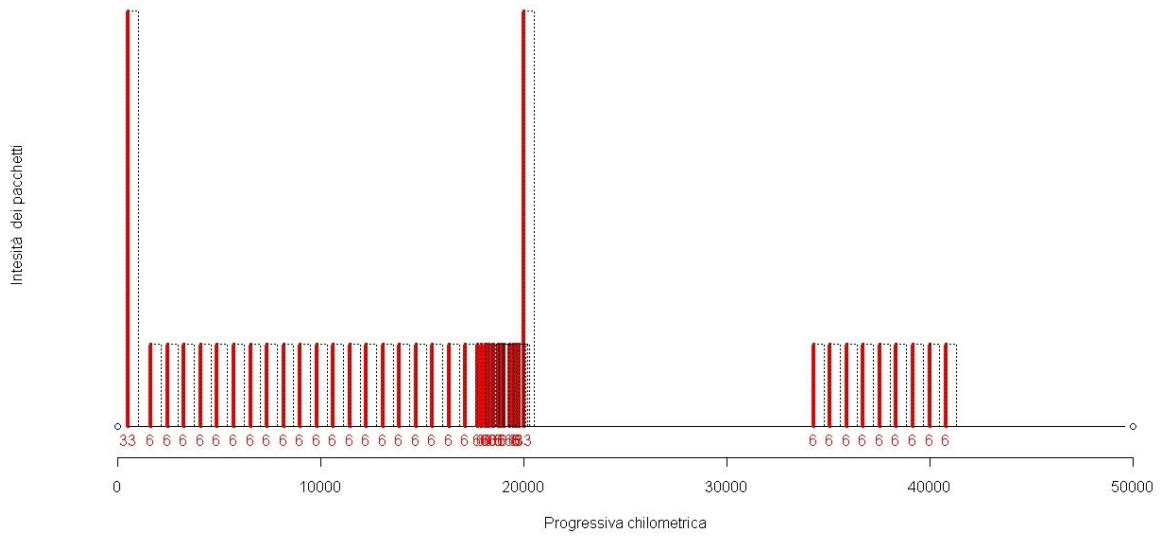


Figura 106 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 25 min -

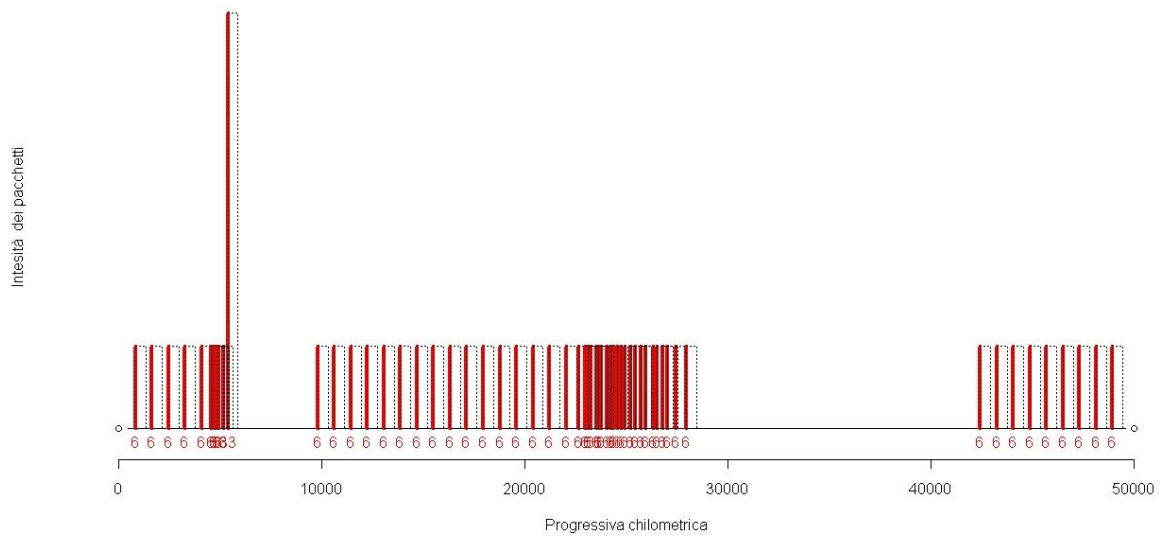


Figura 107 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 30 min -

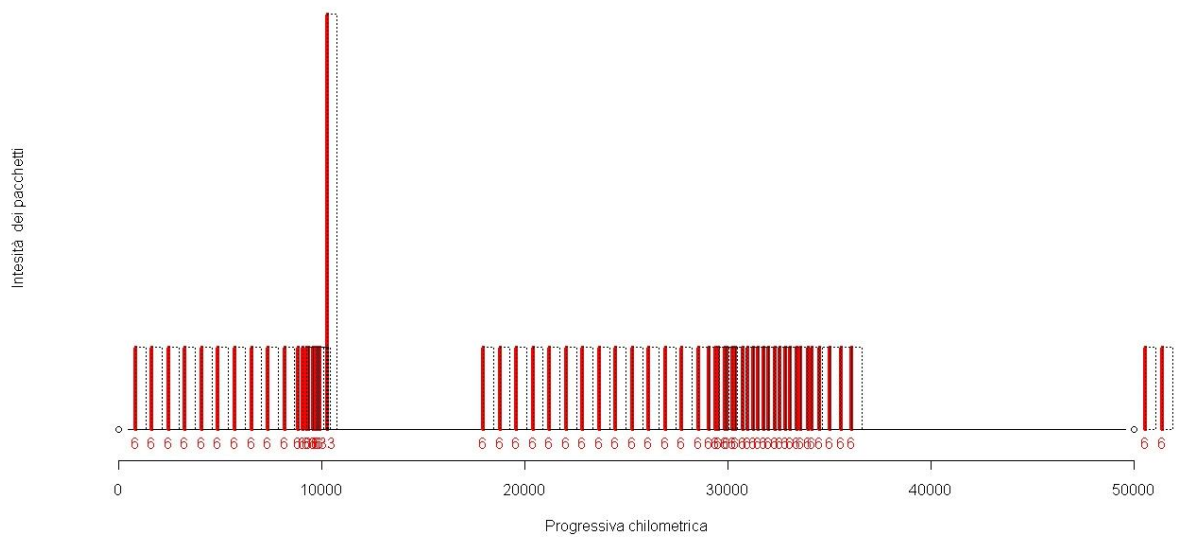


Figura 108 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 35 min -

Intensità dei pacchetti

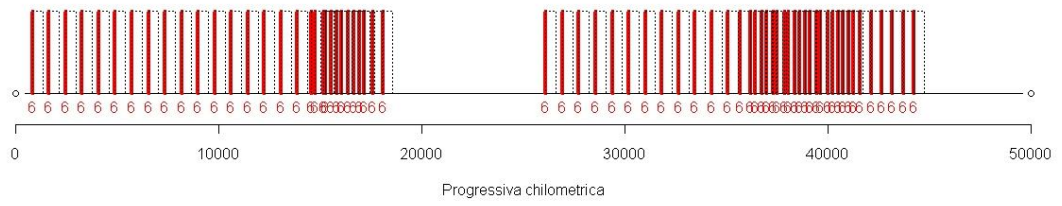


Figura 109 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 40 min -

Intensità dei pacchetti

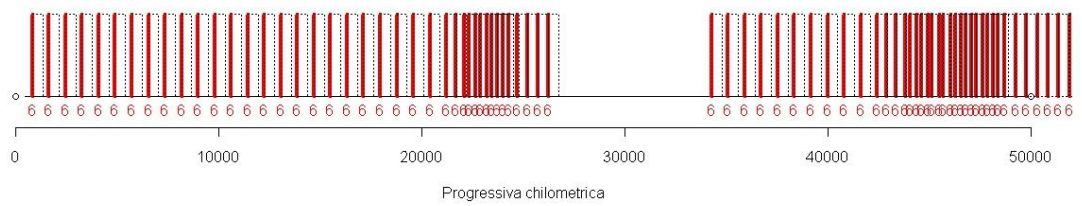


Figura 110 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 45 min -

Intensità dei pacchetti

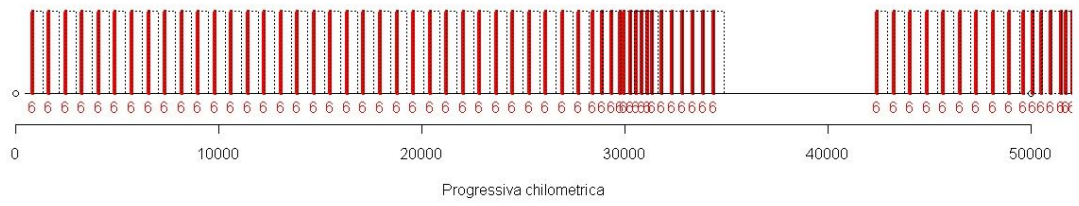


Figura 111 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 50 min -

Intensità dei pacchetti

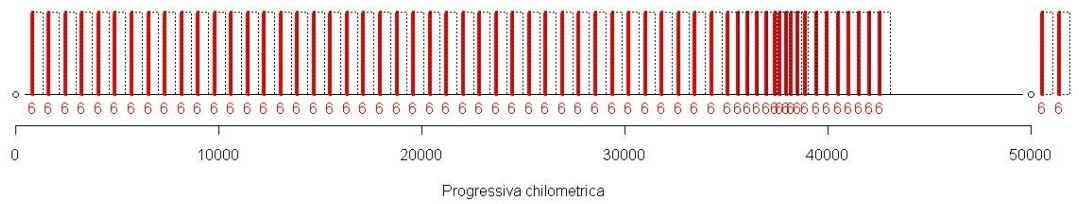


Figura 112 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 55 min -

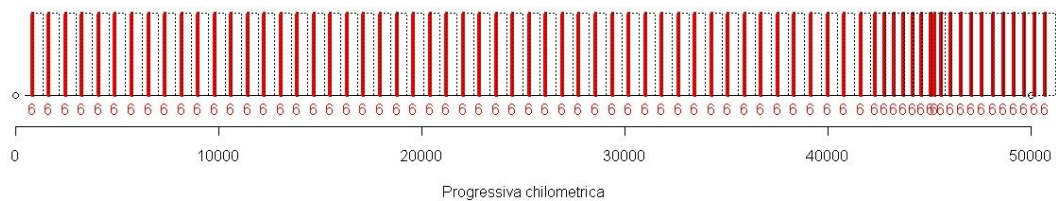


Figura 113 Fenomeno di risoluzione della coda - istante di simulazione 60 min -

La capacità del modello di simulare questi due comportamenti reali può essere affinata in fase di calibrazione e validazione attraverso la variazione di un semplice parametro del modello chiamato: ampiezza dell'intorno. Tale parametro ha la funzione di accrescere o diminuire l'ampiezza dell'intorno al fine di modificare il grado di influenza dei pacchetti tra di loro e quindi modificando la velocità dei fenomeni di propagazione e risoluzione della coda.

Il modello durante la simulazione di ciò che prevede avvenga nell'orizzonte di simulazione visualizza lo spostamento dei pacchetti e il livello di servizio - secondo i valori limite di densità forniti da HCM - che essi incontrano lungo tutta la rete. Questa visualizzazione permette di individuare possibili criticità future sulla rete. Proprio per questa capacità il suo utilizzo potrebbe essere combinato ad esempio all'istituzione della terza corsia dinamica o alla regolazione della velocità dei veicoli a monte delle zone congestionate, ecc.

Al termine della simulazione dell'orizzonte temporale il modello fornisce alcuni dati che esprimono le condizioni di circolazioni previste per quel tempo. Tali informazioni riguardano i tempi di percorrenza medi dei diversi percorsi e la velocità media relativa. Questi dati di uscita del modello ed in particolare i tempi di viaggio stimati possono essere utilizzati quali informazioni da fornire all'utenza aumentando la percezione da parte degli utenti del servizio fornito dal sistema di trasporto autostradale.

6.5 Processi di calibrazione e validazione del modello

La calibrazione è una operazione del processo di formulazione di un modello, in particolare è una delle tre operazioni necessarie che qui si richiamano:

- specificazione: scelta della forma funzionale del modello e delle variabili che vi compaiono;
- calibrazione: quantificazione dei parametri presenti nell'equazioni del modello;
- validazione: verifica della capacità del modello di riprodurre la realtà con i dati disponibili.

La calibrazione consiste dunque nell'attribuire i valori opportuni ai parametri che compaiono nel modello (Maja, 2008).

I parametri del modello possono essere riassunti nel seguente elenco:

- parametri relativi alla curva di deflusso:
 - velocità di flusso libero (VFL);
 - capacità massima dell'infrastruttura (C);
- coefficiente di equivalenza dei veicoli pesanti (PCE);
- fattore di amplificazione dell'intorno relativo ai pacchetti (α);
- passo temporale di simulazione ($\Delta\tau$).

La stima dei valori è stata effettuata, come mostrato nei paragrafi precedenti, sulla base dei dati storici raccolti alle stazioni dell'autostrada relativi ai flussi di traffico. A ciascuno di questi parametri, attraverso l'analisi critica dei dati storici in nostro possesso e le diverse elaborazioni compiute, è stato associato un valore specifico.

Sono stati utilizzati i dati storici per la stima dei parametri perché tali dati hanno le seguenti caratteristiche:

- omogeneità su tutto il territorio: i dati storici sono stati raccolti attraverso il sistema dedicato alla riscossione del pedaggio su tutta la rete in esame;
- coerenza: sono stati raccolti nel medesimo contesto territoriale cui sarà applicato il modello;
- attualità: si riferiscono ad un passato prossimo ed inoltre il modello prevede l'aggiornamento periodico della banca dati con dati sempre più recenti al fine di aggiornare anche i valori dei parametri.

Velocità Flusso Libero	VFL	100 km/h
Capacità massima	C	3866 veic/h
Coeff. equivalenza	PCE	1,76
Coeff. amplificazione intorno	α	1
Passo temporale	$\Delta\tau$	30 sec

Tabella 41 Valori dei parametri del modello stimati sulla base dei dati storici

Alla fine delle operazioni di calibrazione è necessario svolgere alcune verifiche sul modello calibrato per accertarsi che il valore assunto dai parametri soddisfi alcune condizioni atte a poterli considerare ragionevolmente corretti. Questa fase del processo di formulazione del modello è la fase di validazione. La validazione consiste nella verifica della capacità del modello stesso di riprodurre la realtà con i dati disponibili confrontando alcuni risultati simulati, per esempio i flussi calcolati su alcuni archi del grafo, con la realtà, per esempio con i flussi reali misurati. Come per la calibrazione, anche per l'esecuzione della validazione è quindi necessario disporre di informazioni raccolte con l'osservazione della realtà oggetto di studio, tipicamente con l'esecuzione di indagini aggregate, costituite da conteggi o misure dei flussi di traffico.

La validazione risulta molto più lunga e impegnativa delle altre operazioni anche perché, molto spesso, risulta necessario riformulare il modello e calibrarne nuovamente i parametri, magari compiendo una serie di indagini integrative in grado di fornire ulteriori dati relativi al fenomeno.

Nella fase di validazione è necessario non solo considerare i risultati numerici ottenuti dalle simulazioni del modello, ma effettuare alcune osservazioni significative che possano rivalere eventuali carenze e inesattezze compiute in fase di calibrazione:

- la ragionevolezza e la significatività dei parametri stimati;
- la capacità del modello di riprodurre i comportamenti degli utenti;
- le ipotesi compiute sulla forma funzionale assunta per il modello.

In fase di validazione sarebbe necessario conoscere i dati relativi ad un nuovo giorno esterno al campione dei giorni utilizzati per la calibrazione del modello. In questo specifico lavoro di tesi, dato il limitato numero di giorni a disposizione, si utilizzerà ugualmente un giorno appartenente ai 14 che costituiscono la base dati disponibile.

Di questo giorno che considereremo come il “nuovo giorno” si conoscono i dati relativi alle entrate e alle uscite dei veicoli per l'intero periodo delle 24 ore. Questi dati verranno utilizzati come dati di input del modello per eseguire una previsione.

Considerando quanto visto per la fase di associazione del nuovo giorno ad uno dei cluster definiti, sono stati considerati gli ingressi registrati fino alle ore 8:00 e sulla base di questi è stata eseguita l'identificazione del cluster più simile. Nel paragrafo relativo alla determinazione della domanda in ingresso attraverso l'analisi statistica di clusterizzazione si evidenziava come il processo di identificazione del cluster più simile diventasse stabile nelle prime ore della mattina, perciò eseguire l'identificazione con i flussi in ingresso delle prime otto ore della giornata garantisce l'individuazione del cluster tipo senza errore.

Il processo di identificazione associa il nuovo giorno al cluster: giorni feriali. Sulla base dei dati reali raccolti fino alle ore 8:00 vengono stimati i flussi entranti durante l'ora successiva divisi nelle due classi veicolari: leggeri e pesanti. Tali flussi vengono ridistribuiti sulla rete secondo le matrici OD dei veicoli leggeri e pesanti dell'ora 8:00 – 8:59.

Riassumiamo quindi i dati su cui è stata eseguita la simulazione del modello:

- istante attuale: ore 8:00;
- giorno attuale appartenente al cluster: giorni feriali;

- i flussi previsti per l'orizzonte di simulazione derivano dal cluster individuato e verranno ripartiti dal modello secondo la matrice OD delle ore 8:00 – 8:59 relativa al medesimo cluster.

All'inizio della simulazione ci sarà una fase di warm-up della durata di 20 minuti durante la quale la rete viene caricata in modo casuale. Tale fase serve semplicemente per evitare che i flussi previsti nei primi minuti dell'orizzonte di simulazione si trovino a percorrere la rete scarica, condizione assolutamente distante dalle condizioni reali. Questa fase di inizializzazione del modello dovrà essere compiuta solamente all'inizio dell'applicazione del modello nella realtà e non dovrà più essere ripetuta se il modello continuerà ad essere utilizzato con iterazioni ogni 15 minuti utilizzando i dati aggiornati dai rilievi alle stazioni di ingresso.

Di seguito si riportano le immagini prodotte durante la simulazione del modello, fotografando la situazione che si genera sulla rete ad intervalli di 5 minuti. La linea verde indica il valore della densità in veicoli al chilometro che si genera sulla rete a seguito della presenza contemporanea dei pacchetti sulla rete. Sono indicati con due linee tratteggiate i valori della densità relativi al livello di servizio C e al livello di servizio F. Si ritiene significativo riportare il valore della densità è questi due valori caratteristici al fine di rendere immediata la conoscenza delle condizioni di traffico che si verificano sulla rete. In questo modo sono facilmente individuabili quelle progressive lungo la rete in corrispondenza delle quali si potrebbero verificare situazioni di traffico intenso secondo quanto previsto dal modello.

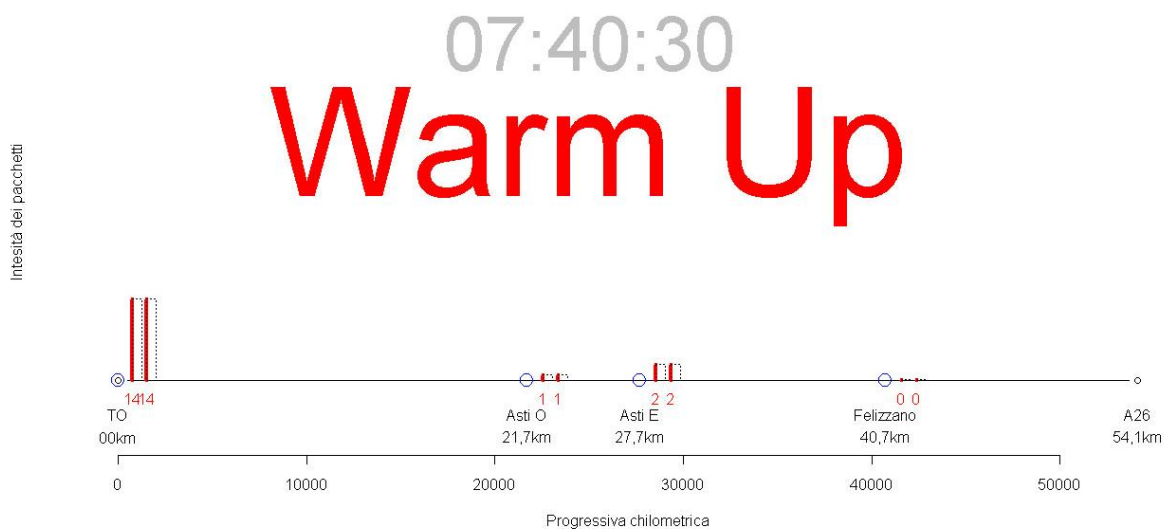


Figura 114 Fase di warm-up simulata dal modello ore 7:40

Intensità dei pacchetti

07:45:00 Warm Up

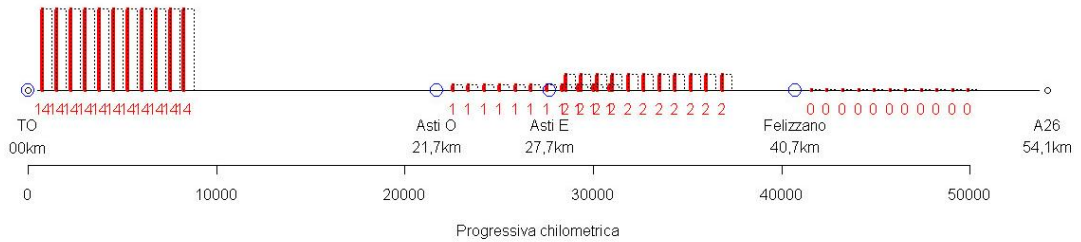


Figura 115 Fase di warm-up simulata dal modello ore 7:45

Intensità dei pacchetti

07:50:00 Warm Up

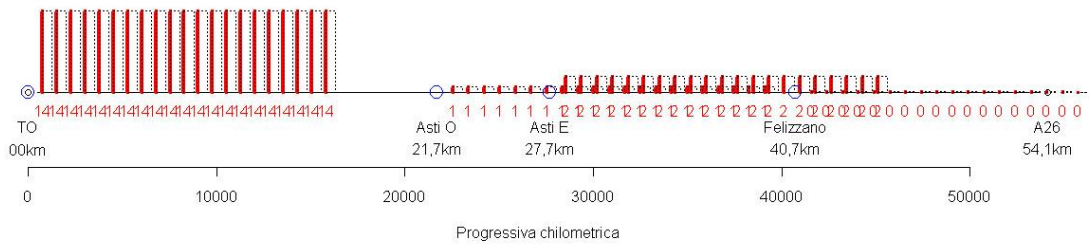


Figura 116 Fase di warm-up simulata dal modello ore 7:50

Intensità dei pacchetti

07:55:00 Warm Up

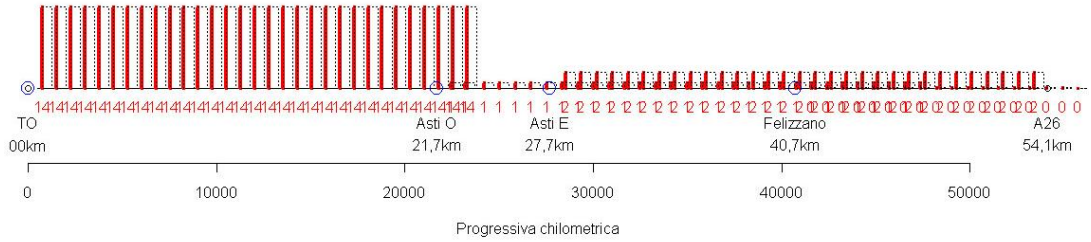


Figura 117 Fase di warm-up simulata dal modello ore 7:55

08:00:30

Intensità dei pacchetti

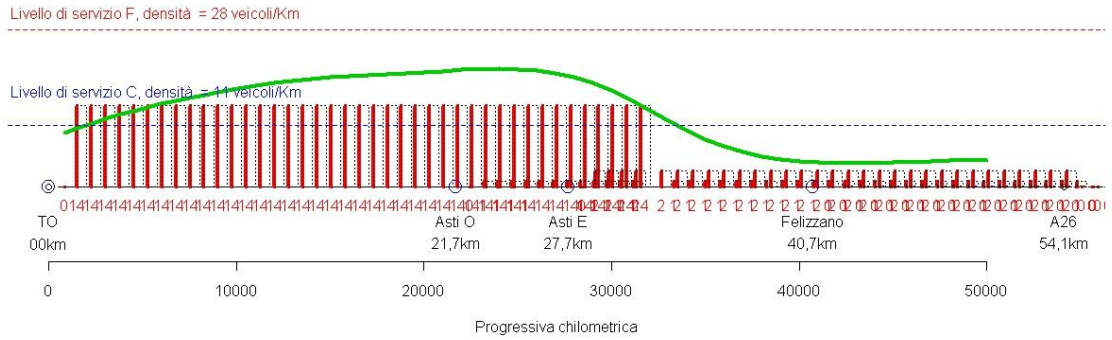


Figura 118 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 8:00

08:15:00

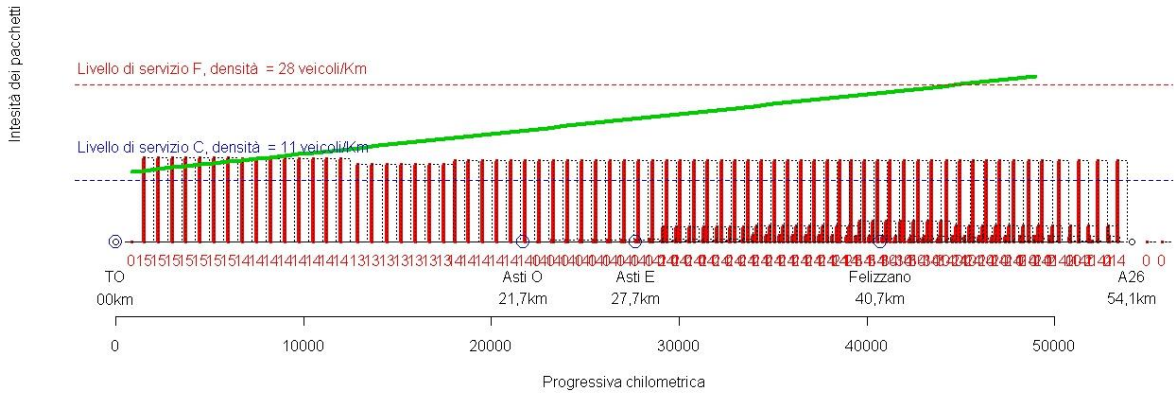


Figura 121 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 8:15

08:20:00

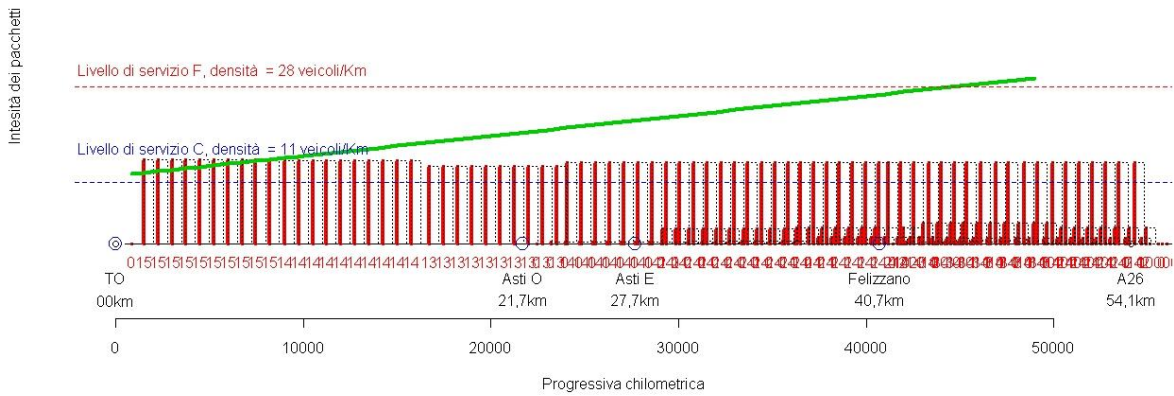


Figura 122 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 8:20

08:25:00

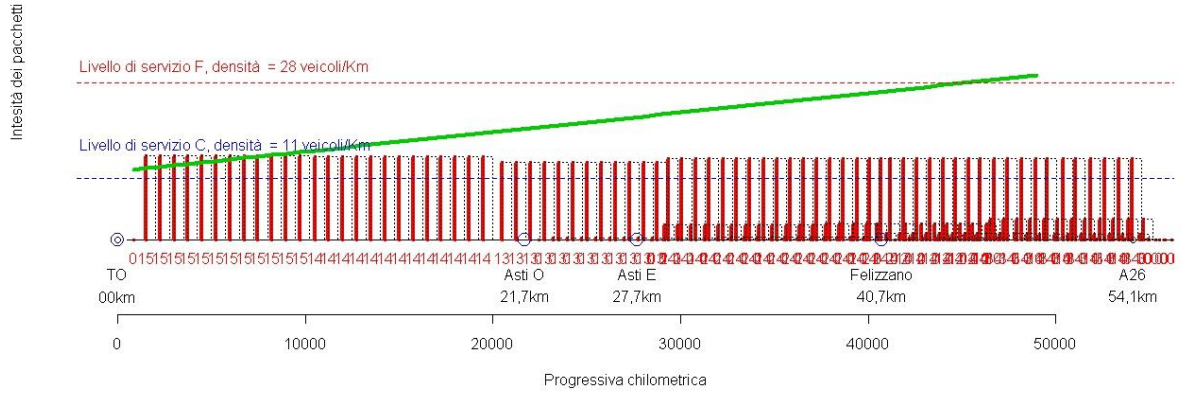


Figura 123 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 8:25

08:30:00

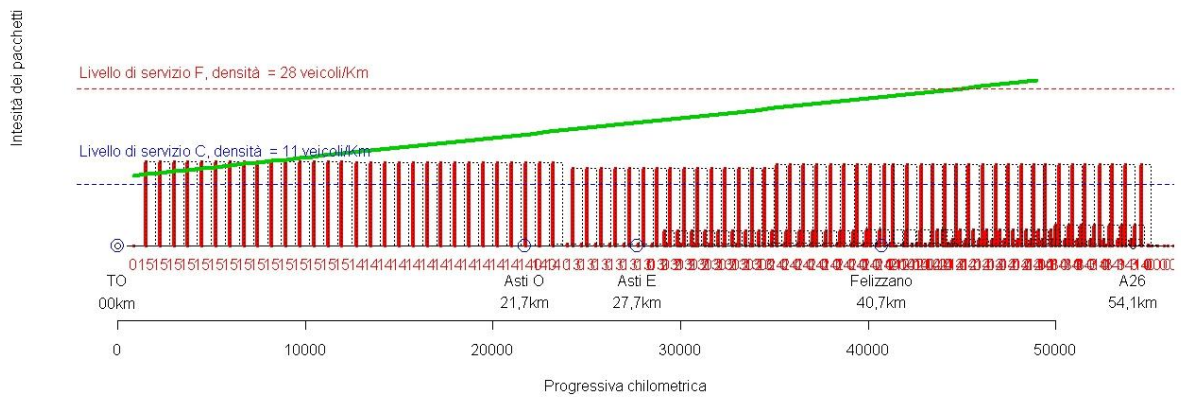


Figura 124 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 8:30

08:35:00

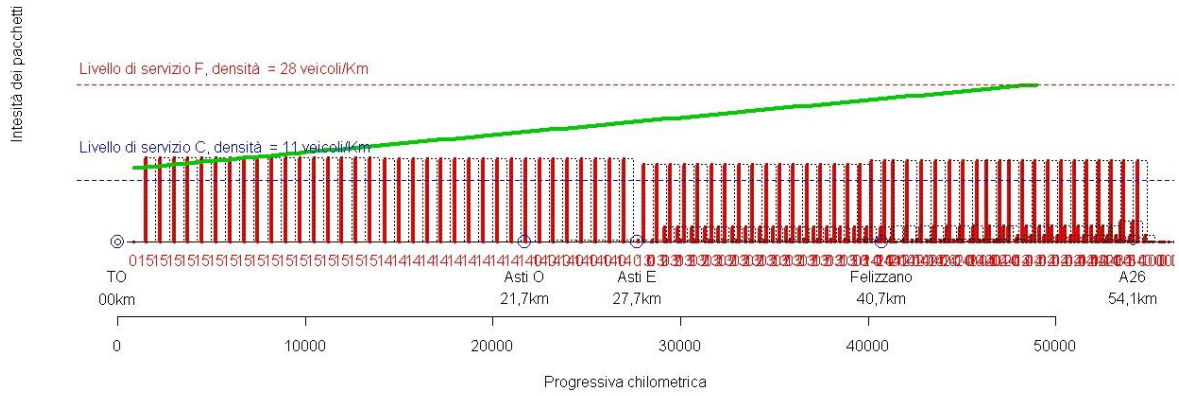


Figura 125 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 8:35

08:40:00

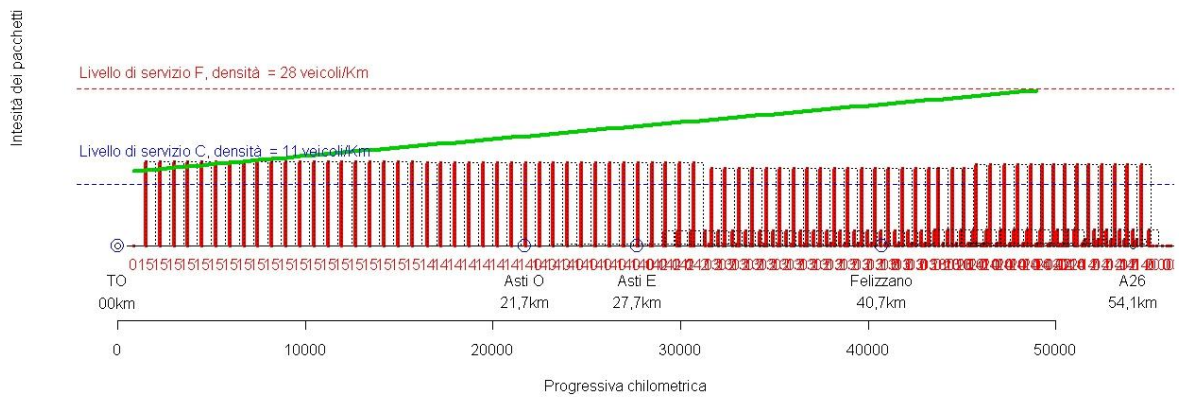


Figura 126 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 8:40

08:45:00

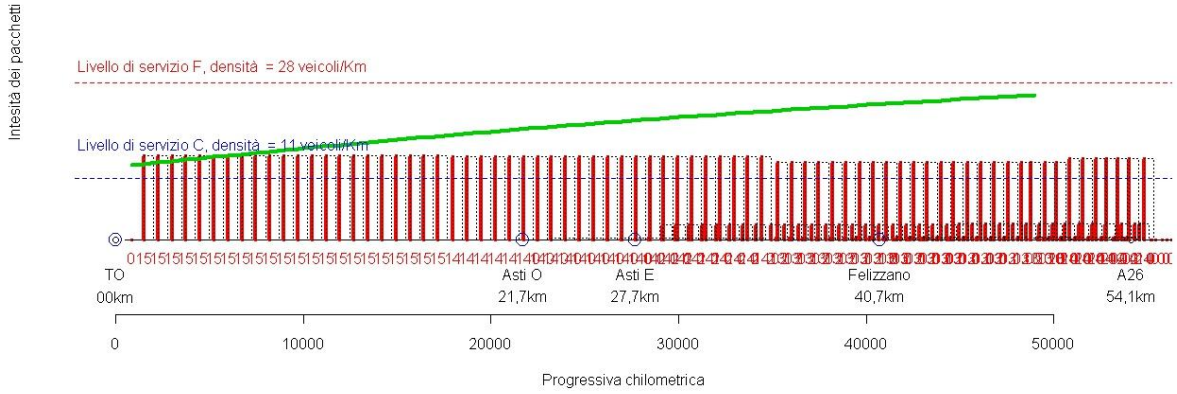


Figura 127 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 8:45

08:50:00

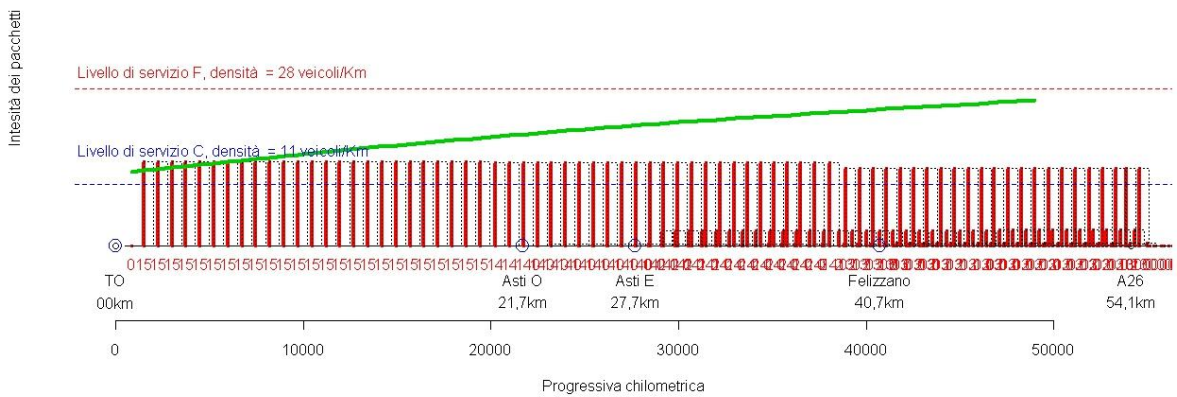


Figura 128 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 8:50

08:55:00

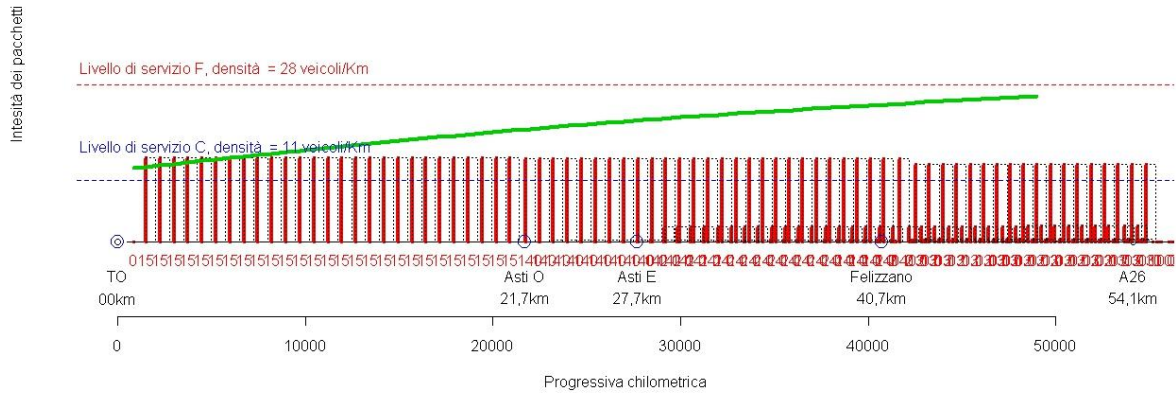


Figura 129 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 8:55

09:00:00

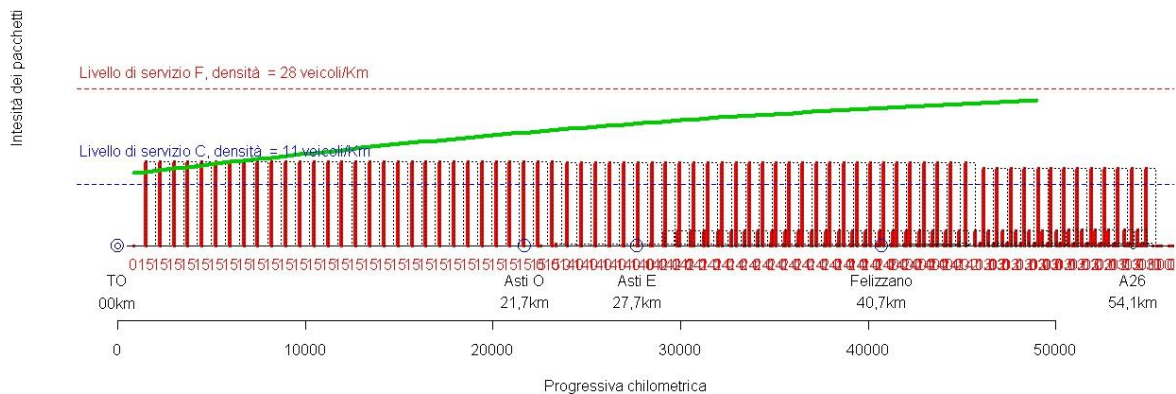


Figura 130 Inizio della simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora con i flussi stimati in ingresso ore 9:00

Al termine della fase di simulazione dell'orizzonte temporale di 1 ora il modello sviluppato fornisce i valori delle velocità medie di percorrenza dei veicoli e i tempi di percorrenza da casello a casello (Tabella 42). In questa simulazione i dati di uscita chiesti al modello per eseguire la validazione sono stati i seguenti:

- velocità medie di percorrenza;
- tempi medi di percorrenza.

Origine-Destinazione	Distanza percorsa	V_{media}	T_{medio}
445-uscita	54,125 km		
447-uscita	32,428 km		
448-uscita	26,433 km		
449-uscita	13,387 km		

Tabella 42 Dati di uscita forniti dal modello secondo le richieste specifiche

Sono stati richiesti questi dati di uscita al modello perché questi sono i dati che possono essere determinati incrociando le informazioni reali relative al giorno utilizzato per la simulazione. Il confronto tra queste informazioni relative a velocità e tempi di viaggio permetteranno di verificare la bontà del modello sviluppato. Considerando i dati reali di questo giorno e quindi incrociando le informazioni per ciascun veicolo, coerenti con l'ora simulata dal modello ovvero 8:00 – 9:00, relative ai tempi di ingresso e uscita e alle stazioni O/D, sono stati determinati i tempi medi di percorrenza e le velocità medie di questi utenti. Questa operazione è stata compiuta considerando separatamente i veicoli delle due classi veicolari: leggeri e pesanti. I valori di velocità e tempi medi determinati sono stati poi mediati considerando come coefficiente di equivalenza per i mezzi pesanti quello utilizzato dal modello pari a 1,76. La media è stata eseguita in modo pesato sulla quantità di veicoli leggeri e pesanti rispetto al totale.

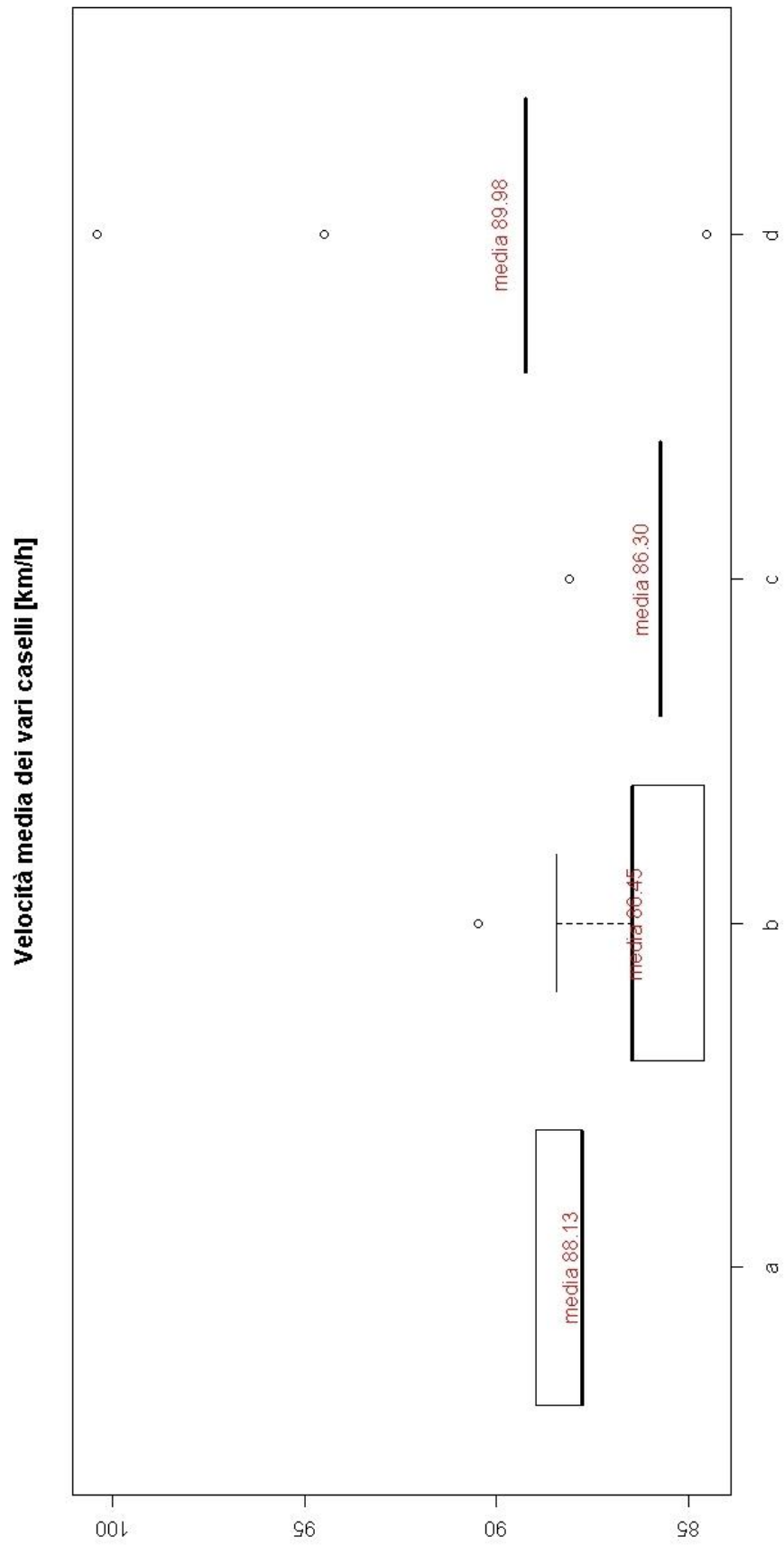


Figura 131 Boxplot relativi ai valori di velocità media di percorrenza dei tratti della rete stimate dal modello

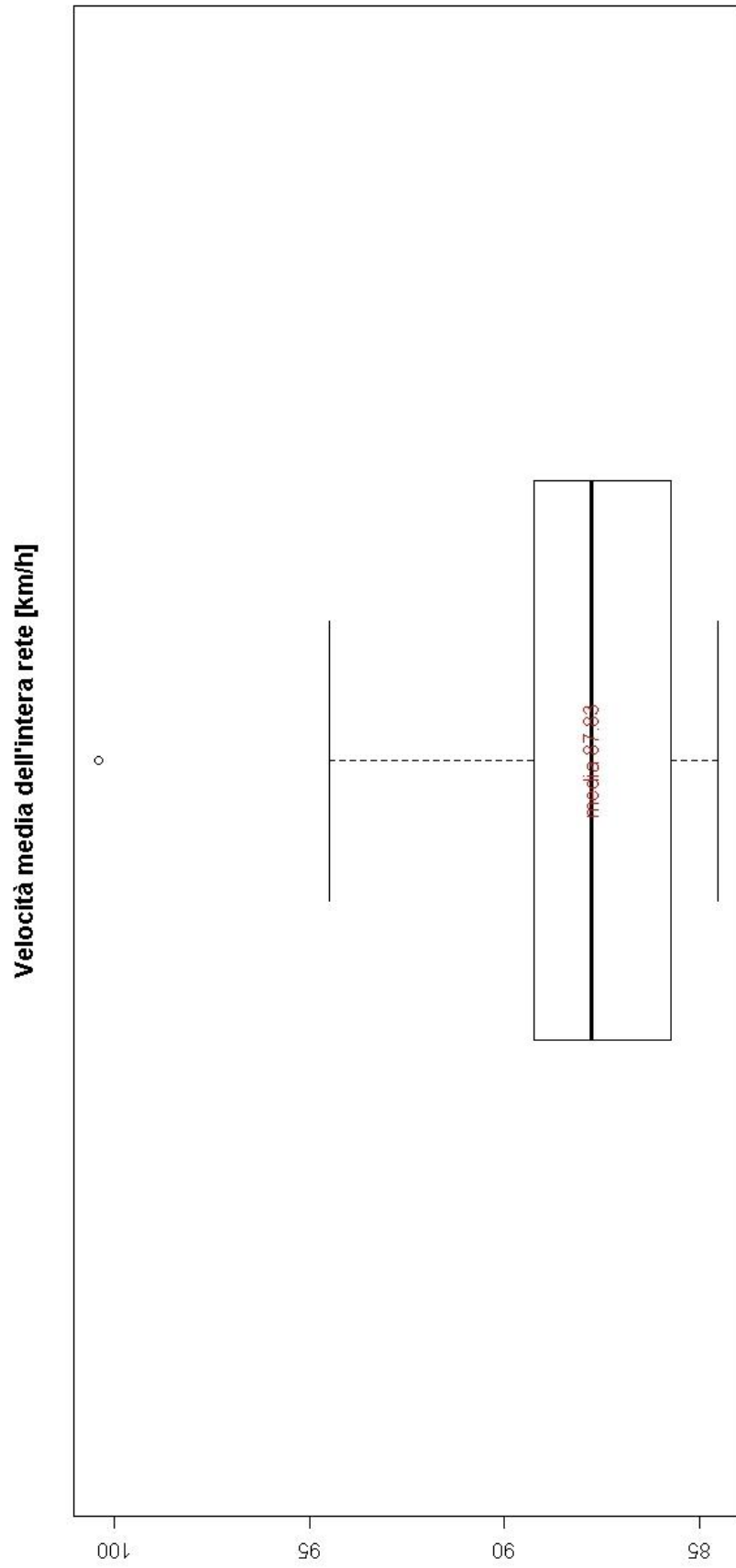


Figura 132 Boxplot della velocità media di percorrenza dell'intera rete stimata dal modello

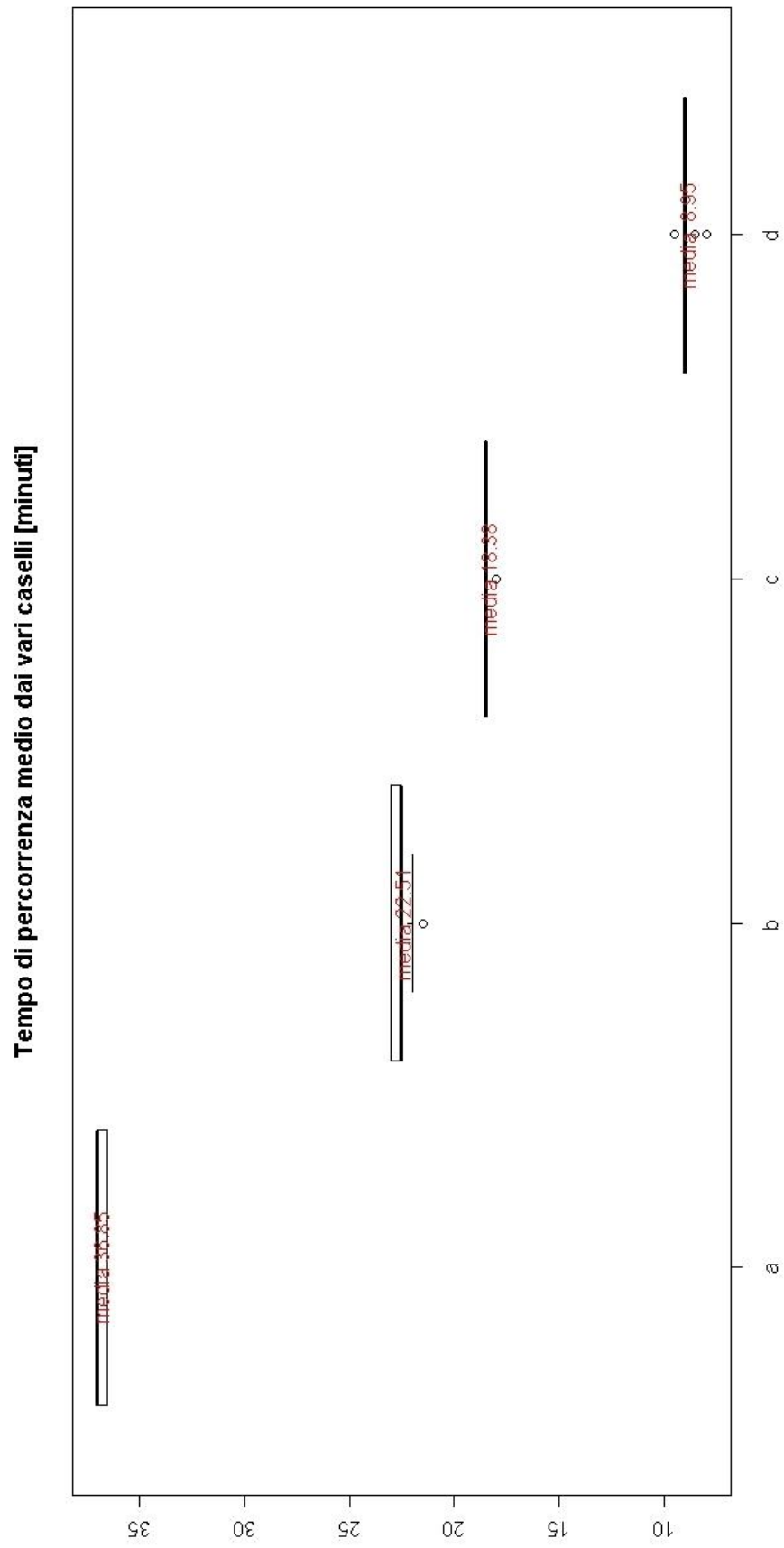


Figura 133 Boxplot relativi ai valori dei tempi media di percorrenza dei tratti della rete stimati dal modello

Nella Tabella 43 e Tabella 44 si confrontano i valori stimati dal modello e i valori reali medi delle velocità e dei tempi di percorrenza.

O	D	Distanza [km]	velocità reale [km/h]	velocità stimata [km/h]	Δv [km/h]	errore %
Torino	A26	54,125	92,38	88,13	4,25	4,60%
Asti ovest	A26	32,428	84,76	86,45	-1,69	-1,99%
Asti est	A26	26,433	83,99	86,30	-2,31	-2,75%
Felizzano	A26	13,387	#	89,98		

Tabella 43 Confronto tra i valori di velocità reali e stimati dal modello

O	D	Distanza [km]	tempo reale [min]	tempo stimato [min]	Δt [min]	errore %
Torino	A26	54,125	35,20	36,85	-1,65	-4,69%
Asti ovest	A26	32,428	23,00	22,51	0,49	2,13%
Asti est	A26	26,433	18,75	18,38	0,37	1,97%
Felizzano	A26	13,387	#	8,95		

Tabella 44 Confronto tra i valori dei tempi di percorrenza reali e stimati dal modello

Come mostrato nelle Tabella 43 la differenza che si registra tra le velocità reali, determinate incrociando i dati relativi agli ingressi e alle uscite dei veicoli nel giorno utilizzato per la validazione, e le velocità stimate dal modello risulta pari a circa 4km/h nel caso con maggiore errore. Allo stesso modo dalla Tabella 44 si desume che l'errore compiuto nella stima dei tempi di percorrenza sulla rete risulta pari a circa 2 minuti nel caso con maggiore errore.

Considerando perciò sia l'errore della stima delle velocità che dei tempi di percorrenza esso risulta sempre inferiore al 5%. L'analisi critica dei risultati numerici ottenuti porta a concludere che questo errore possa essere considerato accettabile perché significherebbe commettere un errore di circa 3 minuti su un tempo di viaggio pari a 1 ora.

Al fine di analizzare ancor più nel dettaglio l'errore commesso nella stima della velocità e dei tempi di percorrenza è possibile calcolare il valore del parametro statistico: coefficiente di determinazione o più comunemente chiamato R^2 . Tale valore misura la bontà dei valori stimati dal modello rispetto ai valori reali. Se il valore di R^2 è prossimo ad 1 significa che il modello approssima bene il valore reale della variabile, mentre se è pari a 0 significa che l'approssimazione comporta un errore non trascurabile. In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** si mostra il risultato del confronto tra i valori di velocità e tempi di percorrenza indicando il valore di R^2 che risulta pari a 0,589 per quanto riguarda le velocità e pari a 0,999 nel caso dei tempi di percorrenza. Tali valori appaiono in accordo con quanto analizzato precedentemente a riguardo degli errori commessi dal modello nella stima. In particolare il valore del coefficiente R^2 relativo ai tempi di percorrenza risulta prossimo a 1 e questo è un dato positivo sulla bontà del modello, seppur tale modello sia ancora in fase di primo sviluppo.

Possiamo quindi concludere al termine di questa simulazione considerando i primi risultati ottenuti che il modello fornisce una risposta soddisfacente per quanto riguarda la stima dei

tempi di viaggio. Risulterebbe interessante a questo punto poter validare ulteriormente il modello e quindi comprovare i risultati ottenuti, con un campione più ampio di dati e sperimentarne un'applicazione in tempo reale in diverse ore della giornata e in diverse tipologie di giorni di traffico.

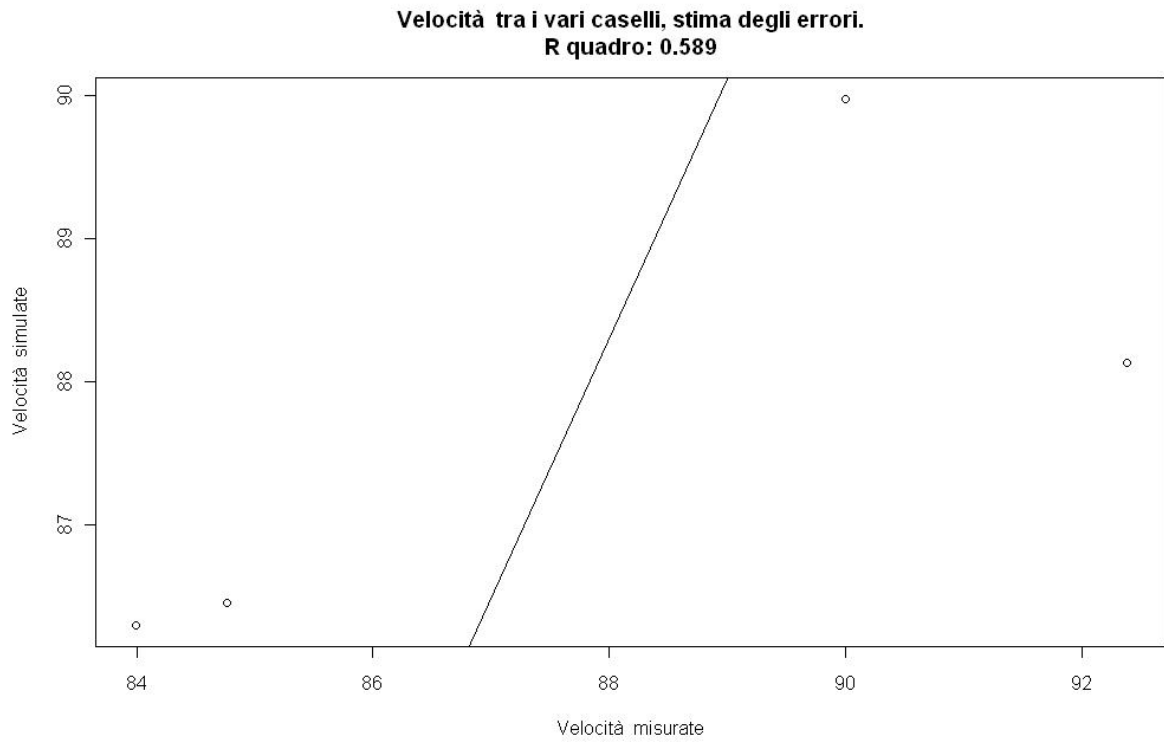


Figura 134 Grafico di confronto tra le velocità simulate e misurate nella realtà con indicazione del valore di R^2

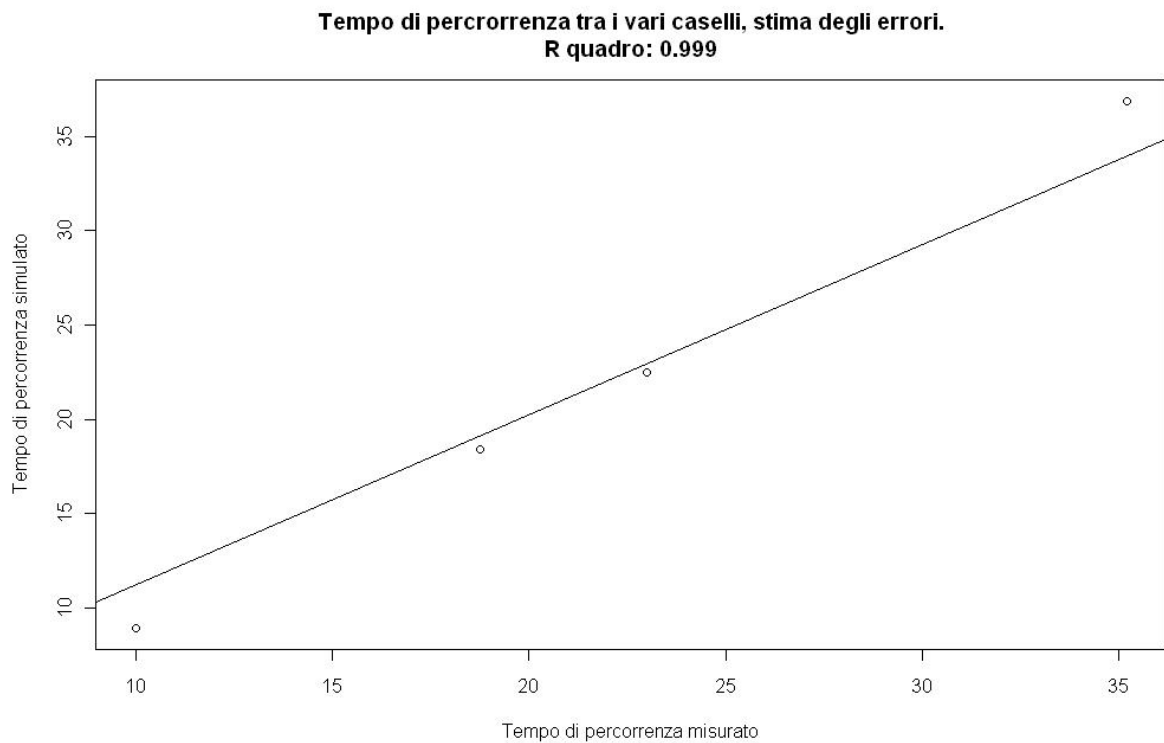


Figura 135 Grafico di confronto tra i tempi di percorrenza simulati e misurati nella realtà con indicazione del valore di R^2

Nota bibliografica di fine capitolo

Al-Kaisy, A. F., Hall, F. L., & Reisman, E. S. (2002). Developing passenger car equivalents for heavy vehicles on freeways during queue discharge flow. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 36(8), 725-742. doi:DOI: 10.1016/S0965-8564(01)00032-5

Autostrade per l'Italia. (2007). GRONDA DI PONENTE, RIQUALIFICAZIONE A10 E POTENZIAMENTO A7 E A12 Analisi delle soluzioni alternative per l'attraversamento della Val Polcevera

Camus, R., & Longo, G. Monitoraggio e controllo in tempo reale di un sistema autostradale: Approccio sperimentale. *Metodi e Tecnologie Dell'Ingegneria Dei Trasporti*,

Cascetta, E. (2006). *Modelli per i sistemi di trasporto: teoria e applicazioni*. Torino: UTET università.

Chirico P., Di Gangi M. (2000). *Modelli di previsione a breve termine de flussi di traffico*. *Metodi e Tecnologie Dell'Ingegneria Dei Trasporti*,

Festa, D. C., Longo, G., Mazzulla, G., & Musolino, G. (2000). *Analisi sperimentale comparativa di differenti modelli per la simulazione di deflusso autostradale*. *Metodi e tecnologie dell'ingegneria dei trasporti*,

Maja, R. (2008). *Pianificazione e simulazione dei sistemi di trasporto*. Politecnico di Milano: Laboratorio Mobilità e Trasporti - Dipartimento IN.D.A.CO.

Nicosia, F. (2000). *Influenza dei mezzi pesanti nelle condizioni di sicurezza del deflusso veicolare*.

Raffaele, M. (2005). *Studio dell'evoluzione del traffico in vista dell'attivazione della corsia dinamica*

Ricci, V. (2004). *R: Un ambiente opensource per l'analisi statistica dei dati*

Richard A, J., & Dean W, W. (2007). *Applied multivariate statistical analysis (6. ed ed.)* Pearson Prentice Hall.

Sala, G., Podestà, C., & Maja, R. (1999). *Analisi sperimentale di modelli di deflusso per reti urbane ed extraurbane*.

Stanley, J. (2009). *Passenger car equivalents of trucks under lane restriction and differential speed limit policies on four lane freeways*. (degree of Master of Science in Civil Engineering,

7. Conclusioni

A conclusione del lavoro presentato in questa tesi, si ripercorrono i passaggi svolti e successivamente si presentano eventuali sviluppi futuri e possibili applicazioni in campo reale.

Gli obiettivi fissati all'inizio di questa tesi riguardavano l'implementazione di un modello in grado di stimare la distribuzione dei flussi di traffico in tempo reale sulla rete infrastrutturale e di fornire una previsione nel breve periodo dei flussi futuri a partire dalle caratteristiche di domanda e offerta di un sistema di trasporto autostradale.

Il contesto territoriale nel quale questo modello è stato sviluppato è l'autostrada A21 Torino – Brescia, ed in particolare l'attenzione è stata rivolta al tratto Torino – Piacenza di competenza della società di gestione SATAP SpA. I dati di traffico che sono stati utilizzati per la formulazione del modello riguardano le informazioni registrate per ciascun veicolo al momento dell'ingresso sull'autostrada e della sua successiva uscita. Queste informazioni provengono dal sistema di esazione del pedaggio, presente sull'intera autostrada, che registra l'istante e la stazione di ingresso e la classe veicolare e al momento dell'uscita registra l'istante e la stazione.

Le parti che costituiscono il modello implementato sono:

- dati di ingresso: descrizione dell'offerta di trasporto e della domanda di trasporto;
- sistema di assegnazione dinamica del traffico DTA;
- dati di uscita:
 - Tempi e velocità medie di percorrenza della rete;
 - Visualizzazione delle condizioni di traffico previste per l'orizzonte temporale futuro di simulazione.

L'offerta di trasporto e' rappresentata all'interno del modello sviluppato da una sequenza di archi connessi agli estremi da nodi che rappresentano nel trasporto autostradale le stazioni di accesso e uscita. Oltre alle caratteristiche geometriche della rete infrastrutturale, sono descritte nel modello anche le caratteristiche funzionali. Tali caratteristiche, che riguardano il servizio offerto, sono state rappresentate attraverso il modello di deflusso di Drake et al. costituito dalle funzioni di deflusso che relazionano le caratteristiche della circolazione dei veicoli quali flusso, densità e velocità.

La scelta di questo modello è stata dettata dal buon adattamento della curva a tutti i valori di densità di traffico ed inoltre dal basso numero di parametri necessari per la sua determinazione. L'equazione del deflusso si basa sulla determinazione di due parametri: la

velocità di flusso libero VFL e la capacità massima dell'infrastruttura. Questi parametri sono stati ottenuti attraverso il procedimento della calibrazione sulla base di dati reali storici relativi al traffico sull'autostrada.

Per quanto riguarda la domanda di trasporto all'interno del modello è stato sviluppato un sottomodello in grado di determinare i flussi futuri in ingresso sull'autostrada all'interno dell'orizzonte di previsione. Tale sottomodello è stato sviluppato utilizzando alcune funzioni proprie dell'analisi statistica. I dati di ingresso utilizzati sono stati costituiti da:

- informazioni storiche sulla domanda di trasporto tra le coppie OD (Origine-Destinazione) raccolte attraverso il sistema di riscossione del pedaggio;
- informazioni in tempo reale sui flussi di traffico in ingresso rilevati alle stazioni lungo la rete.

Il funzionamento del sottomodello si compone di tre fasi successive:

- fase I. analisi di clusterizzazione: attraverso il processo di cluster analysis, eseguito sui dati storici relativi agli ingressi sull'autostrada, sono stati determinati quattro cluster, ossia quattro tipologie differenti di giornate tipo aventi ciascuno un proprio andamento dei flussi di ingresso;
- fase II. identificazione: attraverso l'analisi della dissimilarità tra l'andamento dei flussi nei cluster individuati e l'andamento reale nel giorno attuale, il modello sviluppato è in grado di determinare quale tra le giornate tipo al momento attuale risulta più simile alla giornata attuale;
- fase III. previsione dei flussi: identificato il giorno tipo più simile alla giornata attuale, utilizzando l'andamento dei flussi di ingresso del cluster è stato possibile simulare l'andamento dei flussi durante l'intervallo previsionale del modello.

Per verificare la bontà di tale sottomodello sono state eseguite alcune simulazioni dell'applicazione on-line. I risultati ottenuti hanno mostrato che:

- il processo di identificazione del cluster più simile al giorno attuale risulta instabile nelle prime ore della giornata, ossia nelle ore notturne in cui effettivamente tra i diversi giorni non sono apprezzabili significative differenze, e stabile successivamente;
- l'errore commesso nella stima dei flussi appare accettabile, non si sono registrate nelle simulazioni significative differenze tra i flussi stimati e quelli reali in ingresso dalle differenti stazioni.

Oltre al sottomodello, la descrizione della domanda di mobilità è stata completata con la definizione delle matrici OD. Esse sono state definite per ciascuna ora della giornata differenziata per le due classi veicolari: veicoli leggeri e pesanti. Sono state determinate sulla base dei dati storici di traffico mantenendo la loro divisione secondo quanto ottenuto dall'analisi di clusterizzazione. Quest'ultima suddivisione permette al modello una volta individuato il cluster più simile al giorno attuale, di stimare i flussi futuri e di ripartirli secondo le matrici OD relative a quel cluster.

Per quanto riguarda il processo di assegnazione compiuto dal modello, si tratta di un'assegnazione dinamica. Il modello che è stato sviluppato rientra nella classe dei modelli

mesoscopici che prevedono la definizione di un'unità base quale i "pacchetti di veicoli" aventi caratteristiche identificative quali: l'intensità, l'istante di ingresso sull'infrastruttura e la loro destinazione. L'ipotesi fondamentale alla base del funzionamento del modello consiste nel fatto che i pacchetti che si muovono contemporaneamente sulla rete sperimentano le medesime condizioni di viaggio. Tali condizioni sono espresse in funzione del valore della densità dalla quale, attraverso la curva densità-velocità di Drake et al., si ricava il valore della velocità di spostamento dei pacchetti. L'assegnazione compiuta dal modello è un'assegnazione dinamica, perciò durante l'orizzonte temporale di previsione vengono eseguite diverse assegnazioni con passo di simulazione $\Delta\tau$ durante le quali vengono caricati sulla rete nuovi pacchetti e vengono spostati i pacchetti che già sono presenti secondo le condizioni di densità. Questo modo di procedere permette di visualizzare l'evoluzione delle condizioni di circolazione sulla rete durante l'orizzonte temporale.

I dati di uscita del modello sono, in accordo con gli obiettivi fissati:

- stima della densità per ciascun tratto della rete, e visualizzazione delle condizioni di traffico secondo i Livelli di Servizio.
- stima dei tempi di percorrenza della rete e della velocità media.

Come dati di uscita del modello sono stati scelti i valori dei tempi e delle velocità di percorrenza della rete, perché di tali grandezze potevano essere determinati i valori reali incrociando le informazioni storiche relative agli ingressi e alle uscite dei veicoli relative al giorno utilizzato per la simulazione. Il confronto tra le informazioni reali e quelle stimate hanno permesso di verificare la bontà del modello sviluppato. Seppur il modello sia ancora nella sua prima fase di sviluppo, il processo di validazione svolto ne ha mostrato la bontà. La differenza registrata, durante la simulazione eseguita, tra le velocità reali e le velocità stimate dal modello risulta pari a circa 4 km/h nel caso che presenta il maggiore errore. Allo stesso modo l'errore compiuto nella stima dei tempi di percorrenza sulla rete risulta pari a circa 2 minuti considerando sempre il caso peggiore verificatosi. Si può affermare dai risultati ottenuti che, sia l'errore della stima delle velocità che dei tempi di percorrenza risulta inferiore al 5%. Che significa commettere un errore di circa 3 minuti su un tempo di viaggio pari a 1 ora.

Si ritiene necessario riaffermare che il campione dei dati utilizzato per lo sviluppo del modello e per la sua calibrazione e validazione è risultato sufficiente, ma il suo ampliamento potrebbe sicuramente accreditare maggiormente la bontà del modello affermata in questo lavoro di tesi.

Sicuramente il lavoro svolto non può considerarsi esaustivo per quanto riguarda l'implementazione del modello, che potrebbe essere ulteriormente sviluppato e validato grazie ad un campione di dati storici più ampio. Va comunque ricordata l'importanza strategica di sviluppare modelli di questo genere nel campo delle infrastrutture di trasporto stradali, in quanto come si sosteneva nell'introduzione alla tesi, la ricerca sta volgendo lo sguardo verso lo sviluppo di sistemi che permettano un utilizzo ottimizzato delle infrastrutture esistenti sul territorio. In modo particolare il modello implementato in questa sede permetterebbe grazie agli obiettivi raggiunti di:

- ! fornire all'utenza l'indicazione di tempi di viaggio stimati non sulle condizioni attuali di traffico, ma a partire dalle condizioni attuali e in funzione delle condizioni future che i viaggiatori incontreranno durante la percorrenza della rete. Tale informazione seppur

frutto di una stima delle condizioni future, può risultare affidabile nel momento in cui il modello risulta correttamente calibrato e validato, e si conoscono le percentuali di errore da esso compiute.

- ! attivare sistemi di gestione del traffico, come ad esempio la regolazione della velocità, l'istituzione della terza corsia dinamica o il controllo/regolazione degli accessi, a partire dall'indicazione fornita dal modello sui futuri valori relativi ai livelli di servizio in cui si troveranno a viaggiare gli utenti nei diversi tratti della rete. Il modello infatti permette di visualizzare attraverso la rappresentazione grafica il valore assunto dalla densità lungo la rete e del conseguente livello di servizio determinato utilizzando quanto indicato nel manuale HCM.

Un'ulteriore applicazione che si potrebbe sviluppare, adattando opportunamente la formulazione del modello proposta in questo lavoro, sarebbe l'integrazione con un sistema di rilevazione degli eventi localizzato lungo l'autostrada. Il rilievo di un incidente potrebbe infatti permettere di modificare nel modello la capacità di deflusso dell'infrastruttura nel punto di accadimento e quindi di prevedere la formazione di eventuali code e la loro propagazione. Il gestore potrebbe quindi sviluppare dei piani di intervento, utilizzando anche in modo opportuno i sistemi citati precedentemente, al fine di ridurre la congestione sulla rete.

Il lavoro svolto in questa tesi potrebbe perciò rivelarsi un buon punto da cui partire per sviluppare per l'infrastruttura un sistema ITS che ne permetta un utilizzo ottimizzato e consapevole, riducendone anche le esternalità che costituiscono un costo per l'intera collettività.

8. Bibliografia

- AA.VV. (2004). Infomobilità: Si può viaggiare rimanendo sempre informati. *Media Duemila*, numero 220, 59-88.
- AA.VV. (2010). Il traffico del futuro. *Le Strade*, , 150-156.
- AESYS Spa ITALIA. Retrieved 01/08, 2010, from: http://www.aesys.it/prodotti/traffico/pannelli_a_messaggio_variabile.html
- AISCAT Associazione Italiana Società Concessionarie Autostrade e Trafori. Retrieved 01/08, 2010, from www.aiscat.it
- Alecsandru, C. D. (2006). A stochastic mesoscopic cell-transmission model for operational analysis of large-scale transportation networks.
- Al-Kaisy, A. F., Hall, F. L., & Reisman, E. S. (2002). Developing passenger car equivalents for heavy vehicles on freeways during queue discharge flow. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 36(8), 725-742. doi:DOI: 10.1016/S0965-8564(01)00032-5
- Arditi, R., & Sirchi, F. (2008). L'attuale cooperazione europea su ITS EasyWay. *Le Strade*, , 66-70.
- Autostrade per l'Italia. (2007). *GRONDA DI PONENTE, RIQUALIFICAZIONE A10 E POTENZIAMENTO A7 E A12 Analisi delle soluzioni alternative per l'attraversamento della Val Polcevera*
- Avineri, E., & Prashker, J. N. (2006). The impact of travel time information on travelers' learning under uncertainty. *Transportation*, 33(4), 393-408.
- Boel, R., & Mihaylova, L. (2006). A compositional stochastic model for real time freeway traffic simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40(4), 319-334.
- Boyles, S., Ukkusuri, S. V., Waller, S. T., & Kockelman, K. M. (2005). A comparison of static and dynamic traffic assignment under tolls: A study of the dallas-fort worth network.
- Camus, R., & Longo, G. Monitoraggio e controllo in tempo reale di un sistema autostradale: Approccio sperimentale. *Metodi e Tecnologie Dell'Ingegneria Dei Trasporti*,

- Casati, M. (2010). Un trasporto migliore per una vita migliore. *intervista a luciana iorio, ministero delle infrastrutture e trasporti. Le Strade*, , 52-54.
- Cascetta, E. (2006). *Modelli per i sistemi di trasporto: teoria e applicazioni*. Torino: UTET università.
- Chang, Y. (2009). Dynamic OD matrix estimation model of freeway with consideration of travel time. *Tongji Daxue Xuebao/Journal of Tongji University*, 37(9), 1185-1190.
- Chirico P., Di Gangi M. (2000). Modelli di previsione a breve termine de flussi di traffico. *Metodi e Tecnologie Dell'Ingegneria Dei Trasporti*,
- Chung, K., Rudjanakanoknad, J., & Cassidy, M. J. (2007). Relation between traffic density and capacity drop at three freeway bottlenecks. *Transportation Research, Part B* 41 (2007), 82–95.
- Daganzo, C. F. (1997). A simple traffic analysis procedure.
- Daganzo, C. F. (1999). A behavioral theory of multi-lane traffic flow.
- De Luca, M. (2003). Velocità attuate dai guidatori in ambito autostradale. indagine sperimentale condotta su un tronco di autostrada A3. Padova.
- Festa, D. C., Longo, G., Mazzulla, G., & Musolino, G. (2000). Analisi sperimentale comparativa di differenti modelli per la simulazione di deflusso autostradale. *Metodi e tecnologie dell'ingegneria dei trasporti*,
- Florian, M., Mahut, M., & Tremblay, N. (2001). A hybrid optimization-mesoscopic simulation dynamic traffic assignment model. *2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Proceedings, August 25, 2001 - August 29*, 118-121.
- Holguín-Veras, J., & Cetin, M. (2009). Optimal tolls for multi-class traffic: Analytical formulations and policy implications. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43(4), 445-467. doi:DOI: 10.1016/j.tra.2008.11.012
- Retrieved marzo, 2010, from: <http://www.r-project.org/>.
- Hu, S., & Chen, C. (2004). Dynamic estimation of freeway origin-destination demand and travel time using extended kalman filtering algorithm. *Conference Proceeding - 2004 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, March 21, 2004 - March 23*, 2 1329-1334.
- Jiang, Z., & Huang, Y. (2009). Parametric calibration of speed-density relationships in mesoscopic traffic simulator with data mining. *Information Sciences*, 179(12), 2002-2013.
- Jiang, Z., Zhao, M., & Huang, Y. (2008). A novel algorithm for parametric calibration of speed-density relationships in mesoscopic traffic simulator. *7th World Congress on Intelligent Control and Automation, WCICA'08, June 25, 2008 - June 27*, 7060-7063.

Lavecchia, C., Pilati, S., Angelino, E., & Fossati, G. (2007). *Analisi dei dati di traffico esistenti per la definizione dei profili temporali metodologia ed esempio di applicazione*. Roma: ARPA - Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Lombardia.

Leonardi, S., & Pappalardo, G. (2003). *Analisi delle prestazioni di sicurezza delle mini-rotatorie*. Università degli studi di Catania: Dipartimento di ingegneria Civile e Ambientale.

Li, K., & Ioannou, P. (2004). Modeling of traffic flow of automated vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 5(2), 99-113.

Li, R., Rose, G., & Sarvi, M. (2006). Evaluation of speed-based travel time estimation models. *Journal of Transportation Engineering*, 132(7), 540-547.

Li, R., & Li, W. (2005). The application of genetic algorithm to dynamic traffic assignment. *2005 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, June 6, 2005 - June 8, 2005* 827-832.

Lin, P., & Chang, G. (2004). Robust estimation of the dynamic origin-destination matrix for a freeway network. *Conference Proceeding - 2004 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, March 21, 2004 - March 23, 2004*, 2 862-867.

Lin, P., & Chang, G. (2004). Robust estimation of the dynamic origin-destination matrix for a freeway network. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, , 862-867.

Lin, P., & Chang, G. (2007). A generalized model and solution algorithm for estimation of the dynamic freeway origin-destination matrix. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(5), 554-572.

Lodola, M., Studer, L., & Scarinci, R. ITS in ambito stradale: Analisi critica degli impatti a livello internazionale. (Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale,

Maja, R. (2008). *Pianificazione e simulazione dei sistemi di trasporto*. Politecnico di Milano: Laboratorio Mobilità e Trasporti - Dipartimento IN.D.A.CO.

Maja, R. (2008). *Sistemi e servizi di trasporto*. Politecnico di Milano: Laboratorio Mobilità e Trasporti - Dipartimento IN.D.A.CO.

Maroto, J., Delso, E., Felez, J., & Cabanellas, J. M. (2006). Real-time traffic simulation with a microscopic model. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 7(4), 513-526.

Marturano, P., Messina, C., Iorio L., (ministero delle infrastrutture e dei Trasporti) Maja, R., Studer, L., Ponti, M., Marchionni, G., Veronesi, E., & (Politecnico di Milano). (2005). Valutazione dei progetti ITS. I progetti euroregionali SERTI e CORVETTE. *Le Strade*, , 48-55.

Nuovo codice della strada, Decreto legislativo (1992).

Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade, Decreto Ministeriale del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti. (2001).

- Muñoz, L., Sun, X., Horowitz, R., & Alvarez, L. (2003). Traffic density estimation with the cell transmission model. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, , 3750-3755.
- Nam, D. H., & Drew, D. R. (1999). Automatic measurement of traffic variables for intelligent transportation systems applications. *Transportation Research Part B: Methodological*, 33(6), 437-457.
- Newell, G. F. (1993). Simplified theory of kinematic waves in highway traffic part I. general theory. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 27(4), 281-281.
- Newell, G. F. (1993). Simplified theory of kinematic waves in highway traffic, part II. queueing at freeway bottlenecks. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 27(4), 289-289.
- Newell, G. F. (1993). Simplified theory of kinematic waves in highway traffic, part III. multi-destination flows. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 27(4), 305-305.
- Nicosia, F. (2000).
Influenza dei mezzi pesanti nelle condizioni di sicurezza del deflusso veicolare.
- Nicosia, F., & Leonardi, S. *Proposta di una metodologia di classificazione delle infrastrutture stadali in base all'efficienza*. Proposta di una metodologia di classificazione delle infrastrutture stadali in base all'efficienza:
- Park, D., Rilett, L. R., Gajewski, B. J., Spiegelman, C. H., & Choi, C. (2009). Identifying optimal data aggregation interval sizes for link and corridor travel time estimation and forecasting. *Transportation*, 36(1), 77-95.
- Park, D., You, S., Rho, J., Cho, H., & Lee, K. (2009). Investigating optimal aggregation interval sizes of loop detector data for freeway travel-time estimation and prediction. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36(4), 580-591.
- Raffaele, M. (2005). *Studio dell'evoluzione del traffico in vista dell'attivazione della corsia dinamica*
- Ricci, V. (2004). *R: Un ambiente opensource per l'analisi statistica dei dati*
- Richard A, J., & Dean W, W. (2007). *Applied multivariate statistical analysis* (6. ed ed.) Pearson Prentice Hall.
- Sadek, A. W., Smith, B. L., & Demetsky, M. J. Dynamic traffic assignment. *Transportation Research*, , 95-103.
- Sala, G., Podestà, C., & Maja, R. (1999). Analisi sperimentale di modelli di deflusso per reti urbane ed extraurbane.
- Sarvi, M., & Kuwahara, M. (2007). Microsimulation of freeway ramp merging processes under congested traffic conditions. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8(3), 470-479.

- Sarvi, M., & Kuwahara, M. (2008). Using ITS to improve the capacity of freeway merging sections by transferring freight vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 9(4), 580-588.
- Satap S.p.A. Retrieved 12/19, 2009, from www.satapweb.it
- SATAP SpA. (2009). *CARTA DEI SERVIZI Tronco A4 Torino-Milano Tronco A21 Torino-Piacenza*
- Simin, C., & Loong, N. K. (2004/2005). *A critical analysis of "the cell trasmission model: A dynamic representation of highway traffic consistebt with the hydrodynamic theory"*
- Smith, B. L., Qin, L., & Venkatanarayana, R. (2003). Characterization of freeway capacity reduction resulting from traffic accidents. *Journal of Transportation Engineering*, 129(4), 362-368.
- Stanley, J. (2009). Passenger car equivalents of trucks under lane restriction and differential speed limit policies on four lane freeways. (degree of Master of Science in Civil Engineering,
- Studer, L., Marchionni, G., Ponti, M., & Romanò, D. (2007). Strumenti di previsione e di gestione dinamica del traffico sull'autostrada A21 torino-alessandria-piacenza.
- Thenoux, G., & Lastra, S. (2005). Producing a Free-Flow model for the first chilean freeway using *highway capacity manual 2000*. *Journal of Transportation Engineering*, , 961-962.
- Vanajakshi, L. D., Williams, B. M., & Rilett, L. R. (2009). Improved flow-based travel time estimation method from point detector data for freeways. *Journal of Transportation Engineering*, 135(1), 26-36.
- Vorraa, T., & Brignone, A. (2008). Modelling traffic in detail with mesoscopic models: Opening powerful new possibilities for traffic analyses. *14th International Conference on Urban Transport and the Environment in the 21st Century, Urban Transport 2008, September 1, 2008 - September 3, , 101 659-666*.
- Wang, Y., Papageorgiou, M., & Messmer, A. (2006). A real-time freeway network traffic surveillance tool. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 14(1), 18-32.
- Wang, Y., Papageorgiou, M., & Messmer, A. (2006). RENAISSANCE - A unified macroscopic model-based approach to real-time freeway network traffic surveillance. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 14(3), 190-212.
- Wang, Y., Papageorgiou, M., Messmer, A., Coppola, P., Tzimitsi, A., & Nuzzolo, A. (2009). An adaptive freeway traffic state estimator. *Automatica*, 45(1), 10-24.
- Wanga, Y., Papageorgiou, M., & Messmer, A. (2008). Real-time freeway traffic state estimation based on extended kalman filter: Adaptive capabilities and real data testing. *Transportation Research, Part A 42 (2008) 1340-1358*, 1340-1358.

Webster, N., & Elefteriadou, L. (1998). A simulation study of truck passenger car equivalents (PCE) on basic freeway sections. *Transportation Research, Part B* 33 (1999), 323-323-336.

Wen, Y. (2008). Scalability of dynamic traffic assignment. (Doctor of Philosophy in Civil and Environmental Engineering Systems,

Wen, Y. (2008). Scalability of dynamic traffic assignment. (Doctor of Philosophy in Civil and Environmental Engineering Systems,

Wong, G. C. K., & Wong, S. C. (2001). A multi-class traffic flow model – an extension of LWR model with heterogeneous drivers. *Transportation Research, Part A* 36 (2002), 827-827–841.

Yeon, J., Elefteriadou, L., & Lawphongpanich, S. (2008). Travel time estimation on a freeway using discrete time markov chains. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(4), 325-338.

Zhang, H. M. (2003). On the consistency of a class of traffic flow models. *Transportation Research, Part B* 37 (2003), 101-101–105.