



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

GESTIÓN DE TRÁFICO EN TORNO A AUTOPISTAS URBANAS: CASO DE ESTUDIO EN RAMPA DE SALIDA

GERMÁN ENRIQUE GÜNTHER HUERTA

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
JUAN ENRIQUE COEYMANS A.

Santiago de Chile, Agosto, 2009

© 2009, Germán Enrique Günther Huerta



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

GESTIÓN DE TRÁFICO EN TORNO A AUTOPISTAS URBANAS: CASO DE ESTUDIO EN RAMPA DE SALIDA

GERMÁN ENRIQUE GÜNTHER HUERTA

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

JUAN ENRIQUE COEYMANS A.

JUAN CARLOS MUÑOZ A.

RODRIGO FERNÁNDEZ A.

RICARDO SAN MARTÍN G.

Para completar las exigencias del grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Agosto, 2009

A mi familia y amigos

AGRADECIMIENTOS

Quisiera comenzar agradeciendo la gran ayuda de mis profesores. En primer lugar, a mi profesor guía, Juan Enrique Coeymans, por haber aceptado trabajar conmigo, por todo su apoyo y sus enseñanzas que tanto me ayudaron en mi formación como ingeniero y como persona. También quisiera agradecer el apoyo de Juan Carlos Muñoz, quien colaboró desde un principio en el desarrollo de la Tesis y fue de gran ayuda, siempre aportado con ideas de cómo enfrentar el trabajo. Por último, un agradecimiento a Rodrigo Fernández y Ricardo San Martín por integrar la comisión, y una mención especial a Juan Carlos Herrera, por sus comentarios en la fase final de la investigación.

Además quisiera agradecer la ayuda de Felipe Sandoval, quien realizó la fase previa a esta investigación y colaboró con la entrega de los datos recolectados en su investigación.

Igualmente quisiera agradecer a quienes colaboraron en las mediciones en terreno para este trabajo. Especialmente a la concesionaria de la Autopista Central por su ayuda desde que se les planteó la idea, por su ayuda durante su implementación en terreno y por los datos entregados. También a la Seremi Metropolitana de Transporte y a la Dirección de Tránsito de la Municipalidad de Santiago, quienes dieron su autorización; y a Carabineros de Chile y la Unidad Operativa de Control de Tránsito, por su colaboración en terreno.

De igual forma quisiera agradecer Felipe, Tomás y mi hermano Javier, quienes me ayudaron a realizar las mediciones y a mi hermano Tomás, que me ayudó a procesar los conteos. También al Laboratorio de Ingeniería de Tránsito de DICTUC, y a mis tíos Sergio y Eduardo, por facilitarme los equipos de grabación para las mediciones en terreno.

Asimismo quisiera agradecer a todo el grupo de trabajo del Departamento de Ingeniería de Transporte, a las secretarías, profesores y trabajadores de DICTUC, y especialmente a mis compañeros de Postgrado por el agradable ambiente de trabajo y el gran grupo que se formó, que sin duda fue una gran ayuda para realizar este trabajo.

Finalmente, quisiera agradecer a mi padre y a mi madre, por todo su apoyo durante tantos años de estudio.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Aspectos Generales	1
1.2 Objetivos de la Tesis	2
1.2.1 Objetivos Generales.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Alcances	3
1.4 Contenido	4
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Preliminares.....	5
2.2 Herramientas de análisis	6
2.2.1 Curvas acumulativas de vehículos.....	6
2.2.2 Coordenadas oblicuas	9
2.2.3 Modelo de microsimulación de tráfico AIMSUN	15
2.2.4 Modelos de comportamiento de AIMSUN.....	16
2.2.5 Calibración de AIMSUN en Chile.....	20
2.3 Comportamiento del tráfico en torno a rampas de salida de autopistas	22
2.3.1 Características de cuellos de botella en torno a rampas de salida	22
2.3.2 Análisis gráfico de la evolución de colas en rampas de salida	24
2.3.3 Estudios prácticos de cuellos de botella en torno a rampas de salida.....	28
2.3.4 <i>Ramp metering</i> y rampas de salida	37
2.3.5 Medidas de mitigación para congestión en rampas de salida	44
2.4 Experiencias previas en Chile	48

2.5	Análisis y discusión de estudios.....	53
3.	ANÁLISIS PREVIO DEL LUGAR DE ESTUDIO.....	56
3.1	Preliminares.....	56
3.2	Descripción del sitio de estudio	56
3.2.1	Ubicación de la rampa de salida	56
3.2.2	Vialidad en torno a la rampa de salida.....	58
3.3	Análisis de la evolución de la cola desde la rampa de salida.....	60
3.4	Análisis del tráfico en torno a la rampa de salida	66
3.4.1	Observaciones en terreno.....	66
3.4.2	Conteos de tráfico	68
3.4.3	Factores que influyen en formación de cola	71
3.5	Otros aspectos de la vialidad en torno a la rampa de salida.....	75
4.	DISEÑO DEL EXPERIMENTO.....	76
4.1	Preliminares.....	76
4.2	Diseño de alternativas	76
4.3	Simulación en AIMSUN	77
4.3.1	Codificación de la red.....	77
4.3.2	Calibración de la red.....	78
4.3.3	Simulación de medidas de mitigación	79
4.4	Selección de mejor alternativa	79
4.5	Implementación de mejor alternativa en terreno.....	80
4.5.1	Replicación de mediciones anteriores implementando medidas	80
4.5.2	Gráficos en coordenadas oblicuas a partir de videos.....	82
4.5.3	Datos de espiras y pórticos.	82
5.	PROCESAMIENTO DE DATOS Y RESULTADOS	83
5.1	Preliminares.....	83
5.2	Simulación en AIMSUN	83
5.2.1	Codificación de la red de modelación	83
5.2.2	Proceso de calibración de AIMSUN.....	84
5.2.3	Simulación de medidas de mitigación en AIMSUN.....	85
5.2.4	Selección de la mejor medida	99
5.3	Mediciones en terreno	102
5.3.1	Resultados primer día de medición.....	104

5.3.2	Resultados segundo día de medición	108
5.3.3	Resultados tercer día de medición	112
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	117
6.1	Preliminares.....	117
6.2	Diferencias entre simulación e implementación en terreno	117
6.3	Replicación de implementación en terreno en AIMSUN	120
6.4	Proposición de medidas basadas en resultados en terreno	124
6.4.1	Autorizar viraje de vehículos desviados con luz roja	124
6.4.2	Esquema de control dinámico de flujos para rampas de salida	126
6.5	Análisis de sensibilidad para esquema de control dinámico de flujos	128
6.6	Costo social para esquema de control dinámico de flujos	129
6.7	Factibilidad de implementación de esquema de forma permanente	130
6.8	Metodología para implementación en otras rampas de salida	131
7.	CONCLUSIONES.....	133
7.1	Principales Conclusiones	133
7.2	Recomendaciones para Futuras Investigaciones.....	136
	BIBLIOGRAFÍA	137
	A N E X O S	141
ANEXO A:	CONTEOS DE TRÁFICO	142
ANEXO B:	DATOS INGRESADOS EN AIMSUN.....	147
ANEXO C:	LÍNEAS DE TRANSPORTE PÚBLICO EN AIMSUN.....	152
ANEXO D:	PROCESO DE CALIBRACIÓN AIMSUN.....	156
ANEXO E:	MATRICES ESTIMADAS EN AIMSUN	159

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2-1: Parámetros de AIMSUN calibrados para flujo interrumpido en Chile	20
Tabla 2-2: Parámetros de AIMSUN calibrados para flujo ininterrumpido en Chile	21
Tabla 2-3: Parámetros de AIMSUN calibrados para transporte público en Chile	21
Tabla 3-1: Flujos medidos en rampa de salida e intersección M. Rodríguez/10 de Julio....	68
Tabla 3-2: Flujos medidos en intersección Manuel Rodríguez/Santa Isabel	69
Tabla 3-3: Flujos medidos en intersección Santa Isabel/Dieciocho.....	69
Tabla 3-4: Flujos medidos en intersección Dieciocho/10 de Julio	69
Tabla 5-1: Ajuste de parámetros en AIMSUN.....	84
Tabla 5-2: Estadísticas aumento de largo rampa de salida	87
Tabla 5-3: Estadísticas aumento a 2 pistas de rampa de salida.....	88
Tabla 5-4: Estadísticas Optimización Semáforo	89
Tabla 5-5: Estadísticas Optimización Semáforo	90
Tabla 5-6: Estadísticas Pista Adicional de Viraje	92
Tabla 5-7: Estadísticas Ceda el Paso.....	93
Tabla 5-8: Estadísticas Disco Pare.....	93
Tabla 5-9: Estadísticas Cierre 10 de Julio.....	95
Tabla 5-10: Estadísticas Cierre Caletera	96
Tabla 5-11: Estadísticas Cierre de 10 de Julio y caletera.....	98
Tabla 5-12: Estadísticas Cierre de 10 de Julio y caletera, Optimización Final.....	98
Tabla 5-13: Alternativas simuladas.....	100
Tabla 5-14: Costos sociales de alternativas simuladas	100
Tabla 6-1: Estadísticas simulación final, desvío completo	122
Tabla 6-2: Estadísticas simulación final, desvío hasta 8:30.....	123
Tabla 6-3: Estadísticas simulación final, desvío hasta 7:50.....	124
Tabla 6-4: Estadísticas simulación final, viraje con luz roja	125
Tabla 6-5: Estadísticas simulación control dinámico de flujos.....	127
Tabla 6-6: Estadísticas análisis de sensibilidad simulación control dinámico de flujos....	128
Tabla 6-7: Alternativas finales simuladas	129
Tabla 6-8: Costos sociales de esquemas finales.....	129
Tabla A-1: Conteos en rampa de salida e intersección Manuel Rodríguez/10 de Julio....	143
Tabla A-2: Conteos en intersección Manuel Rodríguez/Santa Isabel.....	144
Tabla A-3: Conteos en intersección Santa Isabel/Dieciocho	145
Tabla A-4: Conteos en intersección 10 de Julio/Dieciocho	146
Tabla B-1: Flujos y porcentajes de viraje ingresados en AIMSUN.....	149
Tabla B-2: Flujos y porcentajes de viraje corregidos en AIMSUN	150
Tabla B-3: Diferencia porcentual entre datos ingresados y corregidos en AIMSUN.....	151
Tabla C-1: Líneas de transporte público y frecuencias.....	152
Tabla D-1: Descripción de puntos y criterios de calibración.....	156
Tabla D-2: Diferencias porcentuales o absolutas antes de calibración	158
Tabla D-3: Diferencias porcentuales o absolutas después de calibración.....	158
Tabla E-1: Matriz estimada, período 7:00 – 7:15	159
Tabla E-2: Matriz estimada, período 7:15 – 7:30	159

Tabla E-3: Matriz estimada, período 7:30 – 7:45	159
Tabla E-4: Matriz estimada, período 7:45 – 8:00	160
Tabla E-5: Matriz estimada, período 8:00 – 8:15	160
Tabla E-6: Matriz estimada, período 8:15 – 8:30	160
Tabla E-7: Matriz estimada, período 8:30 – 8:45	161
Tabla E-8: Matriz estimada, período 8:45 – 9:00	161

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2-1: Curva de número acumulado de vehículos	6
Figura 2-2: Diagrama de entrada y salida entre dos detectores	7
Figura 2-3: Propagación de una onda de choque hacia aguas abajo	8
Figura 2-4: Propagación de una onda de choque hacia aguas arriba	9
Figura 2-5: Ejemplo de curvas acumuladas de vehículos en: (a) coordenadas ortogonales y (b) coordenadas oblicuas.....	11
Figura 2-6: Curvas acumuladas de vehículos en autopista I-880 en: (a) coordenadas ortogonales y (b) coordenadas oblicuas	13
Figura 2-7: Ejemplo de diferencia vertical entre curvas acumuladas	14
Figura 2-8: Zonas en modelo de cambio de pistas AIMSUN	18
Figura 2-9: Evolución de una cola en una rampa de salida	23
Figura 2-10: Diagrama de una rampa de salida de autopista	25
Figura 2-11: Curvas acumulativas de llegadas y salidas.....	27
Figura 2-12: Representación de autopista I-880 norte: (a) geometría del tramo (no a escala) y (b) mapa de la zona aledaña al tramo de estudio	29
Figura 2-13: Hora del día de mínimos en series de tiempo de velocidades	30
Figura 2-14: Velocidades promedio en detectores.....	30
Figura 2-15: Curva acumulada de vehículos en coordenadas oblicuas en autopista I-880..	31
Figura 2-16: Evolución de velocidades por pista en autopista I-880.....	32
Figura 2-17: Esquema de autopista I-5, California	33
Figura 2-18: Número de vehículos y ocupación acumuladas en autopista I-5, día 1: (a) detector MP 17,3 y (b) detector MP 16,6.....	35
Figura 2-19: Número de vehículos y ocupación acumuladas en autopista I-5, día 2: (a) detector MP 17,3 y (b) detector MP 16,6.....	36
Figura 2-20: Rampa de entrada aislada en Autopista 805.....	37
Figura 2-21: Resultados de mediciones en día 1: sin <i>ramp metering</i>	39
Figura 2-22: Resultados de mediciones en día 2: con <i>ramp metering</i>	40
Figura 2-23: Diagrama de sistema de colas con unión de flujos.....	41
Figura 2-24: Diagrama de llegadas para sistema de colas con unión de flujos.....	42
Figura 2-25: Ejemplo de autopista con rampa de salida congestionada	43
Figura 2-26: Estrategia de asignación de pistas según destino	46
Figura 2-27: Estrategia de gestión dinámica de rampas de salida	47
Figura 2-28: Esquema de salida de autopista.....	48
Figura 2-29: Variables que influyen en interacción de flujos	49
Figura 2-30: Ensanche de salida de autopista	51
Figura 2-31: Trébol para eliminar viraje a la izquierda	52
Figura 3-1: Mapa tramo de estudio en Autopista Central.....	57
Figura 3-2: Vialidad adyacente a rampa de salida hacia Santa Isabel	59
Figura 3-3: Velocidad, ocupación y flujo acumulados en espira e-975.....	61
Figura 3-4: Velocidades por pista en espira e-975.....	62
Figura 3-5: Velocidades por pista en espira e-1875.....	63
Figura 3-6: Curvas acumuladas de vehículos entre puntos e-0 y g-700	64

Figura 3-7: Curvas acumuladas de vehículos entre puntos g-700 y g-1200	65
Figura 3-8: Curvas acumuladas de vehículos entre puntos g-1200 y g-2250	66
Figura 3-9: Vista aérea de rampa de salida hacia Santa Isabel	67
Figura 3-10: Vista aérea de intersección entre Manuel Rodríguez y Santa Isabel.....	67
Figura 3-11: Tiempos de verde y desfases de semáforos.....	70
Figura 3-12: Bloqueo de Santa Isabel sobre Manuel Rodríguez.....	72
Figura 3-13: Pista de Viraje de Manuel Rodríguez hacia Santa Isabel.....	72
Figura 3-14: Entrecruzamiento de vehículos luego de rampa de salida.....	73
Figura 3-15: Cola generada en rampa de salida hacia Santa Isabel	74
Figura 3-16: Vista de la calle Dieciocho.....	75
Figura 4-1: Vista desde video en punto de grabación: (a) g-700, (b) g-1200 y (c) g-2250 .	81
Figura 5-1: Comparación de rampa de salida: (a) situación base y (b) aumento de largo...	86
Figura 5-2: Comparación de rampa de salida: (a) situación base y (b) aumento a 2 pistas .	88
Figura 5-3: Comparación de pista de viraje: (a) situación base y (b) pista adicional	91
Figura 5-4: Cierres parciales de calles: (a) 10 de Julio y (b) caletera.....	94
Figura 5-5: Cierre de 10 de Julio y caletera	97
Figura 5-6: Plano de señalización de desvíos	102
Figura 5-7: Cierre de calles: (a) Caletera Manuel Rodríguez y (b) Diez de Julio	103
Figura 5-8: Curvas acumuladas de vehículos entre puntos g-700 y g-1200, Día 1	105
Figura 5-9: Curvas acumuladas de vehículos entre puntos g-1200 y g-2250, Día 1	105
Figura 5-10: Velocidades por pista en espira e-975, Día 1	106
Figura 5-11: Velocidades por pista en espira e-1875, Día 1	107
Figura 5-12: Cambios en programaciones de semáforos	108
Figura 5-13: Curvas acumuladas de vehículos entre puntos g-700 y g-1200, Día 2	109
Figura 5-14: Curvas acumuladas de vehículos entre puntos g-1200 y g-2250, Día 2	110
Figura 5-15: Velocidades por pista en espira e-975, Día 2.....	111
Figura 5-16: Velocidades por pista en espira e-1875, Día 2.....	112
Figura 5-17: Curvas acumuladas de vehículos entre puntos g-700 y g-1200, Día 3	113
Figura 5-18: Velocidades por pista en espira e-975, Día 3.....	114
Figura 5-19: Velocidades por pista en espira e-1875, Día 3.....	115
Figura 5-20: Curvas acumuladas de vehículos entre puntos g-700 y g-1200, Día 3	116
Figura 6-1: Cuello de botella simulado y observado en terreno	118
Figura 6-2: Bloqueo de peatones a vehículos desviados.....	119
Figura 6-3: Arco para simular bloqueo de peatones	121
Figura 6-4: Orientación de flujos para viraje con luz roja	125
Figura B-1: Códigos de arcos y pares O-D en AIMSUN.....	148
Figura C-1: Línea de Transporte Público: 201e.....	153
Figura C-2: Línea de Transporte Público: 302.....	153
Figura C-3: Línea de Transporte Público: H17 Poniente-Oriente	154
Figura C-4: Línea de Transporte Público: H17 Oriente-Poniente	154
Figura C-5: Línea de Transporte Público: D03.....	155
Figura C-6: Línea de Transporte Público: 113 y 115.....	155
Figura D-1: Ubicación de puntos de calibración.....	157

RESUMEN

En la presente Tesis se investiga el comportamiento del tráfico en torno a rampas de salida de autopistas urbanas. Su objetivo principal es estudiar las interacciones de tráfico en torno a rampas de salida, el impacto que tienen sobre el funcionamiento de estas autopistas y proponer medidas de mitigación para las colas generadas en cuellos de botella de este tipo. Basados en los resultados de una investigación que estudió la propagación de una cola de este tipo y observaciones en terreno de determinó preliminarmente que el entrecruzamiento e interacción de vehículos entre los que salen de la autopista y los que provienen de las calles laterales adyacentes a la rampa es el principal factor que genera este tipo de cuello de botella. Se proponen diferentes medidas para mitigar esta congestión: aumentar la capacidad de la rampa, aumentar la capacidad de la vía local en la cual desemboca la rampa (típicamente una intersección prioritaria o semaforizada), o bien reducir las interacciones entre el flujo saliente y el flujo local. Se simularon estos diferentes esquemas, siendo el más efectivo el de evitar la sección de entrecruce entre el flujo que sale de la autopista y el proveniente de la vía adyacente. A través del desvío de estos últimos vehículos por una calle paralela se elimina por completo la cola de la autopista. Mediante la optimización de semáforos en la red, dando prioridad a los vehículos desviados, se disminuyen los efectos negativos sobre éstos, aunque no de un modo totalmente satisfactorio. Con la implementación de un esquema del tipo *ramp metering*, en el cual se activan o desactivan los desvíos en función de la cola generada de vehículos desviados, se minimizan de manera casi completa los efectos negativos sobre estos vehículos, sin disminuir mayormente los beneficios sobre la autopista y la rampa de salida.

Palabras Claves: Gestión de autopistas, rampas de salida, cuellos de botella.

ABSTRACT

This Thesis investigates the traffic behavior around urban highways off-ramps. Its main objective is to study the traffic interactions around off-ramps, the impact of these on highways performance and propose mitigation measures for queues caused by this type of bottleneck. Based on the results of a previous investigation which studied the propagation of a queue of this type and field observations it was preliminarily determined that the crossing and interaction between vehicles leaving the highway and the nearby streets traffic around the off-ramp is the main factor that creates this kind of bottleneck. Different measures were proposed to mitigate this congestion: to increase the capacity of the off-ramp, to increase the capacity of the local road where the off-ramp leads into (typically a traffic light or a priority junction), or to reduce the interaction between the outgoing flow and local streets traffic. These different schemes were simulated, being the most effective to avoid the weaving section between the flow exiting the highway and the local streets traffic coming from the adjacent road. Through the diversion of these latter vehicles to a parallel street it was completely eliminated the queue in the highway. Through the optimization of traffic lights on the network, giving priority to diverted vehicles, were diminished the negative effects on them, without being entirely satisfactory though. With the implementation of a ramp metering scheme, which was activated or deactivated depending on the queue of diverted vehicles, were almost completely minimized the negative effects on these vehicles, without reducing the benefits on the highway and the off-ramp.

Keywords: Highway traffic management, off-ramps, bottlenecks.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Aspectos Generales

En el último tiempo se han construido en Santiago de Chile diversas autopistas urbanas, las cuales han tenido frecuentes problemas de operación debido a colas que impiden un tráfico expedito. Las principales fuentes de cuellos de botella en autopistas ocurren en torno a rampas de entrada y de salida. Es necesario entonces explorar medidas de gestión, para lo cual se requiere estudiar detalladamente el tráfico en torno a rampas de entrada y de salida de autopistas y sus interacciones con la red local circundante.

Las rampas de entrada generan conflictos debido a que los vehículos entrantes requieren cambiar pistas rápidamente hacia las pistas expresas. Esto es una fuente importante de cuellos de botella y caídas de capacidad en las autopistas. Una de las medidas de mitigación más utilizadas para evitar estos efectos es la implementación de *ramp metering*, la cual consiste en colocar semáforos en las rampas de entrada a una autopista para controlar el flujo de vehículos que ingresa hacia la autopista.

Por otro lado, las rampas de salida son fuente frecuente de colas que irrumpen hacia la autopista. Este es el caso de algunas rampas de las autopistas recientemente inauguradas en Santiago cuyo diseño es definitivamente pobre. En muchos casos se supone que la existencia de una intersección semaforizada ubicada inmediatamente después de una de sus rampas de salida puede influir en la formación de este tipo de colas.

Existen diversos estudios sobre el comportamiento de tráfico en rampas de entradas y de salida de autopistas urbanas, pero ninguno de ellos en países en desarrollo. La mayoría de estos estudios contempla la implementación de *ramp metering* como medida de mitigación de los cuellos de botella en rampas de entrada de autopistas, pero son pocos los estudios sobre medidas de mitigación para los problemas que se generan por las colas en rampas de salida.

Sandoval y Muñoz (2008), en la primera investigación realizada en Chile sobre autopistas urbanas, hicieron un estudio de propagación de colas en la Autopista Central de Santiago. En el tramo estudiado se encontraron dos cuellos de botella: uno en torno a una rampa de entrada y otro a una rampa de salida. Esta investigación se basará en dicho estudio y se concentrará en medidas de gestión para mitigar la congestión generada en torno a la rampa de salida mencionada anteriormente.

1.2 Objetivos de la Tesis

1.2.1 Objetivos Generales

Dadas las anteriores consideraciones, el objetivo principal de la presente Tesis es estudiar detalladamente las interacciones de tráfico que suceden en torno a rampas de salida y su impacto sobre el funcionamiento de autopistas urbanas. Junto con ello, se estudiarán medidas de gestión para mitigar estos impactos. Este objetivo general se puede descomponer en diversos objetivos específicos, los cuales se detallan a continuación.

1.2.2 Objetivos Específicos

A partir de los objetivos generales definidos en el punto anterior, se desprenden los siguientes objetivos específicos para esta Tesis:

- a) Estudiar detalladamente el comportamiento del tráfico en torno a rampas de salida de autopistas.
- b) Determinar la reducción de capacidad de una autopista generada por las colas en rampas de salida.
- c) Analizar las reducciones de capacidad de la autopista que se producen a nivel agregado y por pista.
- d) Analizar si las colas se propagan más allá de la pista contigua a la pista de salida y si eventualmente se bloquea la autopista.

- e) Analizar las interacciones de tráfico entre los vehículos de la autopista y los de la rampa de salida.
- f) Analizar la influencia de redes semaforizadas ubicadas inmediatamente después de una rampa de salida en las colas que se generan en rampas de salida.
- g) Analizar las interacciones de tráfico entre los vehículos de la rampa de salida y los que circulan por la vialidad adyacente.
- h) Estudiar medidas de mitigación para la congestión provocada en autopistas por cuellos de botella en torno a rampas de salida.
- i) Estudiar en cuánto aumenta la capacidad de descarga de la autopista y de la rampa de salida al aplicar las medidas de mitigación que se propongan.
- j) Estudiar en cuánto afecta a la red aledaña las medidas de mitigación que se apliquen en torno a la rampa de salida.

1.3 Alcances

Los experimentos y mediciones para el presente trabajo se realizarán solamente sobre autopistas en Santiago de Chile, porque en el resto del país las autopistas existentes son solo interurbanas.

Se utilizarán mediciones realizadas con videos, en estudios anteriores y complementarios (Sandoval y Muñoz, 2008). Dada su reproducibilidad, se estima que no hay mayor problema con esta limitación.

Se estudiará detalladamente el comportamiento de tráfico en la rampa de salida que presentaba un cuello de botella en el estudio mencionado anteriormente. No se estudiarán en detalle el comportamiento del tráfico para el cuello de botella encontrado en torno a la rampa de entrada en dicho estudio.

Asimismo, se limitará a concentrarse en las medidas de mitigación en la rampa de salida que presentaba un cuello de botella en dicho estudio y no se estudiarán medidas de mitigación para la rampa de entrada.

Dado que se tomarán los datos y se analizará un punto en particular, se considera la presente investigación como un caso de estudio, cuyos resultados serán particulares para el tramo de estudio y el entorno de la rampa de salida en particular. Aunque pueda que sean reproducibles en otros lugares, se requerirá de un estudio previo del lugar antes de implementar medidas como las que se presenten en este trabajo. A pesar de esto último, se espera que los resultados de este trabajo sirvan de base para otros estudios de casos similares.

1.4 Contenido

Aparte de este capítulo 1 introductorio, donde se plantean los objetivos, alcances y contenidos de la presente investigación, esta Tesis comprende otros seis capítulos.

En el capítulo 2 se presenta una revisión bibliográfica sobre el estado del arte del tema.

Posteriormente, en el capítulo 3 se presenta un análisis previo de los datos disponibles del estudio mencionado anteriormente y en el capítulo 4 se encuentra el diseño de los experimentos a realizar.

En el capítulo 5 se presenta el procesamiento de datos y los resultados obtenidos en la investigación y en el capítulo 6 se presenta un análisis de resultados.

Finalmente, en el capítulo 7 se encuentran las conclusiones más relevantes a partir de los resultados y recomendaciones para futuras investigaciones.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Preliminares

En este capítulo se presenta el estado del arte en el estudio de las interacciones de tráfico en torno a rampas de salida de autopistas.

En primer lugar se hace una descripción de las herramientas de análisis que se utilizarán en este estudio. La primera de ellas es el uso de coordenadas oblicuas, las cuales han sido utilizadas en gran parte de los trabajos que han estudiado cuellos de botella en autopistas y que será de gran ayuda para identificar los impactos de las colas en rampas de salida en la presente investigación. La segunda es el modelo de microsimulación AIMSUN, para el cual se explica en primer lugar los modelos sobre los cuales se basa su funcionamiento y a continuación se detallan estudios en los cuales se calibró el modelo para el comportamiento del tráfico en Chile. Este modelo se utilizará para replicar la operación actual de la autopista y simular medidas de mitigación.

Posteriormente se presenta una revisión de estudios sobre el comportamiento de tráfico en rampas de salida, mostrando en primer lugar trabajos que presentan la teoría sobre el comportamiento del tráfico en salidas de autopistas y luego una descripción de diferentes estudios prácticos con diferentes cuellos de botella que han sido encontrados en éstas.

Luego se describen artículos en los cuales se muestran diferentes medidas de mitigación que han sido aplicadas o se propone aplicar en rampas de salida de autopistas. Algunas de estas medidas son de fácil implementación, mientras que otras requieren de inversiones en infraestructura o del uso de tecnologías avanzadas.

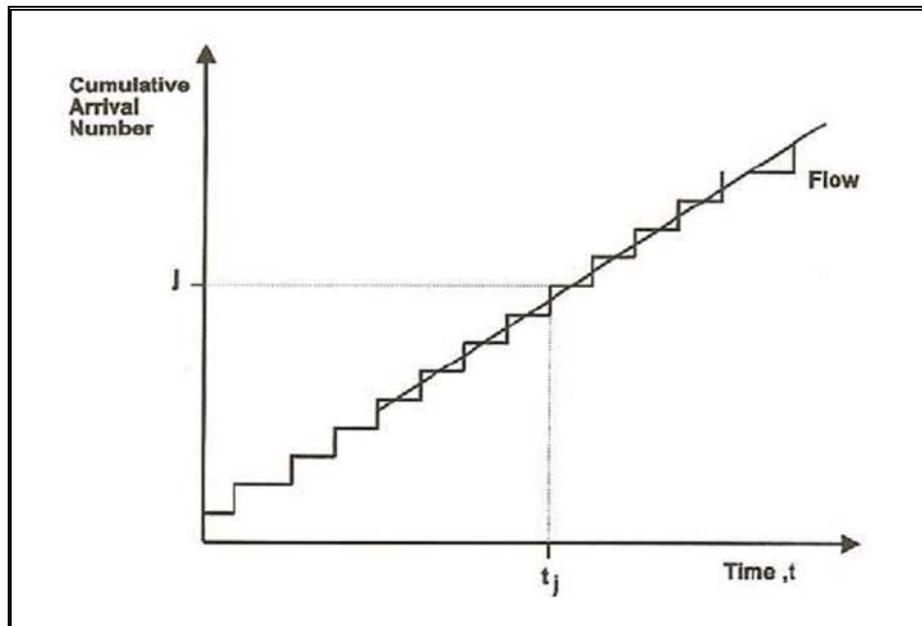
Finalmente se describe un estudio realizado recientemente sobre propagación de colas en la Autopista Central de Santiago de Chile, en el cual se identifica un cuello de botella originado en torno a una rampa de salida. Este estudio servirá de base para las medidas de mitigación que se propongan en la presente investigación.

2.2 Herramientas de análisis

2.2.1 Curvas acumulativas de vehículos

Una de las mejores maneras para representar datos de tráfico ininterrumpido es a través del uso de curvas acumuladas de vehículos, lo cual se encuentra descrito inicialmente en Cassidy y Windover (1995).

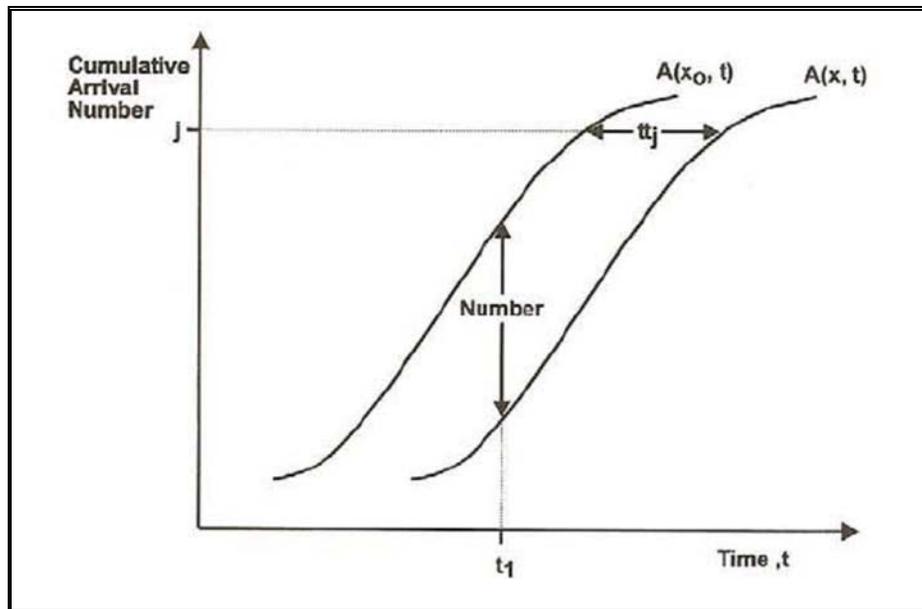
Esta herramienta consiste en graficar el número acumulado de vehículos que ha pasado por un cierto detector de tráfico en el tiempo, tal como se presenta en la Figura 2-1. La pendiente de la curva que se genera corresponde al flujo de vehículos que circula a través del detector.



Fuente: Cassidy y Windover (1995)

Figura 2-1: Curva de número acumulado de vehículos

Cuando se grafican las curvas acumuladas de vehículos para dos detectores consecutivos, las distancias horizontales entre curvas corresponden a el tiempo de viaje entre detectores por vehículo, mientras que las distancias verticales al número de vehículos que existen entre detectores para un instante de tiempo determinado. Esto se puede ver en la Figura 2-2, en la que $A(x_0, t)$ y $A(x, t)$ representan las curvas acumuladas de vehículos en x_0 y x , respectivamente, j es el indicador correspondiente a un cierto vehículo que circula entre x_0 y x , t_j es el tiempo de viaje para el vehículo j entre x_0 y x , y el tiempo para el que se indica el número de vehículos entre detectores es t_1 .

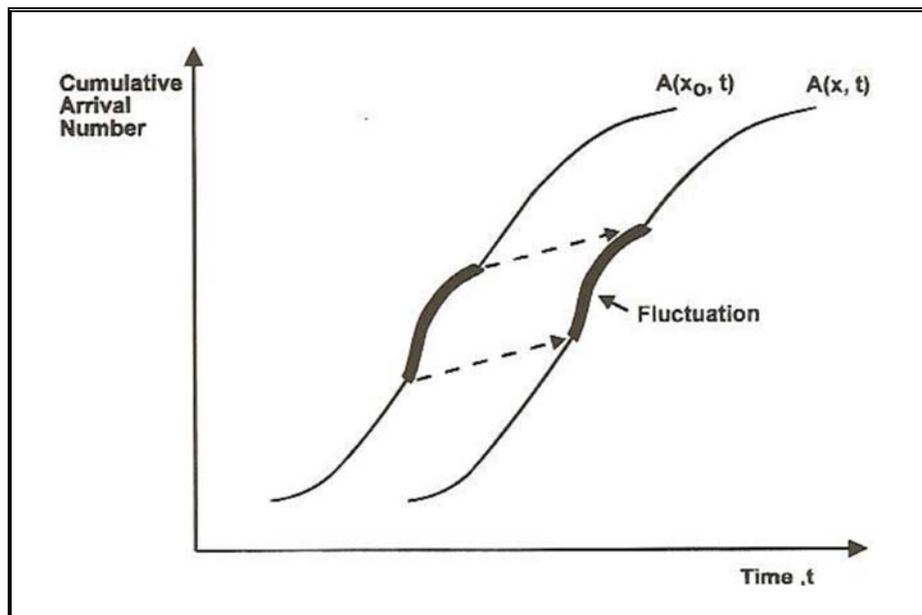


Fuente: Cassidy y Windover (1995)

Figura 2-2: Diagrama de entrada y salida entre dos detectores

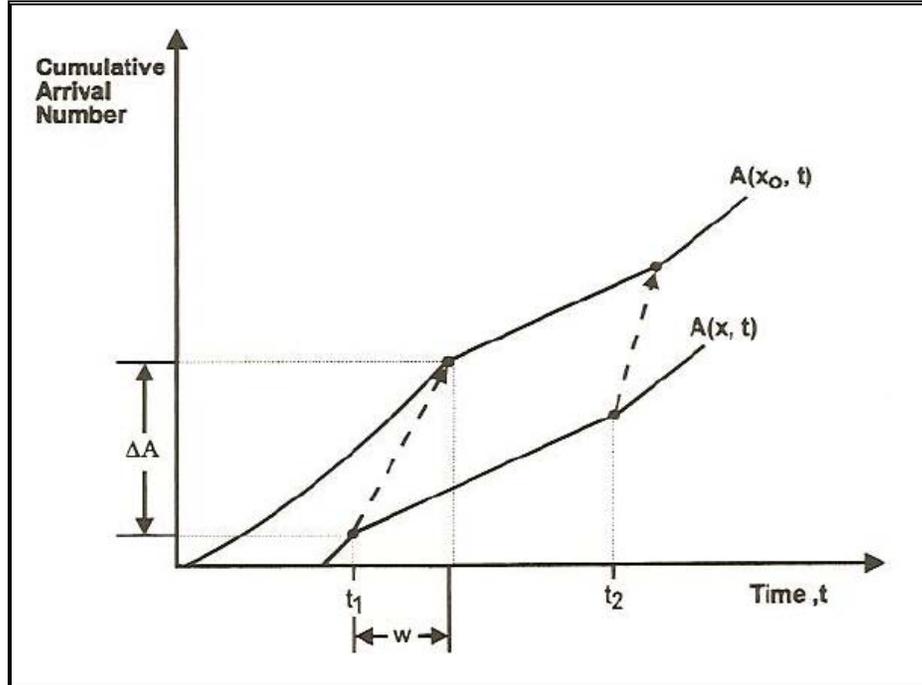
En Cassidy y Windover (1995) se describe también como a través del uso de curvas acumuladas de vehículos es posible identificar propagaciones de ondas de choque entre los detectores para los cuales se grafican estas curvas.

Las ondas de choque pueden ser hacia aguas arriba o aguas abajo dependiendo de las condiciones en las cuales está operando el tráfico. Cuando el tráfico se encuentra operando en condiciones de flujo libre se replican las condiciones de aguas arriba en aguas abajo, por lo que se tiene una onda de choque hacia aguas abajo. Esto se encuentra representado en la Figura 2-3, mientras que cuando el tráfico está congestionado ocurre lo contrario y se tiene una onda de choque hacia aguas arriba, lo que se encuentra representado en la Figura 2-4.



Fuente: Cassidy y Windover (1995)

Figura 2-3: Propagación de una onda de choque hacia aguas abajo



Fuente: Cassidy y Windover (1995)

Figura 2-4: Propagación de una onda de choque hacia aguas arriba

2.2.2 Coordenadas oblicuas

El uso de curvas cumulativas de vehículos tiene la limitación de que cuando se tienen datos de flujos altos para períodos prolongados no es posible apreciar claramente las diferencias entre las curvas, por lo que en Cassidy y Windover (1995) se propone un cambio de coordenadas, restando un flujo base al conteo de vehículos en el tiempo.

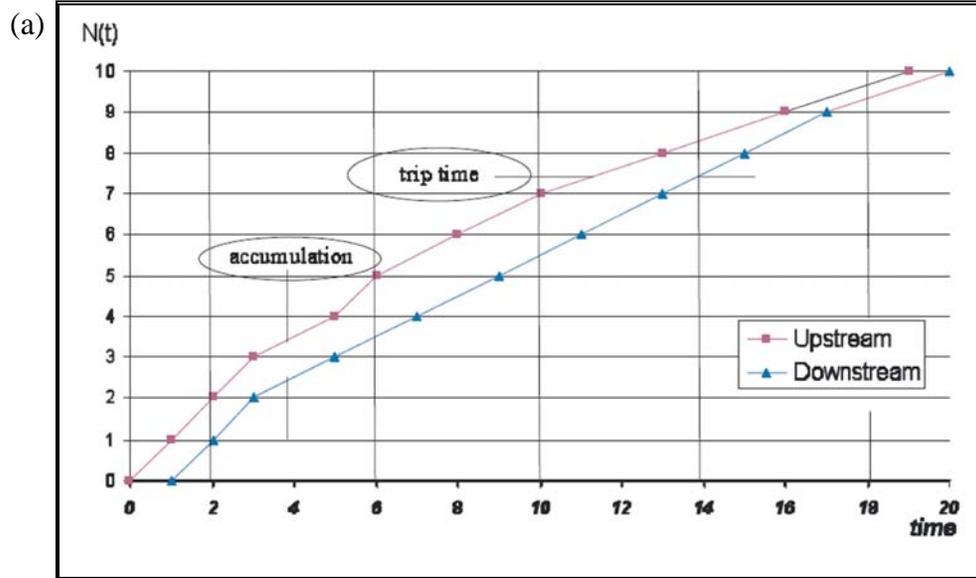
Esto se encuentra explicado de manera más extensa en Muñoz y Daganzo (2002a), donde la técnica recibe el nombre de coordenadas oblicuas. En este caso, si se tiene una curva acumulada de vehículos $N_i(t)$, se propone el cambio a una curva en coordenadas oblicuas de la forma:

$$N'_i(t) = N_i(t) - (t - t_0) \cdot q_b \quad (2.1)$$

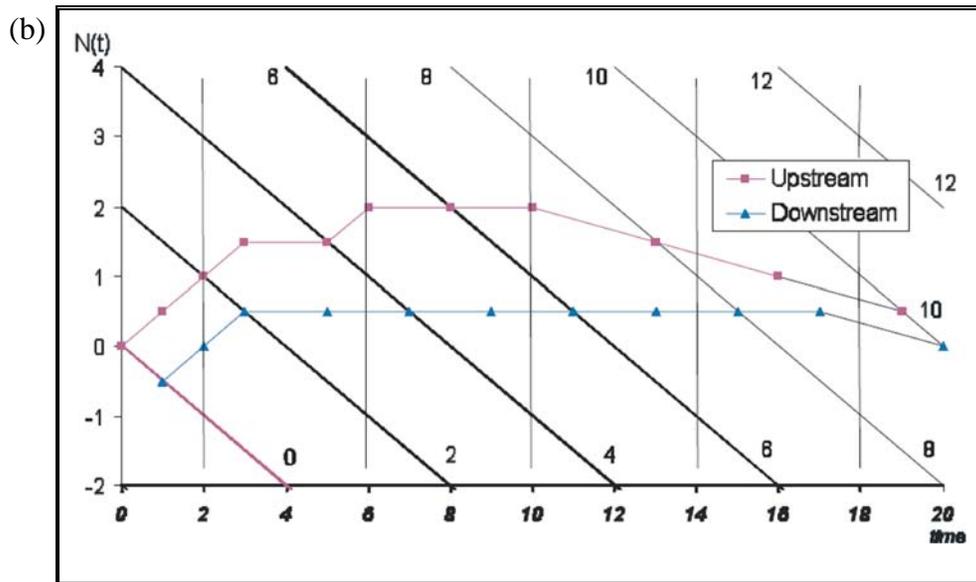
Donde $N'_i(t)$ corresponde al conteo acumulado de vehículos en coordenadas oblicuas, t y t_0 corresponden al tiempo actual y de inicio del gráfico. q_b es el flujo base que se sustrae al conteo de vehículos, el cual generalmente es el promedio de flujo observado durante el período a graficar.

A continuación se presentan ejemplos de lo que ocurre al hacer este cambio de coordenadas. Primero esto se ve de manera simple en la Figura 2-5 (a) se muestra de conteo acumulado hipotético de vehículos aguas arriba (en rojo) y aguas abajo (en azul), donde también se indican los tiempos de viaje y las acumulaciones de vehículos.

Luego se hace el cambio de variables a coordenadas oblicuas, el cual se puede observar en la Figura 2-5 (b), donde se presentan las mismas curvas anteriores pero restando un flujo base por intervalo de tiempo. Al hacer este cambio de variables, las distancias horizontales ya no representan los tiempos de viaje, y es necesario realizar un cambio de variables similar al de los flujos para su determinación.



Fuente: Muñoz y Daganzo (2002a)



Fuente: Muñoz y Daganzo (2002a)

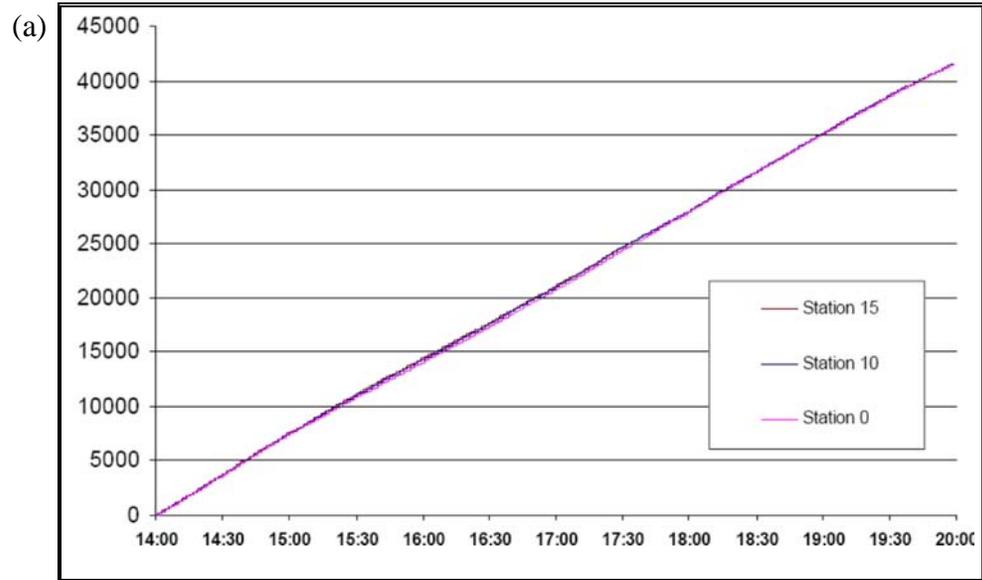
Figura 2-5: Ejemplo de curvas acumuladas de vehículos en: (a) coordenadas ortogonales y (b) coordenadas oblicuas

Finalmente, en la Figura 2-6 se muestra una representación de la diferencia en la visualización de las curvas acumuladas de vehículos, utilizando datos reales de 3 detectores en la autopista I-880 de 5 pistas en California, presentados en Muñoz y Daganzo (2002a). En la Figura 2-6 (a) se ven las curvas en coordenadas ortogonales y en la Figura 2-6 (b) en coordenadas oblicuas.

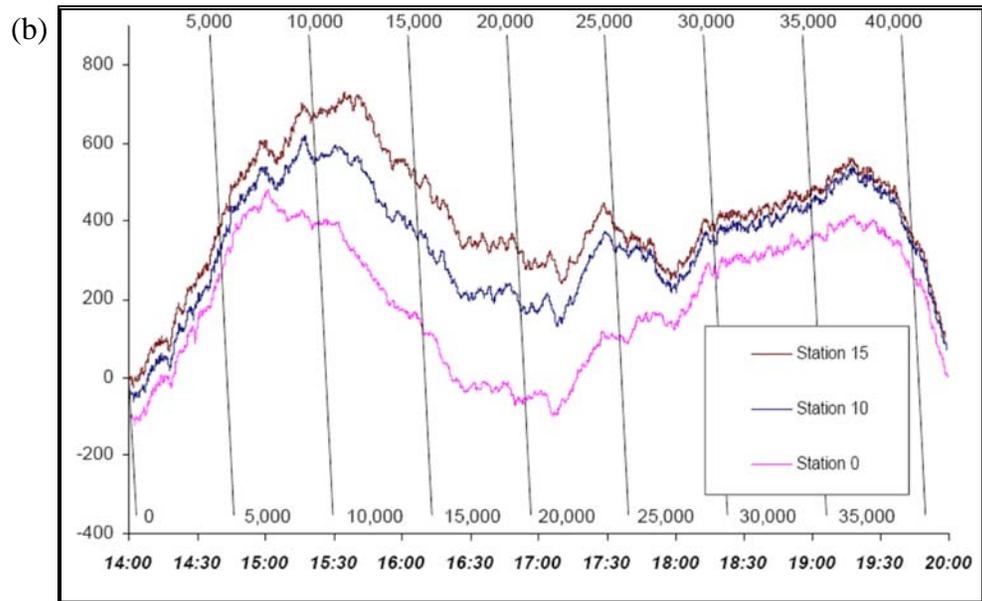
En el primer caso no se pueden apreciar realmente las diferencias entre las curvas, mientras que en el segundo si se pueden ver diferencias relevantes entre ellas. Se observa un período a flujo libre, seguido de un período con congestión para finalizar con una onda de recuperación hasta que finalmente el flujo cae y vuelven las condiciones de flujo libre. Más adelante, en la sección 2.3.3, se presenta en mayor detalle la evolución de lo ocurrido con el tráfico en el período analizado.

De esta manera es posible ver las ventajas de la aplicación del uso de las coordenadas oblicuas en los gráficos de curvas acumuladas de vehículos, ya que es fácilmente identificable lo que ocurre en una autopista en un determinado período a analizar. Utilizando sólo el gráfico acumulado de vehículos hubiese sido imposible determinar con tanto nivel de detalle lo ocurrido.

Las curvas pueden ser calibradas de la manera explicada en Muñoz y Daganzo (2000), buscando la máxima correlación entre los conteos desplazando una de las curvas de manera de determinar la velocidad de la onda de choque a flujo libre entre las curvas. De esta manera, al graficar las curvas quedan más juntas en un comienzo y así se puede identificar de manera más clara cuando se separan las curvas, lo que indica que comienza la congestión.



Fuente: Muñoz y Daganzo (2002a)

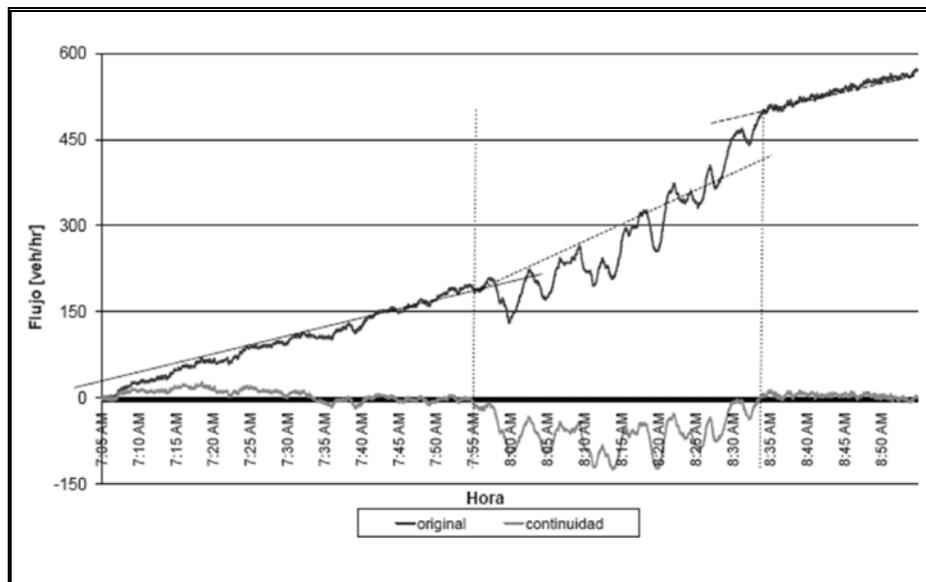


Fuente: Muñoz y Daganzo (2002a)

Figura 2-6: Curvas acumuladas de vehículos en autopista I-880 en: (a) coordenadas ortogonales y (b) coordenadas oblicuas

En el uso de coordenadas oblicuas generalmente existen errores de los conteos a partir de videos y los conteos acumulados entre dos puntos de conteo no coinciden al final de los períodos de análisis. Una forma de solucionar este problema es asumir una curva como la correcta y corregir la otra curva de manera homogénea según la diferencia porcentual al final del período de análisis. Sin embargo este procedimiento no siempre funciona ya que las curvas eventualmente se cruzan, lo que es totalmente contradictorio.

En Sandoval y Muñoz (2008) se propone otra manera de corregir estos errores utilizando el hecho de que los conteos acumulados en períodos de flujo libre debieran ser siempre iguales. Des esta manera, se propone dividir los conteos en tres períodos: el primero de ellos a flujo libre, el segundo período congestionado y el último a flujo libre. Para cada uno de estos períodos se asume un error de conteo homogéneo para cada subperíodo. En la Figura 2-7 se muestra un ejemplo de la diferencia antes y después de aplicar la corrección de vehículos entre dos puntos de conteo.



Fuente: Sandoval y Muñoz (2008)

Figura 2-7: Ejemplo de diferencia vertical entre curvas acumuladas

2.2.3 Modelo de microsimulación de tráfico AIMSUN

AIMSUN (TSS Transport Simulation Systems, 2006) es un modelo de microsimulación de tráfico en el cual se pueden representar tanto redes de tráfico urbano como autopistas. Ha sido diseñado e implementado como herramienta de análisis para el diseño de sistemas de tráfico, y ha mostrado ser un modelo muy útil para probar nuevos sistemas de control de tráfico y medidas de gestión.

El enfoque de simulación de AIMSUN es del tipo microscópico, en el cual se modela cada vehículo por separado durante todo el período de simulación de acuerdo a los modelos que se describen más adelante. Se pueden distinguir diferentes tipos de vehículos, tales como automóviles, líneas de transporte público o transporte de carga. Es posible representar esquemas de control, tales como semáforos, detectores de tráfico o señales de prioridad, y esquemas más avanzados como señales de mensajería variables (*VMS*) o esquemas de *ramp metering*.

El comportamiento de los vehículos se obtiene a partir de una serie de parámetros que modelan a cada vehículo en particular, los cuales, junto al escenario de modelación son los elementos de entrada requeridos para el funcionamiento de AIMSUN. El escenario de modelación está compuesto de cuatro tipos de datos: descripción de la red, planes de control de tráfico, demandas de tráfico y planes de transporte público.

Los elementos de salida que se obtienen de la simulación son representaciones gráficas continuas del comportamiento de los vehículos en la red, las cuales pueden ser en 2 o 3 dimensiones. Además, se puede obtener una serie de datos estadísticos como flujos, velocidades, tiempos de viaje, demoras, paradas, así como también datos de los detectores que pueden ser incorporados en la red de modelación, donde se pueden obtener conteos de tráfico, ocupación y velocidad.

2.2.4 Modelos de comportamiento de AIMSUN

A continuación se hace una descripción de los modelos en los cuales se basa AIMSUN para simular el comportamiento de los vehículos en sus redes de modelación. Los modelos que utiliza son tres: seguimiento vehicular, cambio de pistas y aceptación de brechas.

a) Modelo de seguimiento vehicular

El modelo de seguimiento vehicular que utiliza AIMSUN está basado en el modelo de Gipps (Gipps, 1981; Gipps, 1986b). En este modelo la velocidad a la cual puede acelerar un vehículo está condicionada por dos factores: la máxima velocidad a la cual puede acelerar por sus propios medios y la velocidad que puede alcanzar de acuerdo a las condiciones que le impone el vehículo que lo precede.

La primera condición Gipps la expresa de la siguiente manera:

$$V_a(n, t + T) = V(n, t) + 2.5 \cdot a(n) \cdot T \cdot \left(1 - \frac{V(n, t)}{V^*(n)}\right) \sqrt{0.025 + \frac{V(n, t)}{V^*(n)}} \quad (2.2)$$

Donde:

$V(n, t)$: velocidad del vehículo n en el tiempo t

$V^*(n)$: velocidad deseada por el vehículo n en la sección actual

$a(n)$: aceleración máxima del vehículo n

T : tiempo de reacción

La segunda condición la expresa de la siguiente forma:

$$V_b(n, t + T) = d(n) \cdot T + \dots \sqrt{d(n)^2 \cdot T^2 - d(n) \left[2\{x(n-1, t) - s(n-1) - x(n, t)\} - V(n, t) \cdot T - \frac{V(n-1, t)^2}{d'(n-1)} \right]} \quad (2.3)$$

Donde:

$d(n)$: desaceleración máxima deseada del vehículo n

$x(n, t)$: posición del vehículo n en el tiempo t

$x(n-1, t)$: posición del vehículo precedente ($n-1$) en el tiempo t

$s(n-1)$: largo efectivo del vehículo precedente ($n-1$)

$d'(n-1)$: estimación de la desaceleración deseada del vehículo precedente ($n-1$)

De esta manera, la velocidad del vehículo necesariamente va a estar dada por el mínimo de estas dos expresiones de velocidad:

$$V(n, t+T) = \min\{V_a(n, t+T), V_b(n, t+T)\} \quad (2.4)$$

Por lo tanto, la posición del vehículo va a estar dada por:

$$x(n, t+T) = x(n, t) + V(n, t+T) \cdot T \quad (2.5)$$

b) Modelo de cambio de pistas

El modelo de cambio de pistas está basado en un modelo que también fue desarrollado por Gipps (Gipps, 1986a; Gipps, 1986b). Este modelo se basa en elecciones de los individuos, el cual realiza una serie de preguntas, con lo cual determina si se cambia de pista o no.

i) ¿Es necesario cambiarse de pista?

La respuesta a esta pregunta depende de si es posible realizar un viraje desde la pista actual, la distancia al siguiente viraje y las condiciones de tráfico en la pista actual. Las condiciones de tráfico están dadas en términos de velocidad y largos de cola. Si el conductor va más lento de lo que desea, intenta adelantar al vehículo que lo precede. Por otro lado, si va lo suficientemente rápido, se mantiene en su pista. Si la respuesta a esta pregunta es si, pasa a la siguiente y en caso contrario no se cambia de pista.

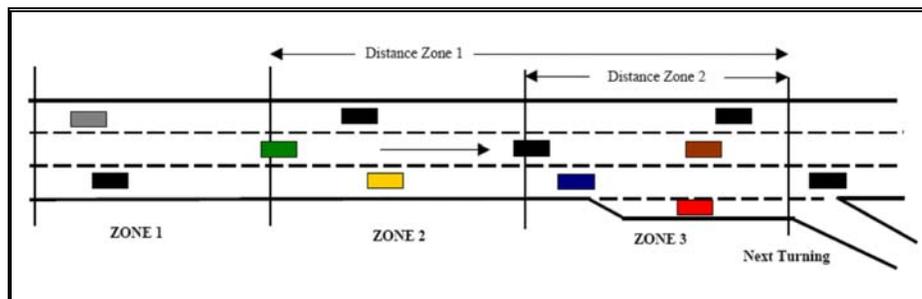
ii) ¿Es deseable cambiarse de pista?

La respuesta se obtiene verificando si va a haber alguna mejora en las condiciones de tráfico para el conductor si se cambia de pista, lo que se mide en términos de velocidad y distancia. Si la pista a la cual se puede cambiar es más rápida o tiene menos cola, entonces es deseable el cambio de pista. Si la respuesta a esta pregunta es si, pasa a la siguiente y en caso contrario no se cambia de pista.

iii) ¿Es posible cambiarse de pista?

En esta pregunta se verifica si hay una brecha suficiente en la pista adyacente para cambiarse de pista de manera segura. Para esto se calculan las tasas de frenado del vehículo que quiere cambiarse de pista con respecto al vehículo que viene aguas arriba y al que viene aguas abajo. Si ambas tasas de frenado son aceptables, el cambio de pista es posible y en ese caso finalmente realiza el cambio de pista.

Para representar de manera más certera el comportamiento de los conductores, se considera además tres zonas donde hay diferentes necesidades de cambio de pista, basadas en la distancia al próximo viraje. Estas zonas se representan en la Figura 2-8. En la zona 1 rigen las condiciones de tráfico, en la zona 2 aumenta la prioridad para realizar un viraje y puede que sea necesario forzar un gap y en la zona 3 el viraje es una obligación.



Fuente: TSS Transport Simulation Systems (2006)

Figura 2-8: Zonas en modelo de cambio de pistas AIMSUN

c) Modelo de aceptación de brechas

Este último modelo es el que se utiliza para responder la tercera pregunta del modelo anterior y sigue el siguiente algoritmo (TSS Transport Simulation Systems, 2006):

- i) Determinar vehículos aguas arriba y aguas abajo en pista de destino
- ii) Calcular la brecha con respecto a vehículos aguas arriba y aguas abajo: *TargetGap*
- iii) Si ($(TargetGap > VehicleLength) \& (Vehículos\ están\ alineados)$):
 - Calcular la distancia entre el vehículo y el vehículo ubicado aguas abajo en la pista de destino: *DistanceDown*
 - Calcular la velocidad impuesta por el vehículo ubicado aguas abajo, de acuerdo al modelo de seguimiento vehicular de Gipps: *ImposedDownSpeed*
 - Si(*ImposedDownSpeed* es aceptable para el vehículo, según su tasa de desaceleración)
 - Calcular la distancia entre el vehículo y el vehículo ubicado aguas arriba en la pista de destino: *DistanceUp*
 - Calcular la velocidad impuesta por el vehículo ubicado aguas abajo, de acuerdo al modelo de seguimiento vehicular de Gipps: *ImposedUpSpeed*
 - Si(*ImposedUpSpeed* es aceptable para el vehículo, según su tasa de desaceleración)
 - Cambio de pista es factible: *CarryOutLaneChange*
 - En caso contrario, la brecha no es factible por el vehículo ubicado aguas arriba
 - En caso contrario, la brecha no es factible por el vehículo ubicado aguas abajo
- iv) En caso contrario, no hay una brecha alineada para el vehículo

Variaciones de este modelo se utilizan para determinar las brechas para vehículos que se aproximan a una intersección prioritaria y se encuentran con un disco pare o un ceda el paso y deben determinar si pueden o no pasar.

2.2.5 Calibración de AIMSUN en Chile

El modelo AIMSUN ha sido calibrado en Chile en diversos estudios, en los cuales a través de la utilización de variados métodos se han determinado nuevos valores por defecto para diferentes parámetros, tanto para flujo interrumpido (Velasco, 2004), ininterrumpido (Lacalle, 2003) y para transporte público (Espinoza, 2004).

Sin embargo, el uso de estos parámetros por sí solos no es suficiente para replicar de manera exacta la realidad chilena, por lo que es necesario realizar calibraciones adicionales a partir de los valores encontrados en estos estudios.

En Velasco (2004) se calibró el modelo AIMSUN para tráfico interrumpido en la ciudad de Santiago de Chile, en el cual se obtuvieron los siguientes valores de parámetros:

Tabla 2-1: Parámetros de AIMSUN calibrados para flujo interrumpido en Chile

PARÁMETRO	VALORES POR DEFECTO INICIALES*	MEDIA	DESV. EST.	MÍN.	MÁX.
Largo	(4,00 ; 0,00 ; 4,00 ; 4,00)	4,32	0,31	3,73	4,98
Ancho	(2,00 ; 0,00 ; 2,00 ; 2,00)	1,70	0,04	1,61	1,82
Aceptación de límite de velocidad	(1,00 ; 0,00 ; 1,00 ; 1,00)	1,00	0,16	0,61	1,50
Velocidad máxima deseada	(100 ; 20 ; 150 ; 80)	110	20	80	150
Distancia mínima entre vehículos	(1,00 ; 0,00 ; 1,00 ; 1,00)	1,73	0,67	0,46	4,45
Velocidad de yellow box	14,40	3,60			
Desaceleración normal	(4,00 ; 0,00 ; 4,00 ; 4,00)	3,20	0,23	2,50	4,00
Máxima aceleración	(2,80 ; 0,00 ; 2,80 ; 2,80)	2,57	0,70	1,36	5,80
TR	0,75	0,90			
TRS	1,00	1,10			

Fuente: Velasco (2004)

* (media, desv. est., mín., máx.)

Por otro lado, en Lacalle (2003) se calibró el modelo AIMSUN para tráfico ininterrumpido en la ciudad de Santiago de Chile, en el cual se obtuvieron los siguientes valores de parámetros:

Tabla 2-2: Parámetros de AIMSUN calibrados para flujo ininterrumpido en Chile

PARÁMETRO	VALORES POR DEFECTO INICIALES*	VALORES CALIBRADOS*
Límite de velocidad pista 1	80	65
Límite de velocidad pista 2 y 3	80	80
Zona 1	15	Local
Zona 2	5	Local
Porcentaje de Adelantamiento	0,9	0,99
Porcentaje de Recuperación	0,95	1,00
Aceptación de velocidad	(1,00 ; 0,00 ; 1,00 ; 1,00)	(1,30 ; 0,20 ; 1,00 ; 1,60)
Velocidad máxima deseada	(100 ; 20 ; 80 ; 150)	(115 ; 20 ; 95 ; 150)
Tiempo de reacción	0,75	0,65
Aceleración máxima	(2,80 ; 0,00 ; 2,80 ; 2,80)	(2,72 ; 0,34 ; 2,13 ; 3,61)
Largo de vehículo	(4;00 , 0,00 ; 4,00 ; 4,00)	(4;32 , 0,30 ; 3,73 ; 4,98)

Fuente: Lacalle (2003)

* (media, desv. est., mín., máx.)

Finalmente, en Espinoza (2004) se calibró el modelo AIMSUN para transporte público en la ciudad de Santiago de Chile, en el cual se obtuvieron los siguientes valores de parámetros:

Tabla 2-3: Parámetros de AIMSUN calibrados para transporte público en Chile

PARÁMETRO	VALORES CALIBRADOS*
Máxima aceleración deseada	(1,72 ; 0,59)
Velocidad máxima deseada	(50,40 ; 10,47)
Desaceleración normal	(2,85 ; 0,64)
Distancia mínima entre vehículos	(1,464; 0,736)
Tiempo de reacción	1,00
Tiempo de reacción en reposo	1,00

Fuente: Espinoza (2003)

* (media, desv. est.)

2.3 Comportamiento del tráfico en torno a rampas de salida de autopistas

2.3.1 Características de cuellos de botella en torno a rampas de salida

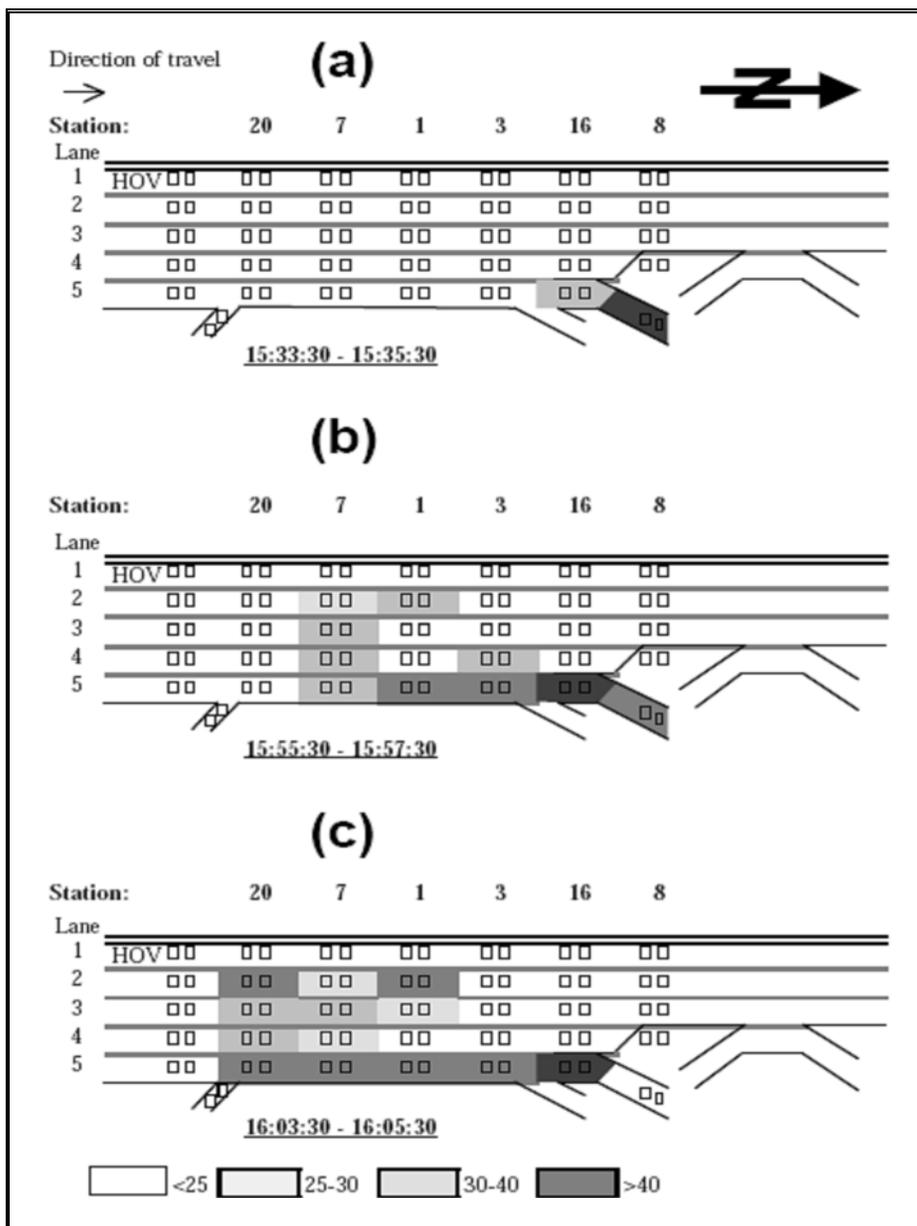
Una autopista junto a una rampa de salida puede ser considerada como una divergencia de flujos con dos ramas, teniendo cada una de ellas una cierta capacidad. Si una de estas ramas se ve sobrepasada en su capacidad, se comienza a formar una cola *FIFO (First-In-First-Out)*, en la cual se ven envueltos los vehículos que se dirigen hacia ambas ramas (Daganzo, 1999). Generalmente, dado que en la rampa de salida tiene menor capacidad se genera una cola que irrumpe hacia la autopista.

En Daganzo et al. (1999) se describen dos posibles razones por las cuales se gatillan colas en las cercanías de rampas de salida:

- a) Una cola desde la rampa de salida irrumpe hacia la autopista y bloquea el tráfico en ésta.
- b) La rampa de salida está sin cola pero un aumento del flujo de vehículos que desea salir crea una cola en la autopista cuando la rampa de salida llega a su capacidad.

El efecto de la formación de estas colas puede llegar a incluso a bloquear la autopista. En Daganzo et al. (1999) se describe la evolución de una cola debida a una rampa de salida. Esto se puede ver en la Figura 2-9 en la cual se presentan tres etapas de la formación de una cola en la autopista I-880 en California. Se muestra de color más oscuro cuando la densidad de vehículos es mayor.

En la Figura 2-9 (a) se ve cuando la cola de la rampa de salida llega hasta la autopista, en la Figura 2-9 (b) se comienza a ver mayor ocupación de vehículos en las pistas adyacentes a la salida y finalmente la cola en la Figura 2-9 (c) llega a bloquear a la rampa de entrada ubicada aguas arriba de la salida que es el cuello de botella del sector.



Fuente: Daganzo et al. (1999)

Figura 2-9: Evolución de una cola en una rampa de salida

En Daganzo et al. (1999) se hace una comparación con un estudio realizado por Kerner y Rehborn (1997) en la autopista A5 entre Bad Homburg y Frankfurt en Alemania. Se encontraron las siguientes similitudes en la evolución de las colas en ambos estudios:

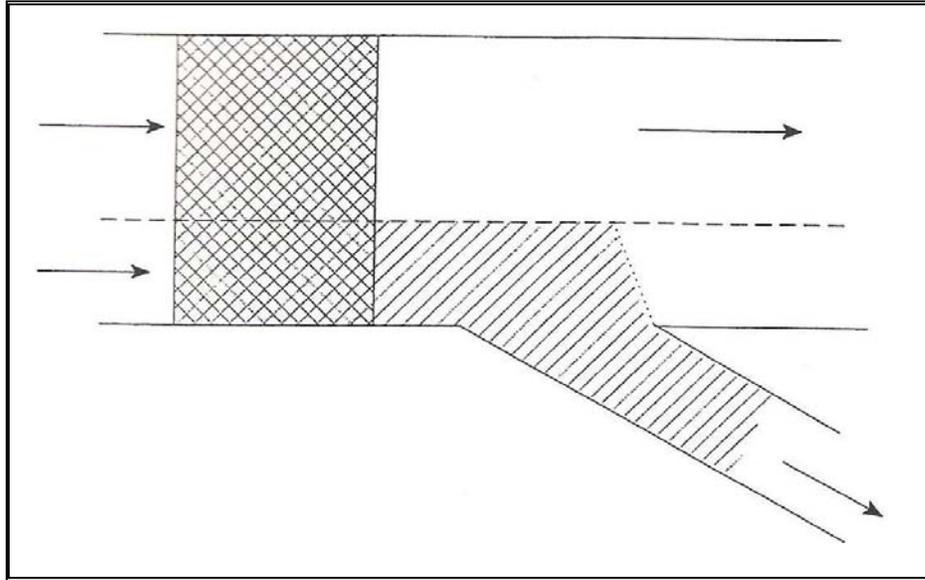
- a) Se observaron mayores reducciones de velocidad en las pistas más cercanas a la rampa de salida.
- b) Las reducciones de velocidad se propagaron hacia aguas arriba en la autopista luego de un cierto tiempo.
- c) Se observaron velocidades igualmente bajas para todas las pistas en puntos aguas arriba de la salida, ubicados lo suficientemente lejos de la rampa de salida.

2.3.2 Análisis gráfico de la evolución de colas en rampas de salida

En Newell (1999) se hace un análisis gráfico de la evolución de colas para rampas de salida. Se diferencian dos tipos de vehículos: los vehículos tipo 1 son los vehículos que siguen directo por autopista y los vehículos tipo 2 son los que salen de la autopista.

Un diagrama de la rampa de salida se presenta en la Figura 2-10. En ella se muestran dos zonas achuradas. La primera de ellas, achurada en ambos sentidos, es el lugar por el cual circulan a los vehículos tipo 1 y corresponde a todas las pistas de la autopista, mientras que la segunda, achurada sólo en un sentido, es donde circulan los vehículos tipo 2 y comprende a la rampa de salida y la primera pista en la zona previa a la rampa de salida. Existe una zona en que ambos tipos de vehículos interactúan cuando la cola de vehículos de la rampa de salida irrumpe hacia la autopista.

Previo a la formación de la cola ambos tipos de vehículos en todas las pistas circulan a la misma velocidad. Cuando la cola de vehículos tipo 2 llega a la autopista, baja la velocidad de la primera pista y afecta a ciertos vehículos tipo 1 en la parte trasera de la cola. Si la capacidad de las pistas restantes no es suficiente para que todos los vehículos tipo 1 puedan pasar se formara una cola con vehículos tipo 1. Igualmente hay vehículos tipo 2 en esta cola, pero para efectos del análisis se consideran como vehículos tipo 1.



Fuente: Newell (1999)

Figura 2-10: Diagrama de una rampa de salida de autopista

Para la evaluación de demoras se utilizan las siguientes curvas:

$D_1(t)$, $D_2(t)$ = curvas acumuladas de vehículos tipo 1 y 2 que pasan más allá de la rampa de salida en t partiendo en $t = 0$ cuando la cola irrumpe en la autopista.

$A_1(t)$, $A_2(t)$ = curvas acumuladas de vehículos tipo 1 y 2 que pasarían más allá de la rampa de salida en t si no hubiese cola en la rampa de salida.

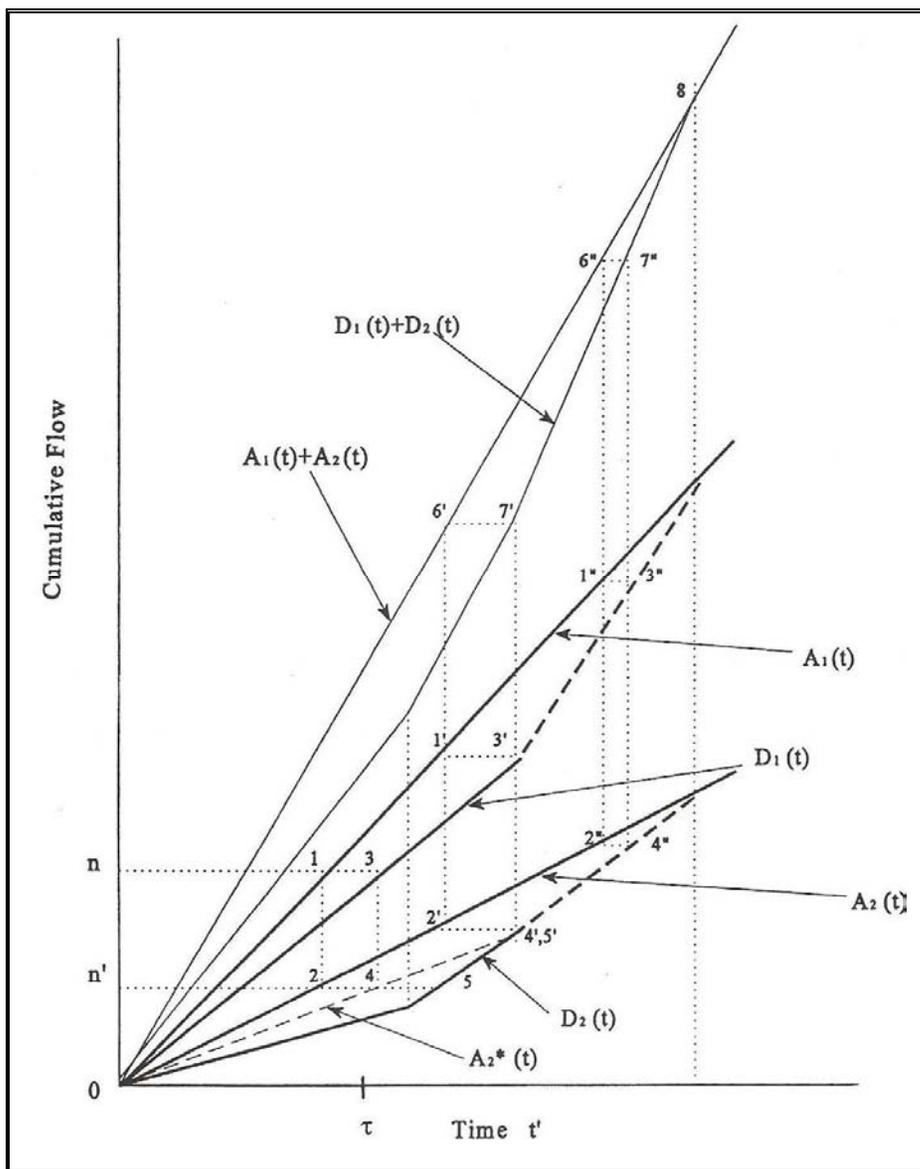
De esta manera, cuando hay congestión se tiene que $A_1(t) > D_1(t)$ y $A_2(t) > D_2(t)$, debido a que la congestión afecta a ambos tipos de vehículos. Asimismo, las diferencias $A_1(t) - D_1(t)$ y $A_2(t) - D_2(t)$ entregan las colas de vehículos de cada tipo que se forman en la autopista. En la Figura 2-11 se observa la evolución de ambas colas de vehículos desde el momento en que la cola de la rampa de salida irrumpe a la autopista. En un punto intermedio la cola de la salida desaparece y los vehículos tipo 2 dejan de estar restringidos y comienzan a descargarse hasta recuperar su tasa de descarga deseada $A_2(t)$.

Un instante después de que la cola de la rampa de salida desaparece y los vehículos tipo 2 comienzan a descargarse, comienza la descarga de los vehículos tipo 1. También se puede ver la curva acumulada agregada para ambos tipos de vehículos, en que la curva $D_1(t) + D_2(t)$ presenta dos quiebres, cuando los vehículos tipo 2 recuperan su tasa de descarga y cuando los vehículos tipo 1 lo hacen.

Este análisis gráfico permite identificar claramente la demora de los vehículos que se generan por una cola que irrumpe desde la rampa de salida. Por ejemplo, para el vehículo n (vehículo tipo 1), su demora está dada por la distancia entre los puntos 1 y 3 en el gráfico. Sin embargo, el vehículo n' (vehículo tipo 2), presenta una demora mayor debido a que entra en la cola de los vehículos que desean salir. Entre los puntos 2 y 4 tiene la misma demora que el vehículo n para llegar a la parte de atrás de la cola y la distancia entre los puntos 4 y 5 representa la demora extra por entrar en la cola de la rampa de salida. A partir de este último análisis se puede construir una nueva curva:

$A_2^*(t)$ = curva acumulada de vehículos tipo 2 que llegan al final de la cola de salida en t luego de pasar por la cola de vehículos tipo 1.

Sin embargo, esta construcción no siempre es válida y en Newell (1999) se explica en detalle las razones. Se deben cumplir ciertas condiciones para que se produzcan las colas y además para que este análisis sea válido se deben cumplir otras condiciones que no se dan en la realidad, como que los vehículos se acumulen a una tasa constante y la capacidad de las ramas permitan una descarga en congestión a una tasa también constante.



Fuente: Newell (1999)

Figura 2-11: Curvas acumulativas de llegadas y salidas

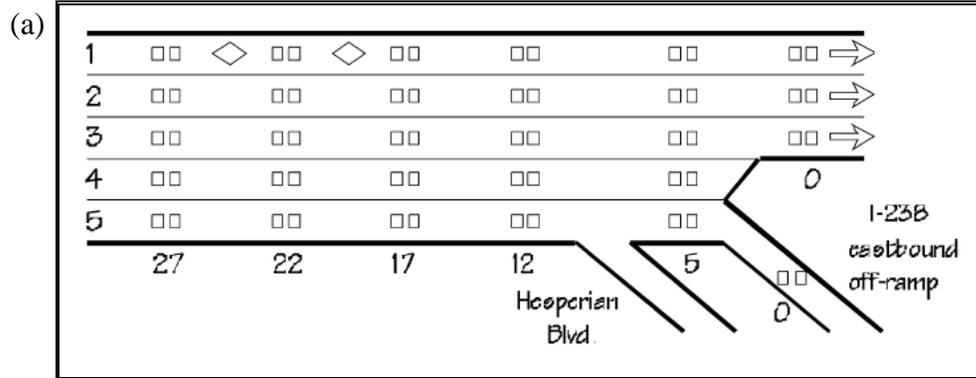
2.3.3 Estudios prácticos de cuellos de botella en torno a rampas de salida

Un detallado análisis del tráfico en una rampa de salida se realiza en Muñoz y Daganzo (2002b). Se analiza el mecanismo de formación de un cuello de botella en la autopista I-880 norte, ubicada en California. Este tramo es el mismo que en Muñoz y Daganzo (2002a) se utiliza para ejemplificar el uso de coordenadas oblicuas y fue presentado en la sección 2.2.2. Un esquema del sitio de estudio se presenta en la Figura 2-12.

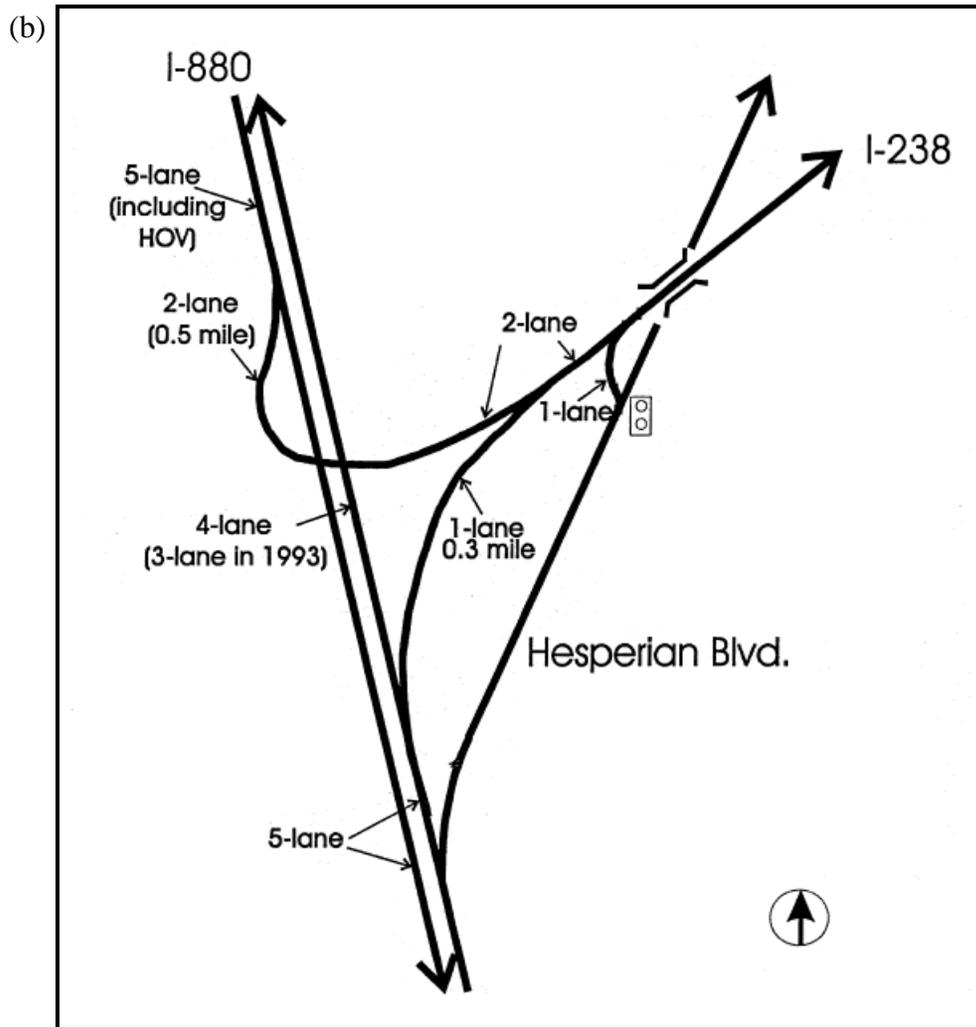
En el tramo analizado existían dos rampas de salida, hacia la autopista I-238 este y hacia Hesperian Blvd. La autopista contaba con 5 pistas, una de las cuales era para reservada para vehículos de alta ocupación (*HOV, High Occupancy Vehices*), en la que solamente vehículos con uno o más pasajeros aparte del conductor pueden ocupar este tipo de pista. Luego de las dos salidas pasaba a tener tres pistas, sin una pista para *HOV*.

El cuello de botella se activaba cuando una cola que provenía de la autopista I-238 irrumpía en la autopista. Esta cola se propagaba en la autopista y bloqueaba todas las pistas excepto la pista reservada para *HOV*. Analizando las series de tiempo de las velocidades en los diferentes detectores presentes en la autopista se puede determinar la hora en que cada serie llega a su mínimo, lo cual se puede observar en la Figura 2-13. La cola tarda cerca de 50 minutos en llegar al último detector del tramo analizado, el cual se ubicaba a 2,7 km. de la salida.

Sin embargo, a partir de la hora en que la serie de velocidades llega a su mínimo no es posible determinar si se debe a que efectivamente hubo congestión o si ese mínimo se debe a fluctuaciones de tráfico en condiciones de flujo libre. Para eso se presenta en la Figura 2-14 las velocidades promedio en cada detector, de donde se desprende que todas las pistas presentan congestión excepto la pista de *HOV*.



Fuente: Muñoz y Daganzo (2002b)



Fuente: Muñoz y Daganzo (2002b)

Figura 2-12: Representación de autopista I-880 norte: (a) geometría del tramo (no a escala) y (b) mapa de la zona aledaña al tramo de estudio

1	15:36	15:18	15:10	15:16	15:24	
2	15:38	15:18	N/A	15:16	15:22	
3	15:38	15:34	15:16	15:10	Not clear	
4	15:38	15:30	15:10	15:02	15:00	0
5	15:38	15:22	15:10	14:58	14:52	
	27	22	17	12	5	0

Fuente: Muñoz y Daganzo (2002b)

Figura 2-13: Hora del día de mínimos en series de tiempo de velocidades

1	79.4 (20.6)	84.6 (8.2)	91.7 (10.4)	84.3 (7.3)	107.3 (4.8)	
2	25.4 (0.9)	32.2 (0.0)	N/A	58.4 (8.2)	92.1 (5.5)	
3	25.5 (-4.0)	31.6 (5.3)	39.7 (5.1)	45.1 (8.4)	67.4 (4.4)	
4	25.5 (-4.0)	27.8 (5.3)	31.4 (5.9)	26.4 (5.6)	39.2 (-1.0)	0
5	24.6 (-2.5)	9.8 (-1.3)	6.4 (-2.7)	6.4 (-2.5)	16.0 (-5.3)	
	27	22	17	12	5	0

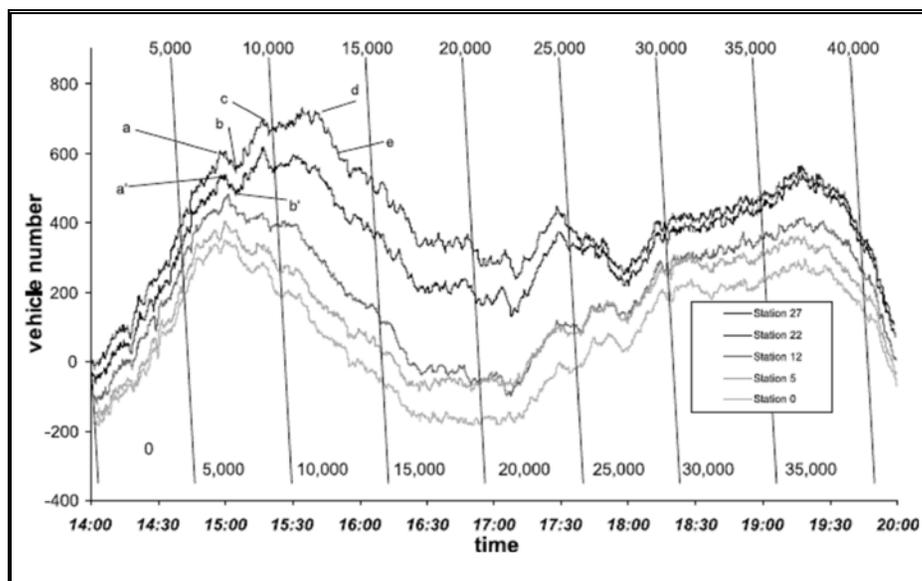
Fuente: Muñoz y Daganzo (2002b)

Figura 2-14: Velocidades promedio en detectores

Graficando el número acumulado de vehículos en coordenadas oblicuas para los cinco detectores presentes en el tramo de estudio se puede apreciar de manera más clara lo ocurrido.

En un comienzo las curvas son paralelas, lo que indica que hay condiciones de tráfico a flujo libre hasta que cerca a las 14:45 las curvas comienzan a separarse y comienza a aumentar la acumulación de vehículos entre detectores, lo que es un indicador de que existe congestión y se forma una cola *FIFO* que crece a través de todas las pistas y se ven envueltos tanto los vehículos directos como los que se dirigen hacia la rampa de salida

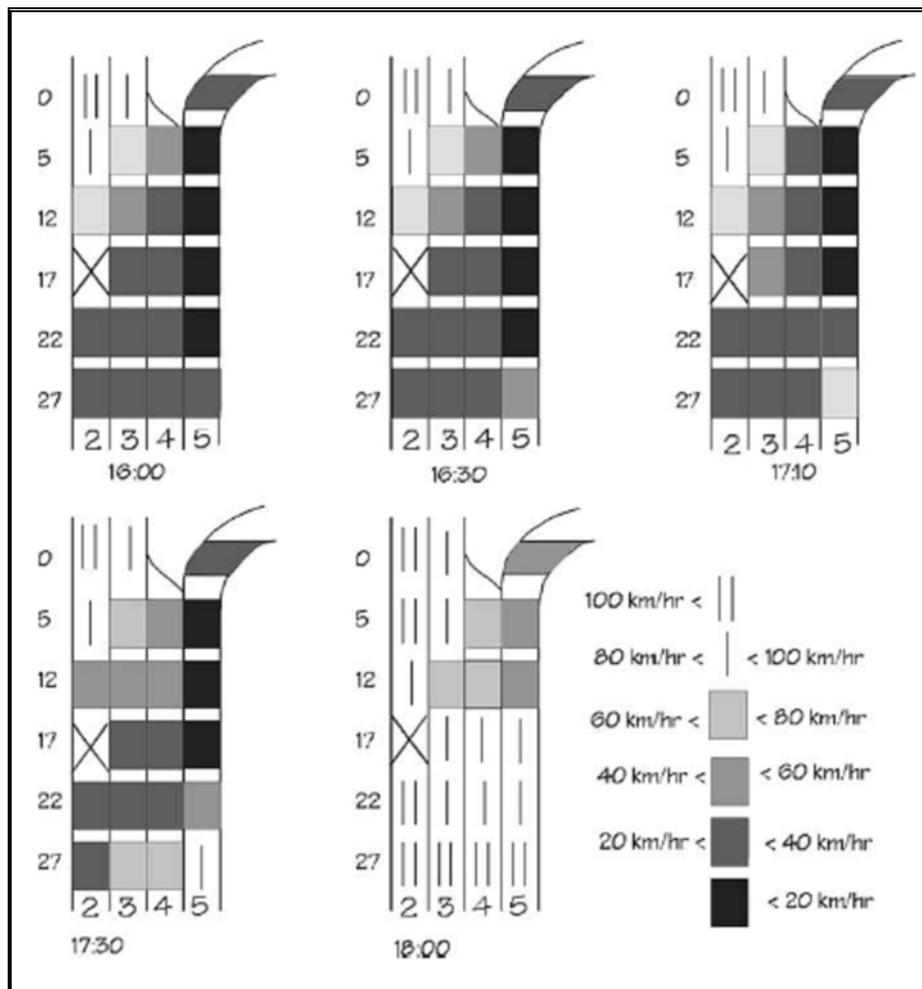
Después se observa un nuevo período de tráfico estacionario, pero congestionado, entre 15:40 y 16:20 y a continuación el flujo aumenta entre 16:20 y 17:30, pero a pesar de ello, el tráfico sigue congestionado. Luego de esto comienza el proceso de disipación de la cola porque la demanda cae, hasta que finalmente las curvas se vuelven a juntar.



Fuente: Muñoz y Daganzo (2002b)

Figura 2-15: Curva acumulada de vehículos en coordenadas oblicuas en autopista I-880

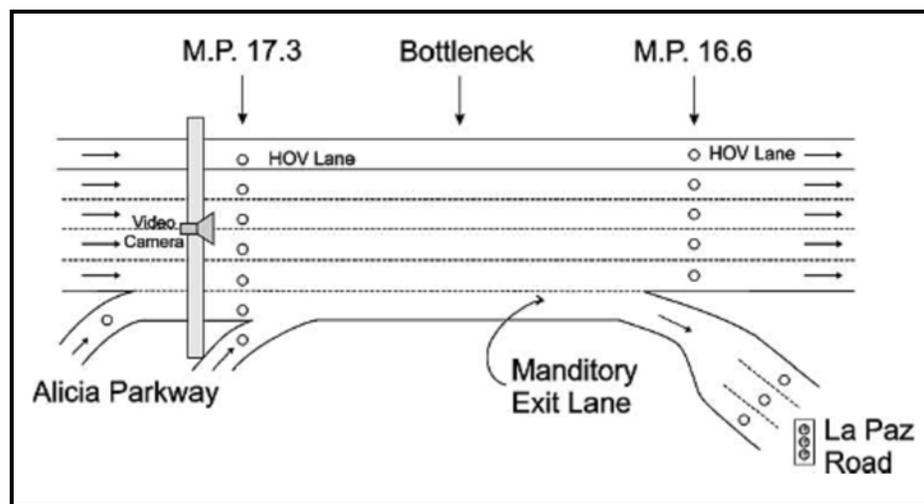
Por otro lado, es posible analizar las velocidades por pista en el tramo a diferentes horas para ver como fue la distribución de la cola entre las diferentes pistas, lo cual se presenta en la Figura 2-16, donde se puede ver que a lo largo de la duración de la cola las velocidades son más bajas a medida que se acerca a la rampa de salida y que las velocidades se igualan a medida que se aleja de la rampa de salida. También se puede ver el mecanismo de disipación de la cola, en el cual las velocidades van aumentando comenzando por la pista más lejana a la rampa de salida.



Fuente: Muñoz y Daganzo (2002b)

Figura 2-16: Evolución de velocidades por pista en autopista I-880

En Cassidy et al. (2002) se analizó una rampa de salida que se encontraba saturada y su influencia en la formación de colas en la autopista. En este caso no existían bloqueos de la autopista debidos a la cola que irrumpía en ella, pero igualmente la presencia de esta cola provocaba que los conductores bajaran su velocidad y se producían disminuciones en la capacidad de descarga de la autopista. El sitio analizado se encontraba en la autopista *Interstate 5 (I-5)*, California y se presenta en la Figura 2-17.



Fuente: Cassidy et al. (2002)

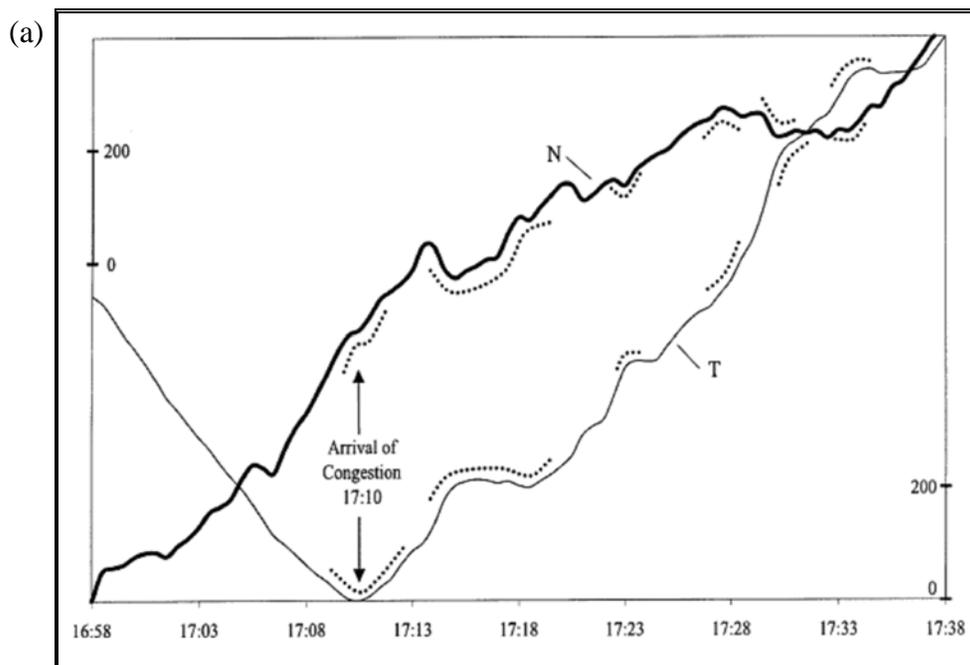
Figura 2-17: Esquema de autopista I-5, California

En este estudio se analizó el momento en que comienza la congestión de una manera diferente a otros casos, ya que en lugar de analizar las curvas acumuladas de vehículos en coordenadas oblicuas entre dos detectores consecutivos se analizaron las curvas acumuladas de número de vehículos y ocupación individualmente por detector, en ambos casos utilizando coordenadas oblicuas. El comienzo y fin de la congestión se detecto a través de los cambios de dirección de las curvas. Cuando se producían en la misma dirección se tenía una onda de choque hacia aguas abajo y cuando era en dirección opuesta correspondía a una onda de choque que se movía hacia aguas arriba.

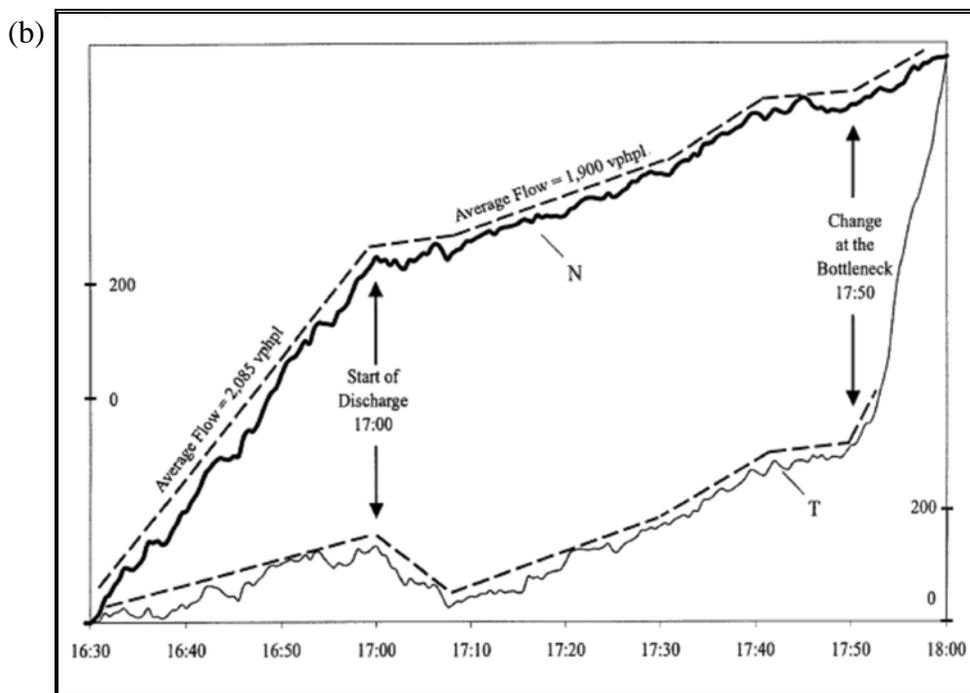
De esta manera, en la Figura 2-18 (a) se puede apreciar que comienza a formar congestión en el detector MP 17,3 cerca de las 17:10, hora en que los cambios en las curvas N (número acumulado de vehículos) y T (ocupación) ocurren en diferentes direcciones. En cambio en el detector MP 16,6 se observa que los cambios siempre ocurren en la misma dirección, lo que indica que en ese punto hay condiciones de flujo libre. Del análisis de ambos gráficos se puede identificar que existe un cuello de botella entre ambos detectores, el cual se produce por la presencia de la rampa de salida, a pesar de que las colas no se propagaban hacia la autopista.

Se realizaron mediciones en otro día en el cual se mantuvo la cola que se producía en la rampa de salida lejos de que los usuarios de la autopista pudieran observarla. En este caso no se observaron los cambios de dirección en las curvas, tal como se puede observar en la Figura 2-19.

Del análisis de ambos días de medición podemos ver que la sola presencia de la cola en la rampa de salida provocaba que los conductores disminuyeran su velocidad y caía el flujo de descarga en la autopista, a pesar de que aquella cola no irrumpía en la autopista ni bloqueaba de manera alguna al flujo principal de la autopista.

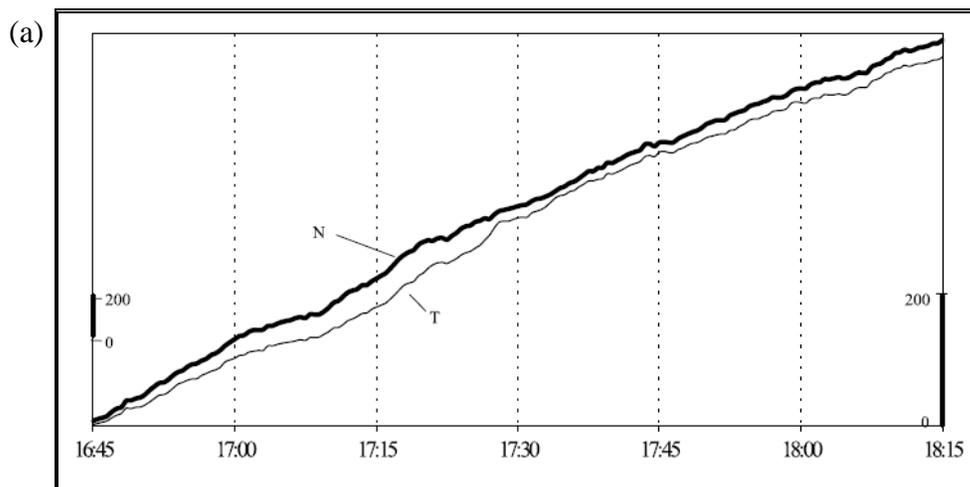


Fuente: Cassidy et al. (2002)

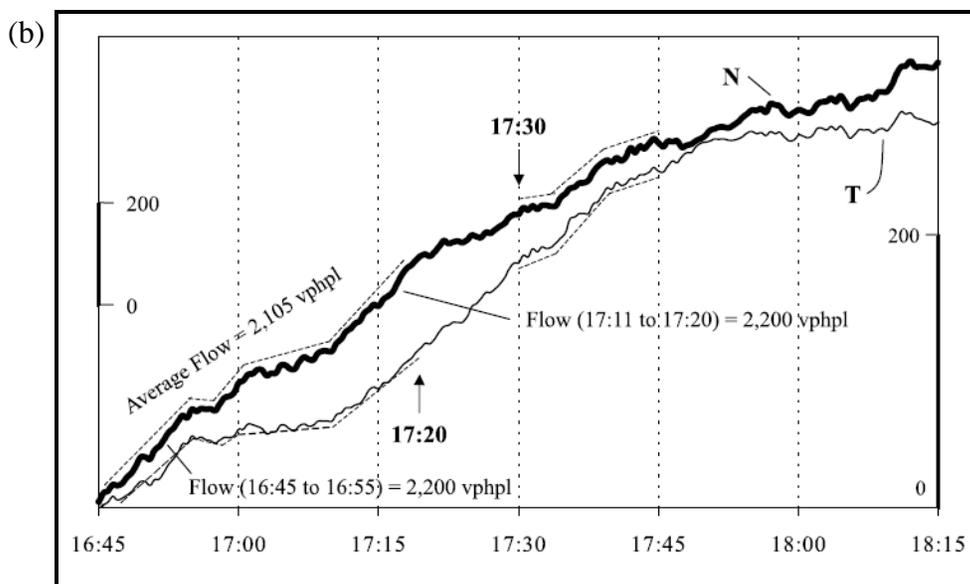


Fuente: Cassidy et al. (2002)

Figura 2-18: Número de vehículos y ocupación acumuladas en autopista I-5, día 1: (a) detector MP 17,3 y (b) detector MP 16,6



Fuente: Cassidy et al. (2002)



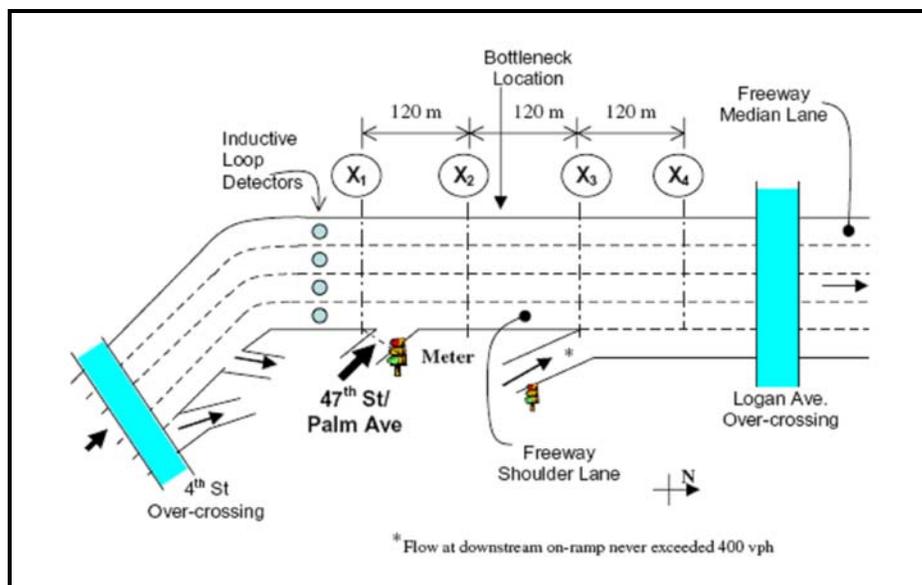
Fuente: Cassidy et al. (2002)

Figura 2-19: Número de vehículos y ocupación acumuladas en autopista I-5, día 2: (a) detector MP 17,3 y (b) detector MP 16,6

2.3.4 Ramp metering y rampas de salida

Una de las estrategias más utilizadas para mitigar los problemas ocasionados por cuellos de botella en rampas de entrada a autopistas es la implementación de esquemas de *ramp metering*. Esta estrategia consiste en controlar el ingreso a la autopista de vehículos colocando semáforos en la entrada y permitiendo que los vehículos ingresen en la medida que no produzcan una caída de capacidad en la autopista.

En Cassidy y Rudjanakanoknad (2005) se analiza en detalle una rampa de entrada aislada, en la cual el flujo de entrada a la autopista produce una caída de capacidad ésta. El sitio analizado corresponde a la Autopista 805, ubicada en San Diego, California, el cual se presenta en la Figura 2-20. Se tenía otra rampa de entrada ubicada aguas abajo pero que tenía niveles de flujo menores a los 400 veh/hora, por lo que se consideró como una rampa de entrada aislada.



Fuente: Cassidy y Rudjanakanoknad (2005)

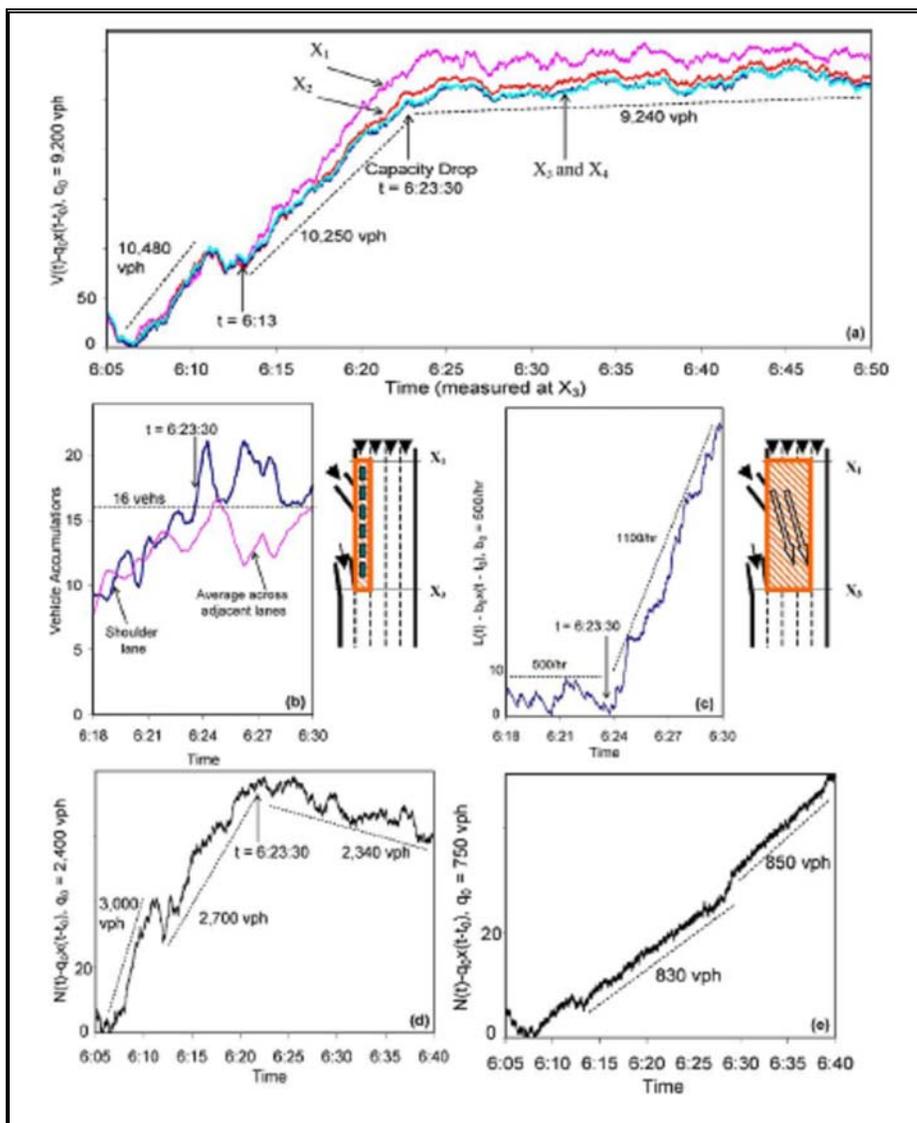
Figura 2-20: Rampa de entrada aislada en Autopista 805

El experimento realizado en Cassidy y Rudjanakanoknad (2005) consistió primero en una medición de un día normal sin el uso de *ramp metering*, para poder determinar el período congestionado y la tasa de *ramp metering* a aplicar durante un segundo día de medición.

Las observaciones del primer día de medición entregaron los resultados que se pueden ver en la Figura 2-21. En la Figura 2-21 (a) se pueden ver las curvas acumulativas de vehículos desde X_1 a X_4 , donde se aprecia que se produce una caída de capacidad a las 6:23:30 y comienza a aumentar la acumulación de vehículos entre los puntos X_1 y X_3 , especialmente en la pista adyacente a la rampa de entrada, tal como se ve en la Figura 2-21 (b). También se puede observar en la Figura 2-21 (c) que al formarse el cuello de botella aumentan fuertemente los cambios de pista hacia las segunda y tercera pistas, para evitar la cola de vehículos que hay en la primera pista. En la Figura 2-21 (d) se muestra la curva acumulada de vehículos en pista media en X_3 y se puede ver como baja la capacidad de descarga de vehículos en la autopista, mientras que en la Figura 2-21 (e) se presenta la curva acumulada de vehículos en rampa de entrada, donde se ve una tasa casi constante.

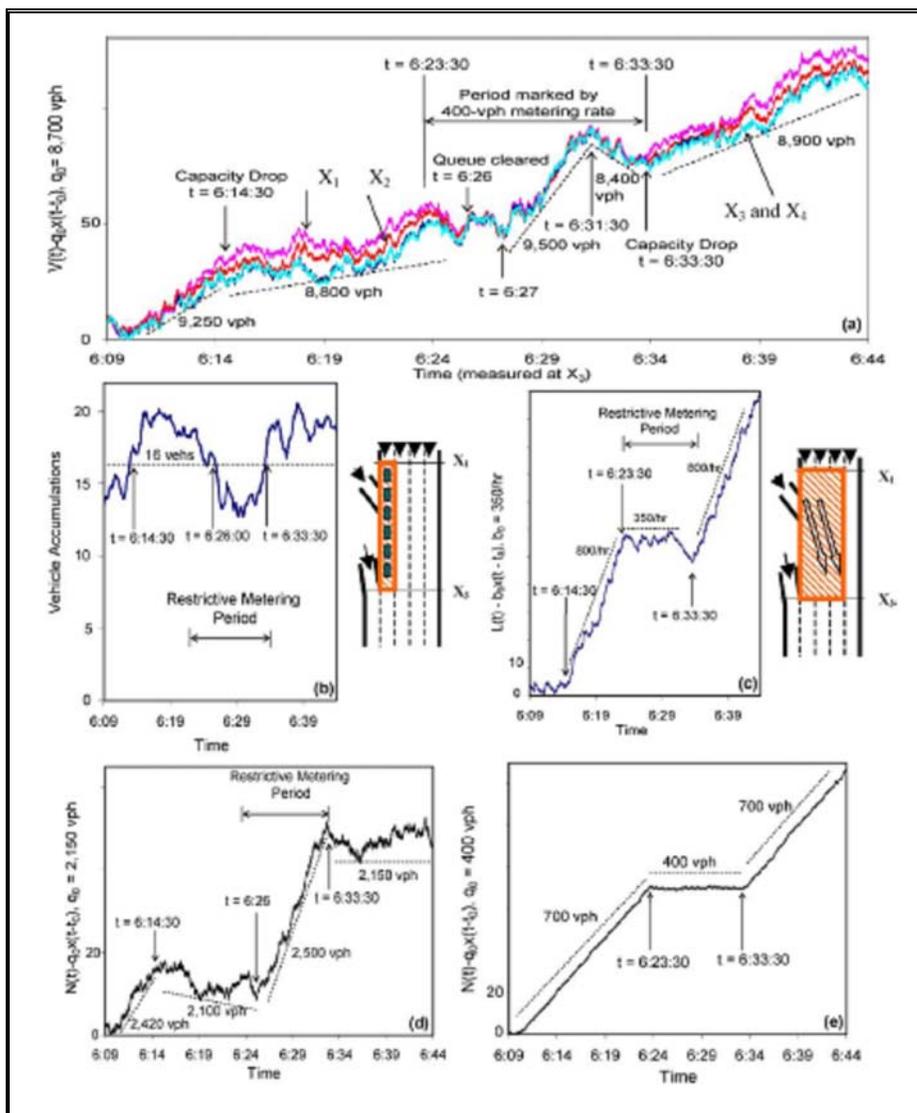
Se realizó una segunda medición, utilizando una tasa de *ramp metering* de 400 veh/hora a partir de la hora en que se había detectado el primer día de medición y durante 10 minutos. Los resultados se pueden ver en la Figura 2-22, en la cual se muestran los mismos 5 gráficos que en el primer día.

En este caso, en la Figura 2-22 (a), se observa que las curvas de acumulaciones de vehículos se mantienen juntas durante el período en que se aplicó *ramp metering*, lo que indica que no hubo congestión. Asimismo, si se observa la Figura 2-22 (b) se ve que la acumulación de vehículos entre X_1 y X_3 disminuye en el período con *ramp metering* y en la Figura 2-22 (c) se ve que no aumentan los cambios de pistas. En la Figura 2-22 (d) se puede ver que la capacidad de descarga de la autopista incluso aumenta y en la Figura 2-22 (e) se ve que durante el período de *ramp metering* el flujo en la rampa de entrada es el permitido por la tasa de *ramp metering*.



Fuente: Cassidy y Rudjanakanoknad (2005)

Figura 2-21: Resultados de mediciones en día 1: sin ramp metering

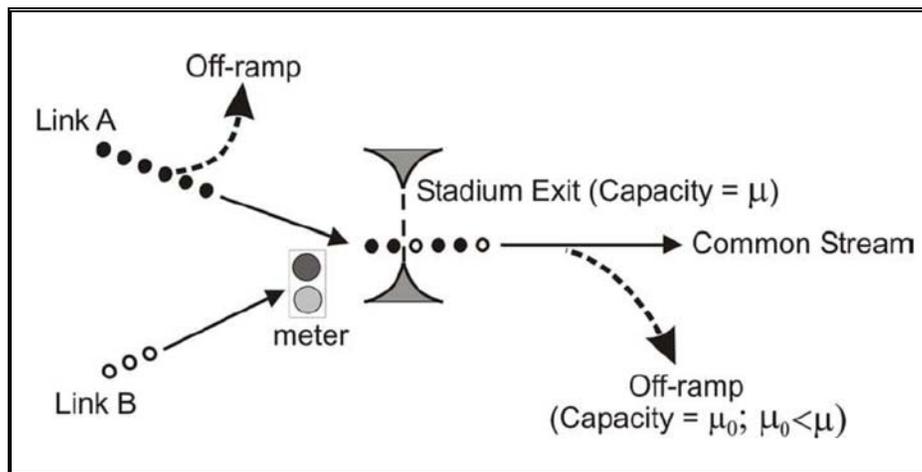


Fuente: Cassidy y Rudjanakanoknad (2005)

Figura 2-22: Resultados de mediciones en día 2: con *ramp metering*

Sin embargo, un esquema de *ramp metering* no siempre es capaz de disminuir la demora que se produce en una autopista, e incluso es posible que la aumente. Un ejemplo de esto se puede ver en Cassidy (2003), donde se hace una analogía entre una autopista con un rampa de entrada y la salida de un estadio de donde viene público de dos diferentes graderías.

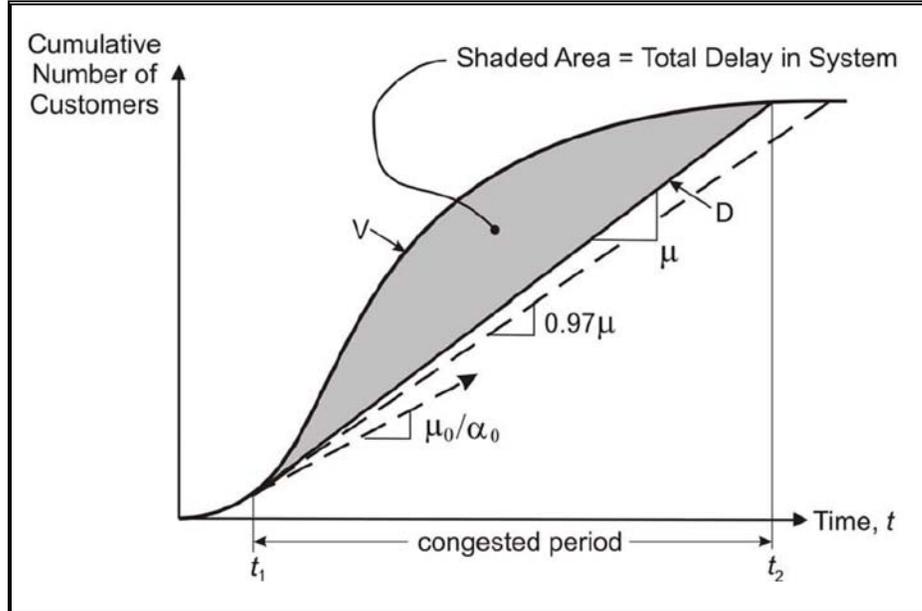
La situación se puede representar como en la Figura 2-23, en la que vienen dos flujos de personas desde una gradería preferencial (Gradería A) y otra gradería (Gradería B), los cuales se unen en una única salida. En un primer caso, considerando únicamente ambos flujos y la salida con capacidad μ , y sin considerar las rampas de salida ni *ramp metering*, se tiene una situación en que ambos flujos se mezclan y dado que la capacidad de la rampa de salida (μ) es menor que los flujos que llegan, se produce una cola y la consecuente demora de ambos flujos.



Fuente: Cassidy (2003)

Figura 2-23: Diagrama de sistema de colas con unión de flujos

La llegada deseada de las personas se puede representar en la Figura 2-24 a través de la curva V, donde la restricción por la capacidad del sistema es la curva D. El área entre las curvas corresponde a la demora total en el sistema.



Fuente: Cassidy (2003)

Figura 2-24: Diagrama de llegadas para sistema de colas con unión de flujos

Si en la Figura 2-23 consideramos una restricción de *ramp metering* para el público que sale de la gradería B, los que vienen desde la gradería A pueden salir de manera más expedita que antes, pero su demora se transfiere a los de la gradería A. En este caso, la demora total se mantiene, ya que la curva V en la Figura 2-24 se mantiene igual.

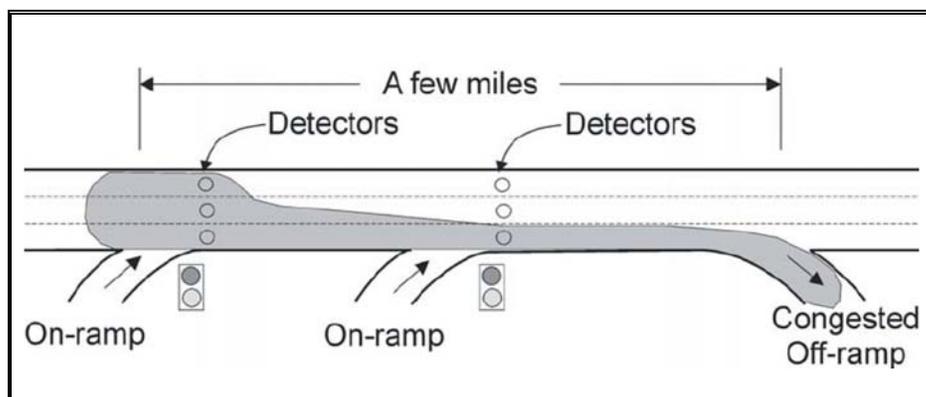
Sin embargo, en el caso de que el *ramp metering* aplicado sea lo suficientemente restrictivo como para que el público proveniente de la gradería A pueda salir sin demora alguna y se utilice menos capacidad de la que tiene la salida, la demora total en el sistema aumenta, tal como se puede ver en la Figura 2-24, en la que se muestra el caso en que se utiliza un 97% de la capacidad disponible (0.97μ). Se mantiene la curva V, pero la curva D baja, por lo que aumenta el área entre las curvas.

Suponiendo ahora el mismo sistema anterior en que ahora existe otra salida del sistema aparte de la ya existente, y que esta se encuentra antes de que el público proveniente de la gradería A se junte con el de la gradería B. En este caso, claramente se reduciría la demora debido a que bajaría la demanda por ocupar la salida única que existía antes.

En el caso de que esta nueva salida se encontrase después de la ya existente no necesariamente se disminuye la demora, ya que si muchas personas desean salir por esa salida, ésta se va a congestionar y puede bloquear la salida anterior.

Suponiendo que la capacidad de la nueva salida es μ_0 y la proporción de personas que va a salir por esa salida es α_0 , en el caso que si el flujo que se dirige hacia la salida es mayor que su capacidad, o sea $\alpha_0 \cdot 0.97\mu > \mu_0$, aumenta la demora. Esto se puede ver en la Figura 2-24, en la que la curva D ahora tiene una capacidad $\mu_0/\alpha_0 (< 0.97\mu)$, por lo que el área entre V y D aumenta, y por lo tanto la demora es aún mayor que en los casos anteriores.

El comportamiento de los vehículos en autopistas es similar al del público deseando salir de un estadio. Se puede hacer la analogía entre ambas ramas de personas que se unen y los flujos de autopistas que vienen por las pistas principales y las que vienen por la rampa de entrada. Al unirse tienen un umbral de autopista con una capacidad dada por las condiciones de diseño y de operación, tal como en el caso de la salida del estadio. Finalmente, puede haber una salida con otra cierta capacidad, semejante a la salida que se agregó después en el ejemplo anterior. Un esquema de una autopista con estas características se puede apreciar en la Figura 2-25.



Fuente: Cassidy (2003)

Figura 2-25: Ejemplo de autopista con rampa de salida congestionada

Tal como fue explicado en Cassidy y Rudjanakanoknad (2005), utilizando *ramp metering* se pueden eliminar las colas en las pistas principales de una autopista, y de esta manera incrementar la capacidad de una unión de flujos. Sin embargo, esto no siempre es así, como por ejemplo en el caso de una rampa de salida congestionada.

Supongamos el caso de la Figura 2-25 en que la rampa de salida está congestionada y la cola que se genera se propaga hacia aguas arriba. Los detectores ubicados justo después de las rampas de entrada miden ocupaciones mayores por lo que aplican tasas mayores de *ramp metering*. De esta manera, como es probable que los vehículos que ingresan en aquellas rampas de entrada no estén destinados a esa rampa de salida, debido a su cercanía, en la autopista aumenta el porcentaje de vehículos que están destinados a salir por la rampa de salida congestionada. Por lo tanto, aumenta la cola y por lo tanto la demora en la autopista y se produce una situación en que se está restringiendo a los vehículos que no son los causantes del problema.

Por lo tanto, en Cassidy (2003) se recomienda que antes de implementar cualquier esquema de *ramp metering*, es mejor tratar de solucionar los problemas de rampas de salida congestionadas si es que se diera el caso como el de la Figura 2-25. En otro estudio, Cassidy (2002), basado en el mismo análisis, hace una crítica al esquema de *ramp metering* propuesta por Jia et al. (2000), en la cual no se considera la existencia de un cuello de botella en torno a una rampa de salida que afecta al esquema propuesto y que es el principal causante de la congestión en la autopista.

2.3.5 Medidas de mitigación para congestión en rampas de salida

La mayor parte de la literatura en medidas de mitigación de congestión en autopistas consiste en estudios para evitar los cuellos de botella debidos a rampas de entrada a una autopista, en los cuales se utilizan esquemas de *ramp metering* en las rampas de entrada para controlar el flujo que ingresa a la autopista. Sin embargo, para el caso de las rampas de salida es más difícil encontrar medidas del mismo tipo para evitar que las colas se propaguen hacia la autopista. En esta sección se presentan algunas medidas de mitigación que se han propuesto para rampas de salida en diversos estudios.

En Hagen et al. (2006) se estudian diversos problemas en rampas de salida de autopistas desde 3 puntos de vista diferentes: operaciones en autopista, operaciones en calles laterales y operaciones en rampas de salida.

Entre las causas que se atribuyen a que una cola de una rampa de salida irrumpa hacia una autopista se encuentran la baja capacidad de las intersecciones ubicadas aguas abajo de rampas de salida, la baja capacidad de almacenamiento de las rampas de salida y de las calles laterales de la autopista, los bloqueos en pistas de calles laterales de autopista y la corta distancia entre la rampa de salida y sus intersecciones más inmediatas.

Entre las medidas de mitigación de corto plazo y de fácil aplicación que se mencionan en Hagen et al. (2006) se encuentran el mejoramiento en la programación de semáforos en las intersecciones ubicadas aguas abajo de rampas de salida y en las calles laterales ubicadas en las cercanías de la rampa de salida, así como también la reasignación del uso de pistas en la intersección ubicada aguas abajo de la rampa de salida.

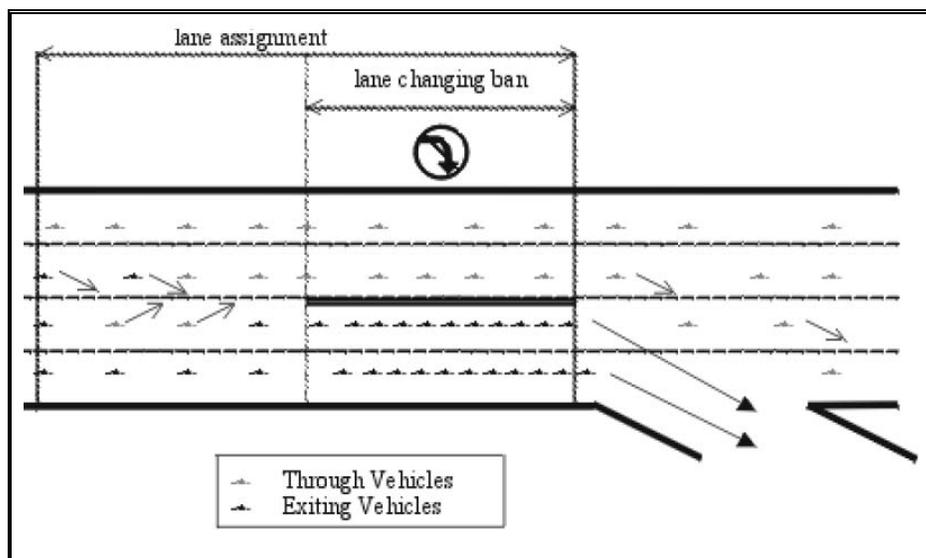
También se mencionan algunas medidas de mitigación que requieren el uso de tecnologías más avanzadas. Por un lado, se propone la aplicación de *ramp metering* para controlar flujos de entrada y así reducir la demanda en la autopista. Otras medidas que se proponen son aplicar estrategias del tipo Gestión de Demanda de Tráfico (*TDM, Transportation Demand Management*) para reducir la demanda de viajes en la autopista, tecnologías del tipo Sistemas Avanzados de Información de Viajes (*ATIS, Advanced Traveler Information Systems*) para dar información a los viajeros y tecnologías del tipo Sistemas Avanzados de Gestión de Tráfico (*ATMS, Advanced Traffic Management Systems*) para monitorear efectivamente la congestión y tomar medidas de manera inmediata.

Finalmente, se mencionan otras medidas de mitigación que requieren de inversiones en infraestructura en el largo plazo, como proveer mejoras geométricas en las intersecciones ubicadas aguas abajo de las rampas de salida, agregar pistas a las rampas de salida congestionadas para aumentar capacidades de salida y de almacenamiento, agregar pistas en calles laterales para reducir su congestión y construir intersecciones adicionales a la congestionada o nuevas rampas de salida.

En Daganzo et al. (2002) se presentan diversas estrategias de mitigación de impactos en autopistas utilizando tecnologías avanzadas. Estas estrategias se refieren a rampas de entrada, de salida y al tráfico principal de la autopista.

Dentro de las estrategias para rampas de salida la primera consiste en asignación a pistas según destino de los viajeros, diferenciando entre los que desean salir de la autopista y los que quieren seguir directo por la autopista.

La forma en que se implementa la estrategia es asignando una zona de prohibición de cambio de pista, previa a la rampa de salida, tal como se presenta en Figura 2-26. Esto se puede aplicar con señales de mensajería variable (VMS), indicando cuales pista debe ocupar cada viajero según su destino. De esta manera se evita la formación de una cola *FIFO* entre ambos tipos de vehículos con lo que no se producen entrecruzamientos entre ellos.

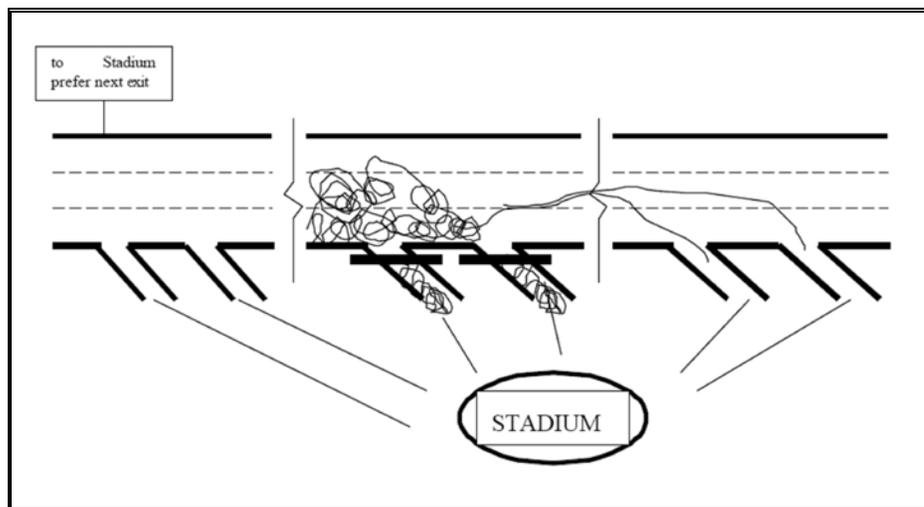


Fuente: Daganzo et al. (2002)

Figura 2-26: Estrategia de asignación de pistas según destino

La otra estrategia que se presenta en Daganzo et al. (2002) para rampas de salida corresponde a la gestión dinámica de éstas, lo cual consiste en cerrar selectivamente ciertas rampas de salida congestionadas y desviar el tráfico que desea salir de la autopista hacia otras rampas que no se encuentren congestionadas. Esta estrategia es especialmente útil en casos en los cuales hay un aumento de demanda repentino y puntual por breves instantes de tiempo, tal como podría ser la entrada o salida de un evento deportivo en un estadio.

Se indican dos maneras de implementar esta estrategia, la primera de ellas siendo el control directo sin aviso previo a los conductores, con lo cual los conductores se verían obligados a ocupar las rampas de salida que se encuentren aguas abajo de la rampa que eventualmente se cierre. La segunda de las maneras de implementar esta estrategia sería con el uso de paneles de mensajería variable, indicando a los conductores que hay una rampa cerrada y que tiene la opción de ocupar tanto rampas aguas arriba como aguas abajo de la rampa cerrada para salir de la autopista. En la Figura 2-27 se presenta gráficamente la manera en que podría funcionar un esquema de este tipo.



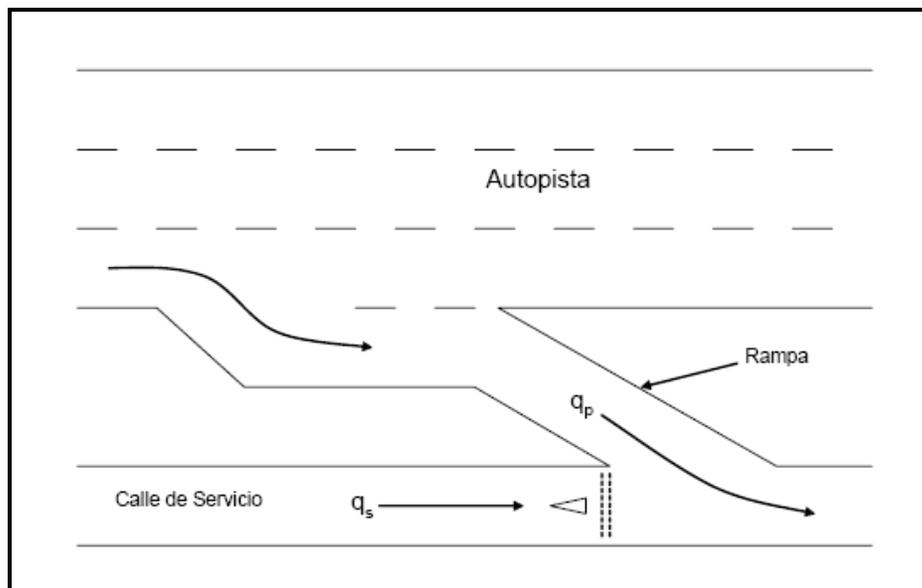
Fuente: Daganzo et al. (2002)

Figura 2-27: Estrategia de gestión dinámica de rampas de salida

2.4 Experiencias previas en Chile

En Chile se han realizado pocos estudios sobre el comportamiento de tráfico en autopistas urbanas. El primero de ellos fue realizado por Lastra (2003), en el cual se calibran curvas entre flujo y velocidad y entre el inverso del flujo y el inverso de la densidad en la Autopista Kennedy, pero debido a la ausencia de datos en congestión no es posible proponer medidas de mitigación a partir de los datos obtenidos.

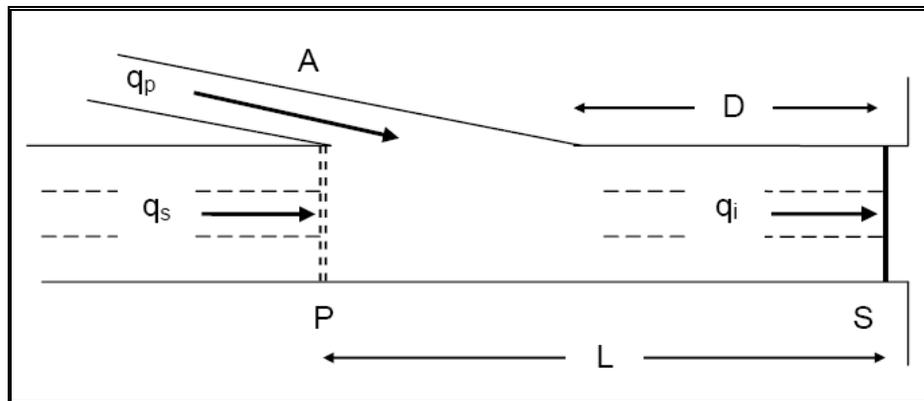
Existe un segundo trabajo realizado por Salas (2006) en el que se analizan las interacciones de tráfico en torno a una rampa de salida de la Autopista Central en la ciudad de Santiago de Chile, y luego se proponen formas de gestionar el tráfico de esta rampa de salida. El análisis en este caso se concentra en los flujos de la rampa de salida y de la calle de servicio de la autopista, que confluyen luego de que los vehículos salen de la autopista e interactúan entre sí. Un esquema de estos flujos se presenta en la Figura 2-28, donde q_p representa el flujo de la rampa de salida y q_s el flujo de la calle de servicio.



Fuente: Salas (2006)

Figura 2-28: Esquema de salida de autopista

En dicho trabajo se realiza un análisis de la interacción entre ambos flujos, a partir de las variables que se observan en la Figura 2-29.



Fuente: Salas (2006)

Figura 2-29: Variables que influyen en interacción de flujos

A partir de este esquema se definen las siguientes variables:

$Q_i = u_i \cdot S_i$: capacidad de la intersección S

$u_i = v_{ei}/C$: razón de verde efectivo de la intersección S

S_i : flujo de saturación total de la intersección S

$y_i = q_i/S_i$: factor de carga del acceso a la intersección S

$x_i = q_i/Q_i$: grado de saturación de la intersección S

L : distancia entre líneas de detención de S y P

D : distancia de almacenamiento de la intersección S

N_{mi} : máxima extensión de la cola en todas las pistas de la intersección S para el flujo q_i

N_{mp} : máxima extensión de la cola en todas las pistas de la intersección S para el flujo q_p

N_{0i} : cola excedente en todas las pistas de la intersección S para el flujo q_i

N_{0p} : cola excedente en todas las pistas de la intersección S para el flujo q_p

Como criterio básico de diseño se debe adoptar que el flujo q_p sea prioritario sobre q_s , a través de la instalación de una señal de prioridad en la calle de servicio. Por otro lado, si la cola generada por el flujo q_i (q_p+q_s) en la intersección S es mayor o igual a L , se bloquea el flujo q_p y se genera cola en la rampa de salida, la cual se puede extender hacia las pistas de circulación de la autopista.

En Salas (2006) se plantean dos formas de solucionar este problema. La primera de ellas corresponde a la reprogramación del semáforo de la intersección S . En aquel caso se llega a la siguiente solución:

$$r_{ei} < \frac{(D - N_{oi}) \cdot \left(1 - \frac{q_i}{S_i}\right)}{q_i} \quad (2.6)$$

Donde r_{ei} corresponde al rojo efectivo del semáforo ubicado en la intersección S , para el movimiento de los vehículos provenientes de la rampa de salida y de la calle de servicio. De esta forma se puede programar el semáforo para que las colas no excedan el punto P .

La segunda forma que se propone en Salas (2006) corresponde a la instalación de un semáforo en el punto P para los vehículos provenientes de la calle de servicio. Para calcular los tiempos de este semáforo se utiliza una variación de la solución en el caso anterior y se aplica de manera iterativa, ya que Q_p y x_p dependen de v_{ep} y C .

$$r_{ei} < \frac{(L - N_{op}) \cdot \left(1 - \frac{q_p}{S_i}\right)}{q_p} \quad (2.7)$$

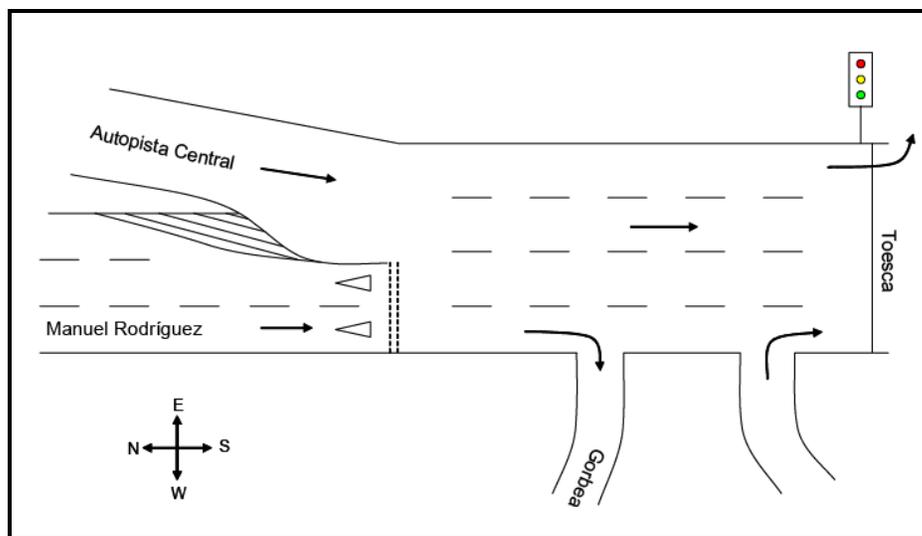
Luego, en el trabajo de Salas (2006) se hizo un análisis de un caso práctico, para el cual se seleccionó la salida hacia Toesca de la Autopista Central. El problema más importante que se detectó en esta salida es la formación de colas que se extienden incluso hasta la misma autopista. Estas colas interfieren con el flujo que circula por la autopista, lo cual es un problema grave.

Utilizando la expresión (2.6) se determinó que el tiempo del semáforo en aquel caso era el suficiente para que las colas no llegaran al punto donde finalizaba la rampa de salida, por lo cual se concluyó que en ese caso el problema no era el semáforo.

Por otro lado, a partir de las observaciones realizadas en terreno se detectaron los siguientes problemas que sí explican los conflictos observados:

- El número de pistas de la calle de servicio (3 pistas) es en exceso superior al número de pistas de la rampa de salida de la autopista (1 pista). Esto hace que en la práctica los vehículos que salen de la autopista pierdan la prioridad que por diseño poseen.
- Existía un flujo importante de vehículos que realizaban el movimiento de viraje a la izquierda luego de salir de la rampa en la intersección con Toesca. Este flujo no tiene suficiente espacio para almacenarse, lo que genera una cola de vehículos que, en muchas ocasiones, se extiende hasta la salida misma de la autopista.

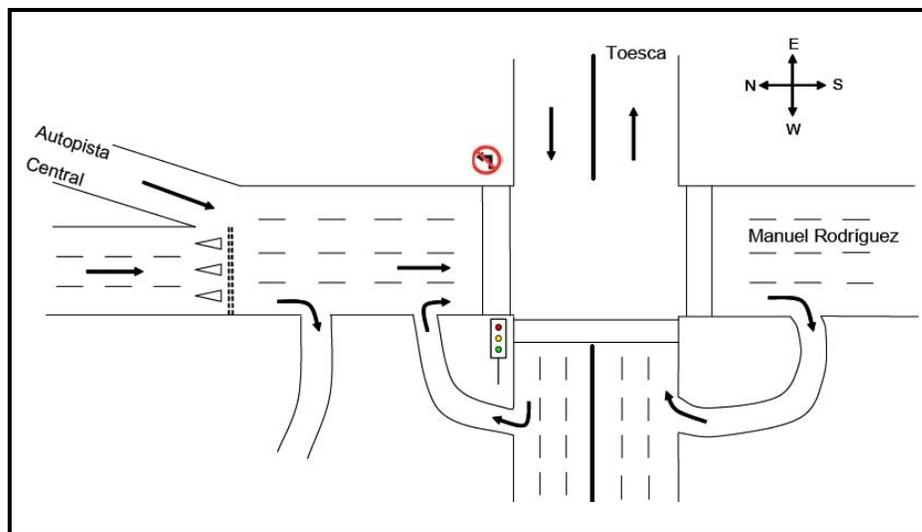
Finalmente, en Salas (2006) se proponen dos medidas para mitigar los problemas identificados. La primera de ellas corresponde a un ensanche de la salida de la autopista, quitando una pista a la calle de servicio, tal como se presenta en la Figura 2-30.



Fuente: Salas (2006)

Figura 2-30: Ensanche de salida de autopista

La segunda medida que se propone es la prohibición del viraje a la izquierda en Toesca, luego de la rampa de salida, de modo de eliminar las colas que se generan y se propagan hacia la rampa de salida. Para que los vehículos puedan realizar este movimiento se propone hacer un trébol luego de la intersección, tal como que se propone en la Figura 2-31.



Fuente: Salas (2006)

Figura 2-31: Trébol para eliminar viraje a la izquierda

La primera investigación con datos en congestión fue realizada por Sandoval y Muñoz (2008), en cual se estudió la propagación de colas en la Autopista Central. Se estudió un tramo de 5,5 km. de longitud, el cual contaba con 3 entradas y 4 salidas. Se encontraron 2 cuellos de botella en dicho tramo, uno que se generaba en torno a una rampa de entrada y otro en torno a una rampa de salida.

En el primero de los cuellos de botella existe una cola que crece desde la rampa de salida ubicada al comienzo del tramo la autopista. La cola que se genera inicialmente toma la primera de las tres pistas de la autopista, y posteriormente llega hasta la segunda y tercera, con lo que finalmente se bloquea la autopista.

Esta cola se propaga en la autopista hacia aguas arriba y se junta con otra cola, originada por el segundo cuello de botella, la cual que se origina por la interacción entre los vehículos que ingresan a la autopista y se encuentran con el alto flujo de vehículos que viene en ese momento por la autopista. Ambas colas se unen, al propagarse la primera hacia aguas arriba, ocasionando una nueva caída de capacidad en la descarga de la autopista.

Un análisis más detallado de los datos obtenidos en aquel estudio se presenta en el capítulo 3, donde se hace un análisis de la evolución de la cola que irrumpe desde la rampa de salida y se propaga hacia la autopista. Además, en el capítulo 3 se hace un análisis de la vialidad ubicada en torno a la rampa de salida, para así determinar su influencia en la formación de la cola.

2.5 Análisis y discusión de estudios

A lo largo de este capítulo fueron presentadas las principales investigaciones que han estudiado el tráfico en torno a rampas de salida de autopistas urbanas. Éstas se basan principalmente en el estudio de la evolución y propagación de colas desde rampas de salida hacia la autopista, mientras que las causas de este tipo de colas no han sido estudiadas mayormente, por lo cual no existen muchos estudios prácticos en los cuales se implementen medidas de mitigación para evitarlas.

Los primeros trabajos presentados son varios estudios teóricos (Daganzo, 1999; Daganzo et al., 1999; Newell, 1999), los cuales entregan conceptos que ayudan a entender la evolución de una cola de este tipo. Sin embargo, estos estudios no son de gran ayuda a generar medidas de mitigación para casos más prácticos, ya que las colas generadas no se comportan de manera ideal como se presenta en estos estudios.

Por otro lado, existen estudios más prácticos donde se realizan análisis gráficos de la evolución de colas generadas en torno a rampas de salida (Muñoz y Daganzo, 2002; Cassidy et al., 2002), para lo cual se utilizan datos reales de colas en autopistas generadas por rampas de salida congestionadas. Sin embargo, éstos se concentran en el estudio de la

propagación de las colas desde la rampa de salida hacia aguas arriba en la autopista, utilizando la herramienta de curvas acumulativas de vehículos en coordenadas oblicuas (Cassidy y Windover, 1995; Daganzo y Muñoz, 2002). No analizan mayormente las causas de la formación de las colas, que ocurren aguas abajo de la rampa de salida y por lo tanto no se concentran en entregar o proponer medidas para prevenir la formación de las colas.

En Chile, antes de la investigación desarrollada por Sandoval y Muñoz (2008) no existían estudios sobre autopistas urbanas con datos en congestión. En el tramo estudiado en aquel trabajo se encontraron dos cuellos de botella: uno en torno a una rampa de entrada y otro a una rampa de salida. Este estudio sirve de base para nuevas investigaciones donde se generen medidas de mitigación a los cuellos de botella encontrados, y así proponer medidas aplicables a otros sitios a estudiar. Es por esto que en este trabajo se utilizan como base los datos de Sandoval y Muñoz (2008).

En Cassidy (2003) se presenta un caso de una configuración similar a la que se tiene en el de Sandoval y Muñoz (2008), con una rampa de salida congestionada y una rampa de entrada ubicada hacia aguas arriba. En aquel estudio se demuestra que cuando hay una rampa de salida congestionada al aplicar *ramp metering* en una rampa de entrada ubicada aguas arriba aumenta la proporción de vehículos destinados a la rampa de salida congestionada, aumentando la congestión. Por lo tanto, se recomienda en estos casos enfocarse en medidas de mitigación en torno a la rampa de salida que presenta problemas de congestión y después aplicar *ramp metering*. Por esta razón, y las recomendaciones del trabajo de Sandoval y Muñoz (2008), es que este trabajo se concentró en medidas de mitigación en la rampa de salida congestionada en aquel estudio.

Son pocos los estudios en los cuales se han investigado y propuesto medidas de mitigación en torno a rampas de salida. En Hagen et al. (2006) se proponen algunas medidas, como por ejemplo el mejoramiento de la programación de semáforos o reasignar el uso de pistas en las intersecciones ubicadas inmediatamente aguas abajo de rampas de salida. También se proponen algunas medidas que requieren tecnologías más avanzadas (*TDM*, *ATIS*, *ATMS*). En Daganzo et al. (2002) se proponen otras medidas, como asignación a pistas según destino de los viajeros, diferenciando entre los que desean salir de la autopista y los

que quieren seguir directo por la autopista, para lo cual se genera una zona donde se prohíbe el cambio de pista, previo a la rampa de salida. Otra medida que se propone es la gestión dinámica de rampas de salida, lo cual consiste en cerrar selectivamente ciertas rampas de salida congestionadas y desviar el tráfico que desea salir de la autopista hacia otras rampas que no se encuentren congestionadas.

3. ANÁLISIS PREVIO DEL LUGAR DE ESTUDIO

3.1 Preliminares

En el presente capítulo se hace un detallado análisis del sitio de estudio en el cual se enfocarán los análisis en la presente investigación. Éste fue estudiado previamente en Sandoval y Muñoz (2008) y nuevamente será utilizada una sección de ese tramo para realizar los experimentos en este trabajo. En aquel estudio se encontró un cuello de botella debido a una rampa de entrada y uno a una rampa de salida. En esta investigación se analizará en detalle aquella rampa de salida.

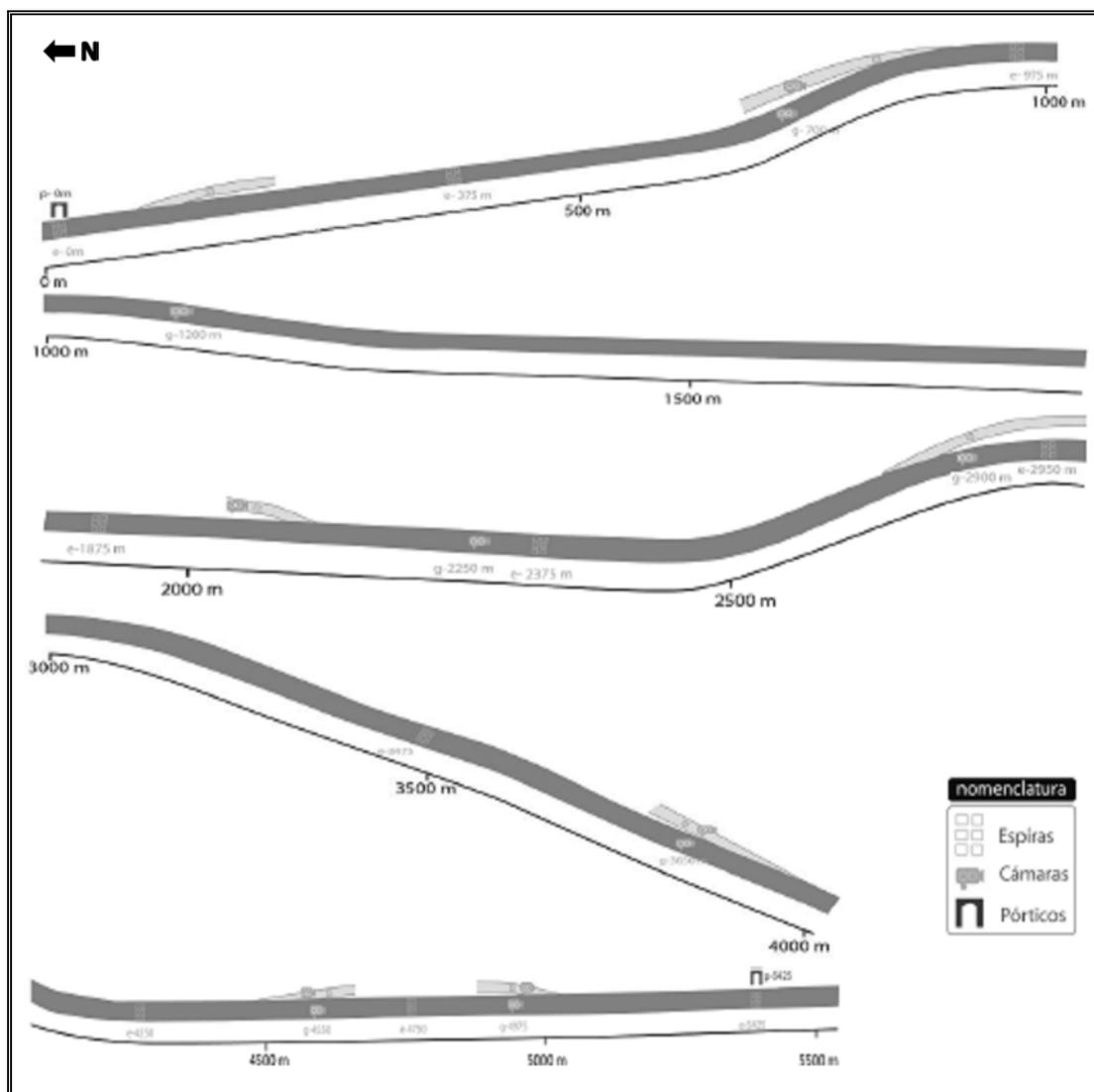
En primer lugar se hace una descripción de la ubicación y de la vialidad en torno a la rampa de salida. Posteriormente se hace un análisis a partir de los datos obtenidos en la investigación realizada por Sandoval y Muñoz (2008) para así obtener en mayor detalle la evolución de la cola que se originaba en torno a la rampa de salida.

Luego de estudiar la evolución de la cola en la autopista, se hace un análisis del tráfico en torno a la rampa de salida, el cual circula por las calles adyacentes a esta. Así se intenta determinar las causas de la formación de la cola para ver de que manera gestionar de tráfico en torno a la rampa de salida para hacer más expedita la salida de los vehículos de la autopista. Todos estos análisis servirán de base para el diseño del experimento a realizar en esta investigación, el cual se presenta en el capítulo 4.

3.2 Descripción del sitio de estudio

3.2.1 Ubicación de la rampa de salida

La rampa de salida donde se efectuará el experimento en este trabajo es la salida de la Autopista Central en sentido sur norte hacia la calle Santa Isabel, ubicada en la ciudad de Santiago de Chile. Esta rampa de salida corresponde al punto de grabación g-900 en el estudio realizado por Sandoval y Muñoz (2008), cuyo tramo de estudio se muestra en la Figura 3-1.



Fuente: Sandoval y Muñoz (2008)

Figura 3-1: Mapa tramo de estudio en Autopista Central

El km. 0 es el punto ubicado más hacia aguas abajo en el tramo de estudio. Se indican los puntos donde se obtuvieron datos de grabación (g), espiras (e) y pórticos (p), donde además se indica la distancia en metros con respecto al km. 0.

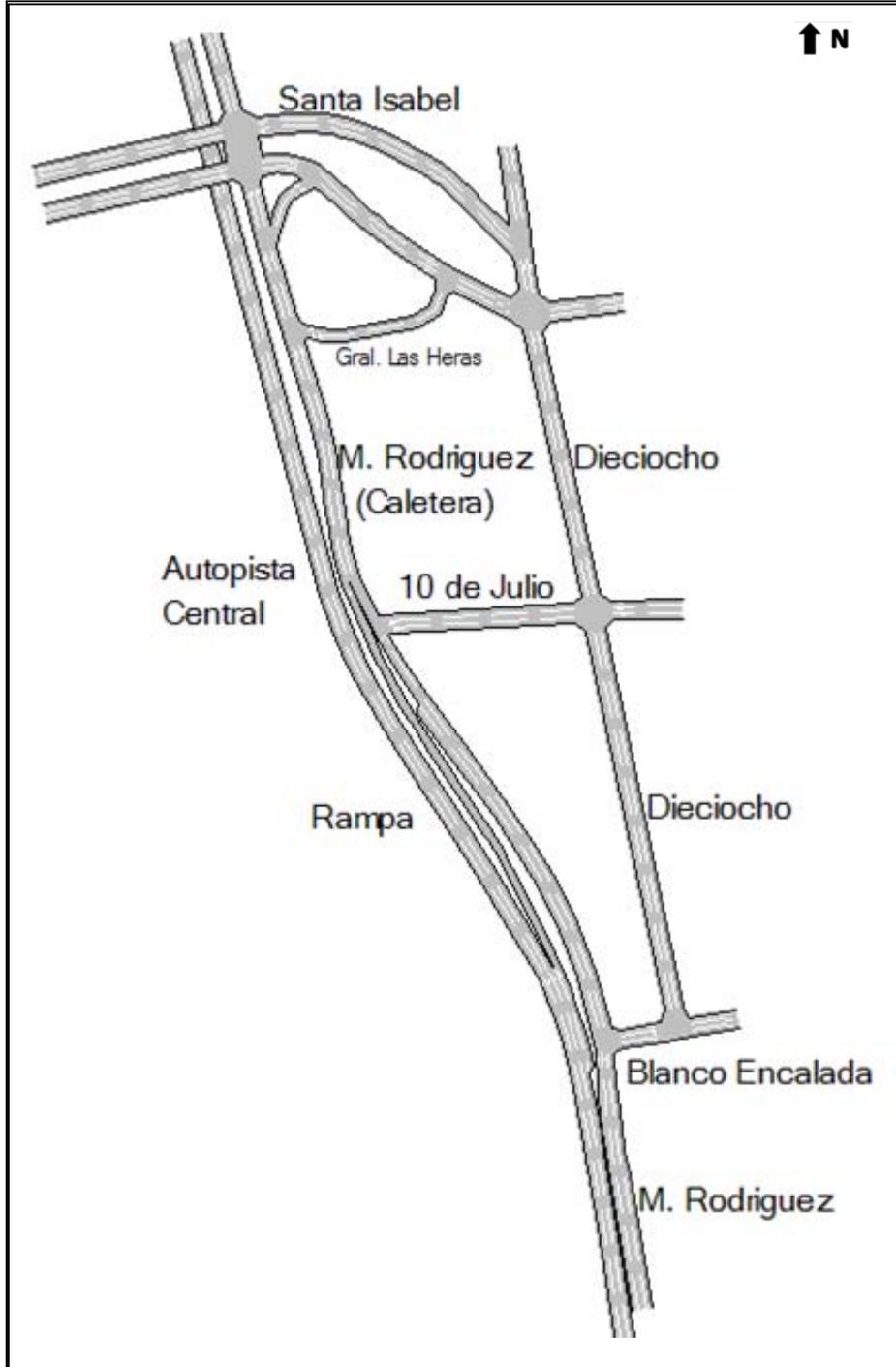
3.2.2 Vialidad en torno a la rampa de salida

La Autopista Central posee una caletera que tiene el nombre de Manuel Rodríguez que va paralela a esta. La autopista está ubicada en un nivel inferior al resto de la vialidad, por lo que las rampas de entrada y de salida de la autopista son en bajada y subida, respectivamente. En la Figura 2-1 se presenta el detalle de la vialidad en torno a la rampa de salida, en la cual se muestra la caletera y el resto de las calles que serán consideradas en este estudio.

La calle Santa Isabel cruza perpendicularmente a la autopista a desnivel y al cruzar la caletera hay una intersección semaforizada. Tiene tres pistas en las que el tráfico va de poniente a oriente. Luego hay otra intersección semaforizada al llegar a la calle Dieciocho. Entre Dieciocho y la caletera existe un tramo de Santa Isabel con sentido de oriente a poniente en el cual también existen tres pistas.

Dieciocho es una calle paralela a la caletera con tráfico de sur a norte, comienza antes de la rampa de salida en la calle Blanco Encalada. Cuenta con tres pistas y uno de sus costados se utiliza como banda de estacionamientos. La calle Blanco Encalada posee tres pistas y tiene tráfico de poniente a oriente.

Finalmente, Diez de Julio cruza la calle Dieciocho en una intersección semaforizada y llega a la caletera un poco antes que la rampa de salida. Al llegar a la caletera tiene un ceda el paso hacia los vehículos que vienen por la caletera. Esta calle tiene tráfico en sentido de oriente a poniente y también posee tres pistas.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-2: Vialidad adyacente a rampa de salida hacia Santa Isabel

3.3 Análisis de la evolución de la cola desde la rampa de salida

En esta sección se hace una extensión del análisis realizado por Sandoval y Muñoz (2008) sobre la cola que irrumpía desde la salida hacia Santa Isabel y se propagaba a través de la autopista.

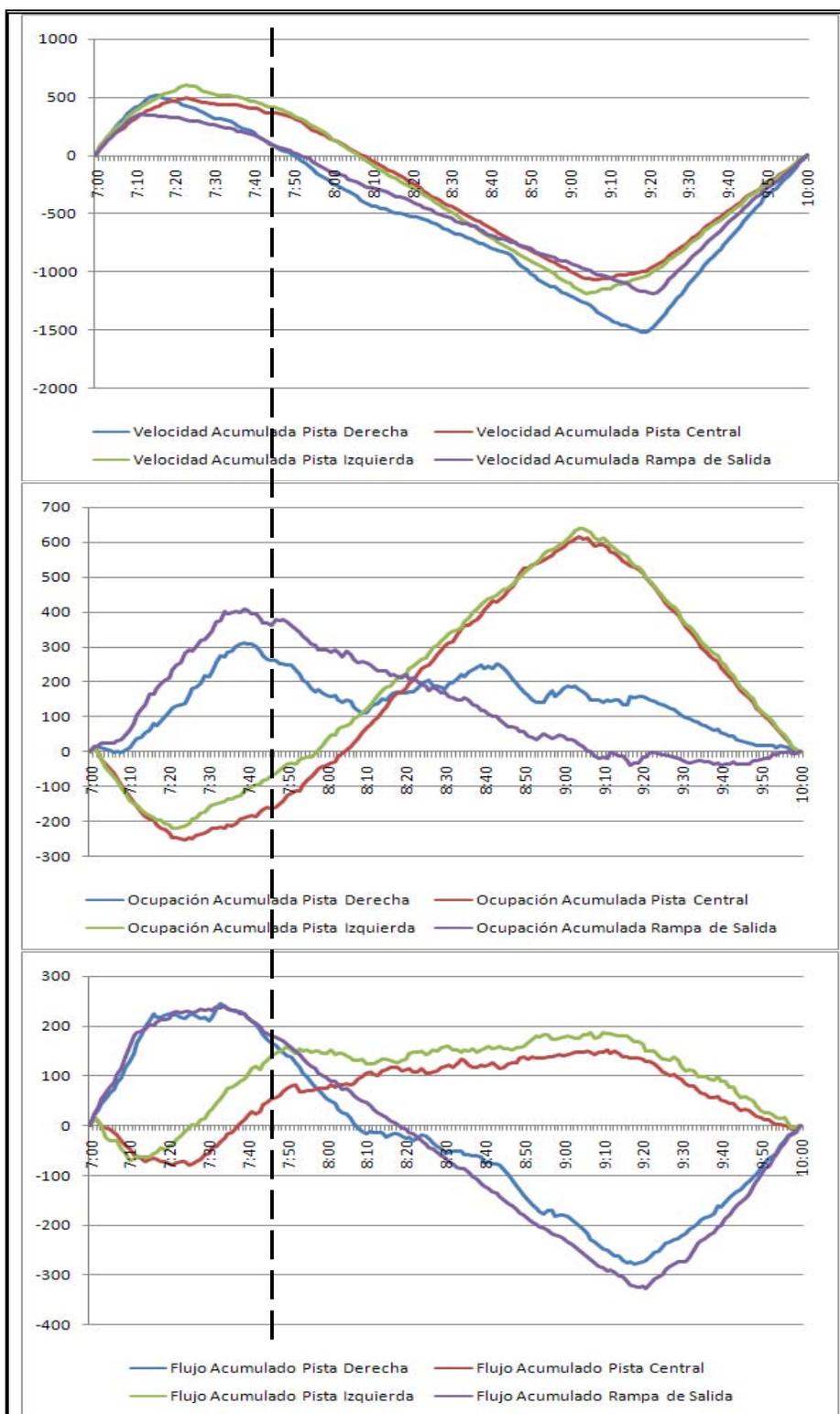
En aquel estudio se realizaron mediciones durante 3 días en los cuales se podían obtener datos representativos de tráfico:

- Martes 9 de Octubre de 2007
- Jueves 11 de Octubre de 2007
- Miércoles 17 de Octubre de 2007

En este caso el análisis se centrará en el segundo día de grabación, debido a que el primer día no se pudo grabar en la salida hacia Santa Isabel, por lo que hay dos puntos sin datos. Los resultados obtenidos en todos los días de grabación son igualmente consistentes por lo que no hay problema en tomar los datos de otro día.

Para ver la evolución de cola que se propagaba desde la salida hacia Santa Isabel en primer lugar se hizo un análisis de velocidad, ocupación y flujo acumulados por pista en la espira e-975 (Ver Figura 3-1) y en la rampa de salida para el primer día de grabaciones. Ahora se hace este mismo análisis cuyos gráficos se presentan en la Figura 3-3.

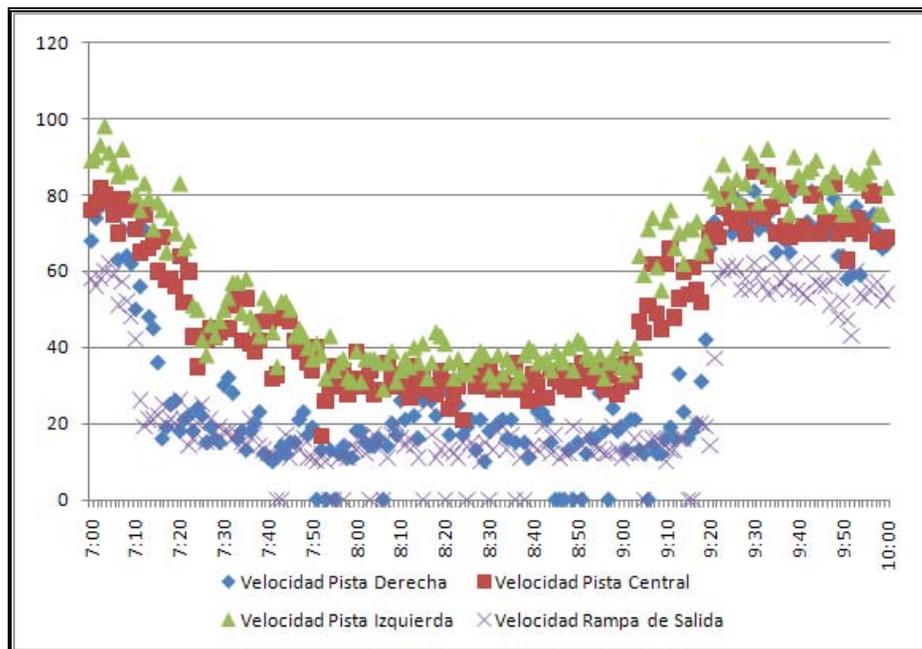
Al igual que en los gráficos realizados para el primer día de grabación en Sandoval y Muñoz (2008) se observa que cerca de la 7:10 la velocidad cae en la rampa de salida, lo que indica que se activó el cuello de botella. A las 7:50, hora que se marca en el gráfico con una línea discontinua, el flujo de la segunda y tercera pista caen y las velocidades de las 3 pistas son similares, lo que indica que hay un régimen de cola *FIFO*. La posible explicación a esto es que al propagarse la cola por la primera pista, se comienza a expandir a las otras pistas por las interacciones de vehículos y cambios de pista para evitar la cola que proviene de la rampa de salida.



Fuente: Elaboración propia con datos de Sandoval y Muñoz (2008)

Figura 3-3: Velocidad, ocupación y flujo acumulados en espira e-975

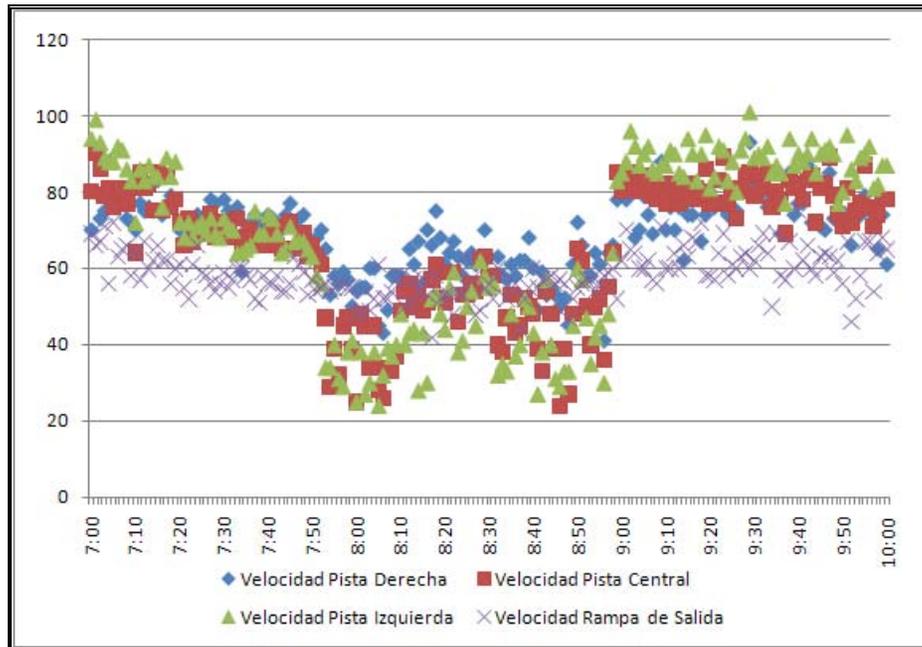
Para complementar lo anterior, se graficó en el tiempo el promedio de velocidades por pista agregadas al minuto para el mismo día. En la Figura 3-4 se observan las velocidades para la espira e-975 (Ver Figura 3-1). Se observa que a lo largo de la duración del cuello las velocidades bajan sucesivamente desde la rampa de salida hacia la pista derecha, la más cercana a la rampa de salida, y luego se propaga hacia las otras pistas. En la rampa de salida y en la pista derecha se observan las mayores disminuciones de velocidad, mientras que en las pistas restantes las reducciones de velocidad son similares.



Fuente: Elaboración propia con datos de Sandoval y Muñoz (2008)

Figura 3-4: Velocidades por pista en espira e-975

Por otro lado, para apreciar la propagación de la cola hacia aguas arriba, se graficó la misma serie de velocidades en una espira ubicada hacia aguas arriba. En la Figura 3-5 se presenta el mismo gráfico anterior para la espira e-1875 (Ver Figura 3-1), donde se observa que la disminución de velocidades durante el período en que se forma la cola es menor que en el punto anterior, pero igualmente se observan efectos del cuello de botella.

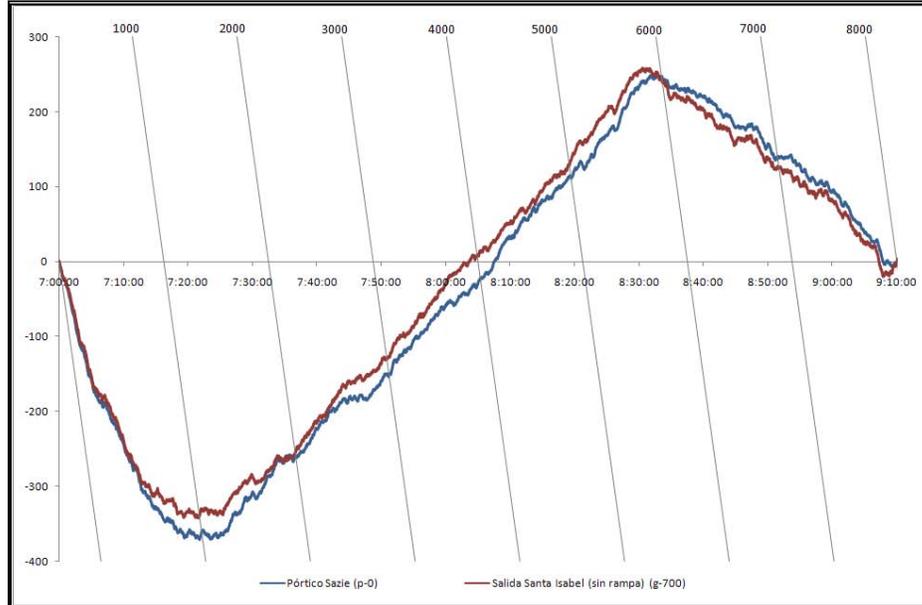


Fuente: Elaboración propia con datos de Sandoval y Muñoz (2008)

Figura 3-5: Velocidades por pista en espira e-1875

Finalmente, a partir de conteos al segundo de los videos que se filmaron en la ocasión, se realizaron gráficos en coordenadas oblicuas del número acumulado de vehículos entre diferentes puntos de la autopista, gráficos con los que se puede corroborar lo mencionado anteriormente. Para realizar estos gráficos se aplicó la corrección en tres subperíodos de la manera explicada en el punto 2.2.2 del presente documento.

En primer lugar, en la Figura 3-6 se presentan las curvas para la primera parte del tramo, aguas abajo de la rampa de salida, entre la espira e-0 y el punto de grabación g-700 (Ver Figura 3-1). Las curvas están juntas en casi todo el período de estudio, de donde se puede afirmar que no existe congestión aguas abajo de la rampa de salida. En el período final, cuando disminuye el flujo en el gráfico, existe un pequeño entrecruzamiento entre las curvas, lo que puede deberse a pequeños errores de conteo y/o a que los datos son de fuentes distintas, espiras en el primer punto y video en el segundo. Sin embargo, este gráfico confirma que el conteo realizado es consistente con los datos de espiras de la autopista.



Fuente: Elaboración propia con datos de Sandoval y Muñoz (2008)

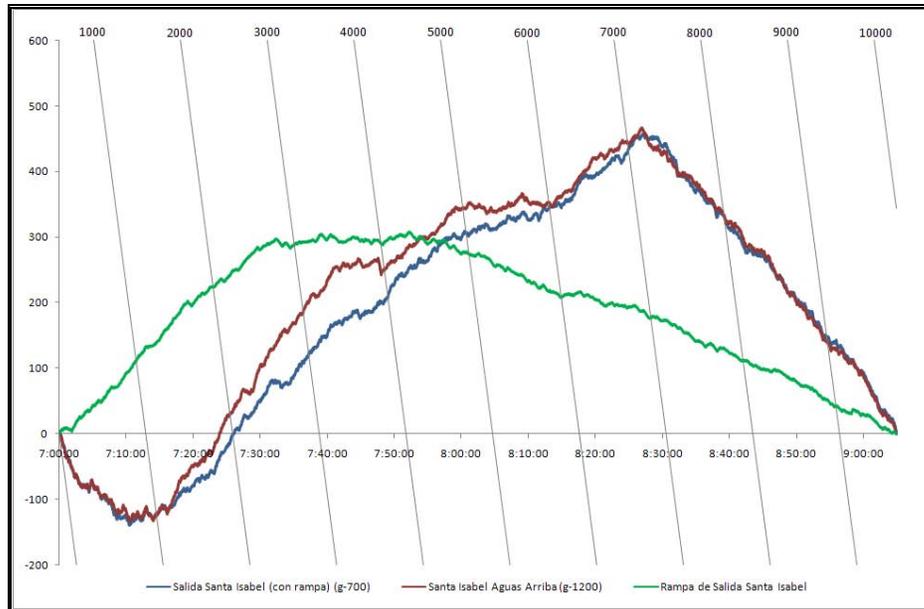
Figura 3-6: Curvas acumuladas de vehículos entre puntos e-0 y g-700

Luego, en la Figura 3-7 se presentan las curvas entre la rampa de salida y un punto intermedio en la autopista hacia aguas arriba de ésta antes de la siguiente rampa de salida, correspondientes a los puntos de grabación g-700 y g-1200, respectivamente (Ver Figura 3-1). Adicionalmente se presenta la curva acumulada de vehículos en la rampa de salida hacia Santa Isabel.

Cerca de las 7:15 comienza a aumentar la acumulación de vehículos en el tramo de la autopista. Por otro lado, el flujo en la rampa de salida llega a su máximo aproximadamente entre 7:30 y 7:40, lo que indica que en ese momento se activa el cuello de botella. Se puede ver que en ese período la congestión en la autopista aumenta considerablemente.

Luego de esto, entre 7:50 y 8:00 comienza a bajar el flujo en la rampa de salida, lo que coincide con la disminución la acumulación de vehículos en la autopista. Cerca de las 8:10 ya casi no hay cola en la autopista y luego de eso se acumulan pocos vehículos en la autopista hasta que a las 8:30 ya no hay más cola y el flujo de la autopista finalmente cae.

El flujo en la autopista antes de la activación del cuello de botella es de 4100 veh/hr y luego de la activación de este es de 3900 veh/hr, lo que representa una caída de un 4,9%.

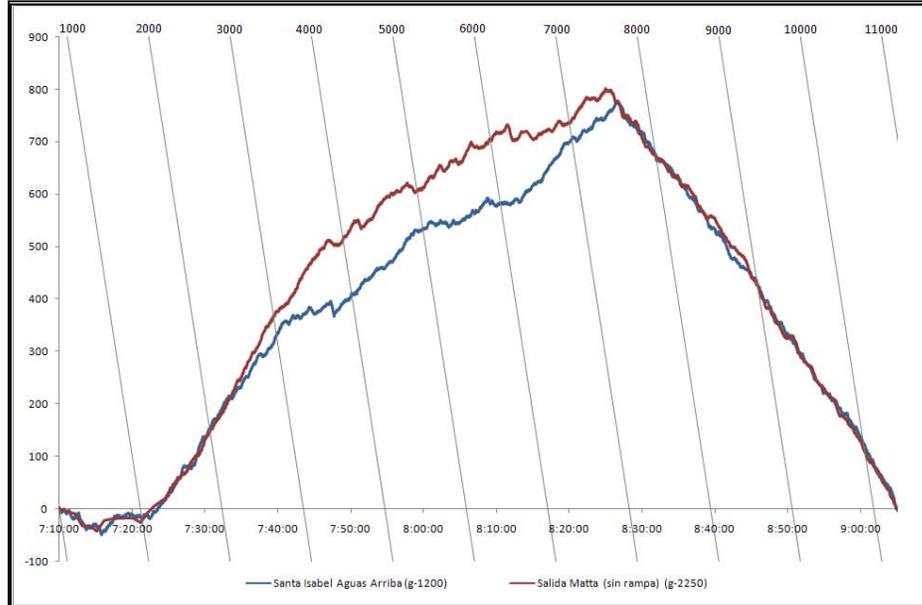


Fuente: Elaboración propia con datos de Sandoval y Muñoz (2008)

Figura 3-7: Curvas acumuladas de vehículos entre puntos g-700 y g-1200

En la Figura 3-8 se muestra el número acumulado de vehículos acumulados entre el último de los puntos anteriores y la salida a Av. Matta, ubicada hacia aguas arriba en el tramo (puntos g-1200 y g-2250, respectivamente, ver Figura 3-1). En este gráfico se observa un claro período de congestión entre 7:30 y 8:30, debido a que aumenta la acumulación de vehículos en el tramo.

Esto último coincide con el gráfico anterior, en el que se tiene el mismo período de congestión, lo que muestra claramente que la cola que se genera en la rampa de salida se propaga hacia aguas arriba. Finalmente, al igual que en el tramo anterior el flujo de la autopista comienza a caer a partir de las 8:30.



Fuente: Elaboración propia con datos de Sandoval y Muñoz (2008)

Figura 3-8: Curvas acumuladas de vehículos entre puntos g-1200 y g-2250

3.4 Análisis del tráfico en torno a la rampa de salida

En esta sección se hace un análisis del tráfico en torno a la rampa de salida de la Autopista Central hacia Santa Isabel, para determinar en terreno las causas de la formación de la cola que se propaga hacia la autopista. El análisis que aquí se presenta está basado principalmente en observaciones en terreno.

3.4.1 Observaciones en terreno

En sección 3.2.2 se presentó la vialidad que hay en torno a la rampa de salida, la cual se puede ver en la Figura 2-1. En la Figura 3-9 se presenta una imagen aérea de la rampa de salida desde la autopista hacia la caletera de la autopista. Se indican los movimientos de vehículos presentes en la intersección: los vehículos que salen por la rampa de salida, los que provienen de la caletera Manuel Rodríguez y los que vienen de la calle 10 de Julio.



Fuente: Elaboración propia en base a Google Maps

Figura 3-9: Vista aérea de rampa de salida hacia Santa Isabel



Fuente: Elaboración propia en base a Google Maps

Figura 3-10: Vista aérea de intersección entre Manuel Rodríguez y Santa Isabel

En la Figura 3-10 se presenta una vista aérea de la intersección entre la caletera Manuel Rodríguez, donde se indican los sentidos de circulación de los vehículos. Todos los movimientos están permitidos, excepto los virajes a la izquierda desde el Puente Toesca (Santa Isabel) hacia la caletera.

Las observaciones en terreno se centraron en el tramo entre ambas intersecciones, lugar donde se originaba la cola que luego se propagaba hacia la autopista. También fue considerada la calle Dieciocho, paralela a la caletera, debido a la posibilidad de que pueda utilizarse en las medidas de gestión a implementar.

3.4.2 Conteos de tráfico

Para complementar las observaciones en terreno se realizaron conteos de tráfico en las 4 intersecciones presentes en la Figura 2-1. Las mediciones fueron realizadas durante días de semana representativos para obtener datos de tráfico entre 7:00 y 9:30. A continuación se presenta un resumen de los flujos medidos, cuyo completo detalle se presenta en el Anexo A. En la Tabla 3-1 se presentan los flujos medidos en la rampa de salida, junto a la intersección entre Manuel Rodríguez y 10 de Julio.

Tabla 3-1: Flujos medidos en rampa de salida e intersección M. Rodríguez/10 de Julio

Calle/Movimiento	Autos (veh/hr)	Buses (veh/hr)	Camiones (veh/hr)
Rampa de salida	862	50	19
Manuel Rodríguez	553	24	25
10 de Julio	208	1	9

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3-2 se presentan los flujos para la intersección entre Manuel Rodríguez y Santa Isabel. El ciclo del semáforo es de 100 segundos, con 43 segundos para Manuel Rodríguez y 49 para Santa Isabel. Los restantes 8 segundos corresponden a entreverdes para cada etapa, con 3 segundos de amarillo y 1 de rojo-rojo.

Tabla 3-2: Flujos medidos en intersección Manuel Rodríguez/Santa Isabel

Calle	Movimiento	Autos (veh/hr)	Buses (veh/hr)	Camiones (veh/hr)
Manuel Rodríguez	Directo	962	75	42
	Derecha	594	0	10
	Izquierda	68	0	2
Sta. Isabel al Oriente	Directo	1912	48	34
Sta. Isabel al Poniente	Directo	286	45	0
	Derecha	371	0	0

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3-3 se presentan los flujos para la intersección entre Santa Isabel y Dieciocho. El ciclo del semáforo es de 100 segundos, con 60 segundos para Santa Isabel y 32 para Dieciocho. En la Tabla 3-4 se presentan los flujos para la intersección entre Dieciocho y 10 de Julio. El ciclo del semáforo es de 100 segundos, con 14 segundos para Dieciocho y 78 para 10 de Julio. En ambos casos los entreverdes son iguales que en el semáforo restante.

Tabla 3-3: Flujos medidos en intersección Santa Isabel/Dieciocho

Calle	Movimiento	Autos (veh/hr)	Buses (veh/hr)	Camiones (veh/hr)
Santa Isabel	Directo	1291	45	30
	Izquierda	621	4	4
Dieciocho	Directo	1088	40	3
	Derecha	84	17	2

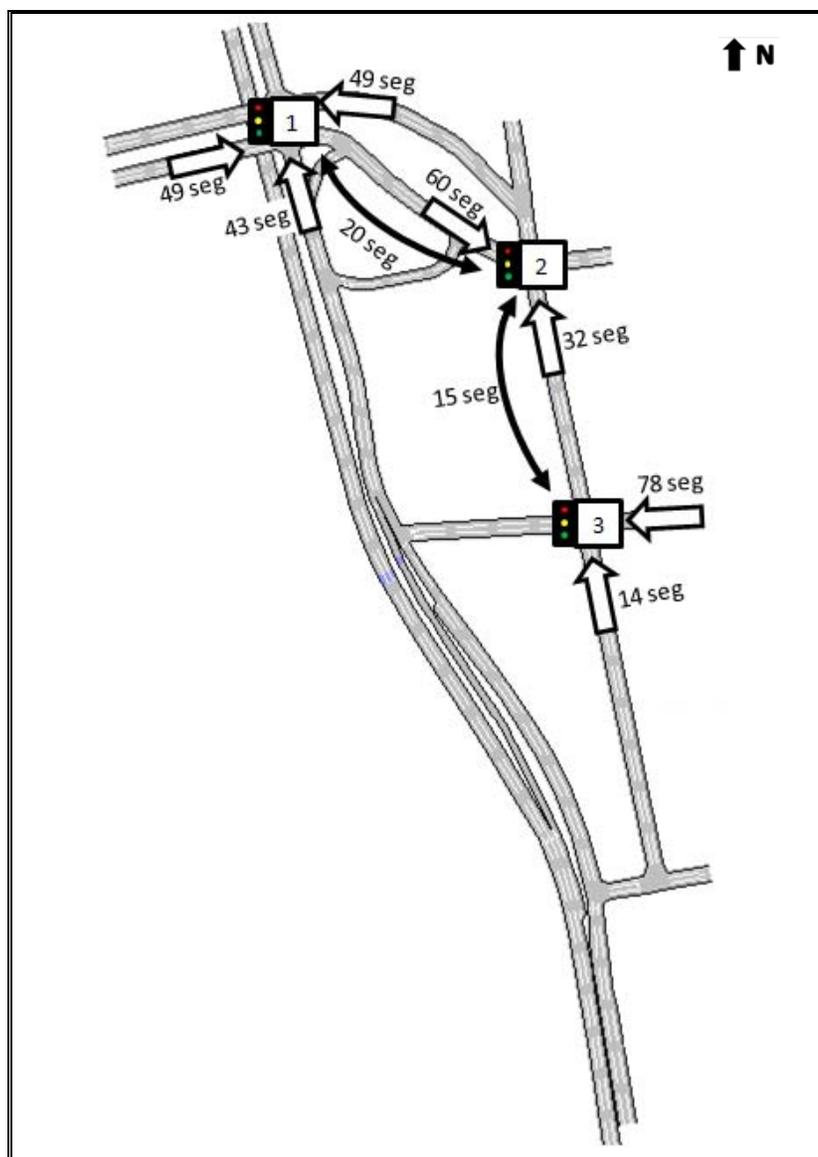
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-4: Flujos medidos en intersección Dieciocho/10 de Julio

Calle	Movimiento	Autos (veh/hr)	Buses (veh/hr)	Camiones (veh/hr)
Dieciocho	Directo	126	0	0
	Izquierda	23	0	0
10 de Julio	Directo	186	1	9
	Derecha	1046	57	5

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la Figura 3-11 se presenta un esquema de la ubicación de los semáforos, junto con los tiempos de verde y los desfases entre semáforos. El desfase entre los semáforos 1 (Manuel Rodríguez/Santa Isabel) y 2 (Dieciocho/Santa Isabel) está calculado entre las fases 2 (en sentido Poniente-Oriente) de cada semáforo y entre los semáforos 2 y 3 (Dieciocho/10 de Julio) entre las fases 1 (en sentido Sur-Norte).



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-11: Tiempos de verde y desfases de semáforos

3.4.3 Factores que influyen en formación de cola

A partir de las observaciones en terreno y los conteos realizados se atribuyó que la formación de la cola se debía principalmente a los siguientes factores:

a) Semáforo ubicado en la intersección entre Manuel Rodríguez y Santa Isabel

El primer factor al cual se atribuyó la formación de la cola era la existencia del semáforo ubicado en la intersección de Santa Isabel y Manuel Rodríguez. Esto provoca que los tanto los vehículos de la rampa de salida como de la caletera deban detenerse aguas abajo de la salida.

En este caso, debido a que los flujos provenientes de Santa Isabel son mayores que los de Manuel Rodríguez es difícil que el semáforo pueda ser optimizado de manera de darle mayor tiempo a Manuel Rodríguez.

Sin embargo un factor que si puede ser mejorado son los bloqueos que ocurren en algunos instantes, debido a que algunos vehículos que circulan por Santa Isabel intentan cruzar con verde sin tener espacio y se quedan detenidos bloqueando a Manuel Rodríguez, tal como se puede ver en la Figura 3-12.

Otro factor que puede influir es que, a pesar de que existe una pista de viraje a la derecha desde Manuel Rodríguez hacia Santa Isabel, su bajo radio de giro no es suficiente para el alto flujo que vira hacia la derecha en esa intersección. Esto provoca que se bloquee la pista más cercana a la pista de viraje, tal como se puede ver en la Figura 3-13.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-12: Bloqueo de Santa Isabel sobre Manuel Rodríguez



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-13: Pista de Viraje de Manuel Rodríguez hacia Santa Isabel

b) Entrecruzamiento de vehículos provenientes de rampa de salida y calles laterales

Un factor observado en terreno que contribuye a la formación de la cola es el entrecruzamiento de vehículos provenientes de la rampa de salida y los que venían de Manuel Rodríguez y 10 de Julio, generando una sección de entrecruce entre la rampa de salida y el semáforo ubicado en la intersección con Santa Isabel.

En su mayoría, los vehículos que venían de la autopista intentaban cambiarse de pista hacia las pistas derechas mientras que en muchos casos los otros vehículos intentaban cambiarse hacia la pista izquierda. En la Figura 3-14 se puede ver una secuencia de imágenes del entrecruzamiento de algunos vehículos.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-14: Entrecruzamiento de vehículos luego de rampa de salida

Un factor que contribuye a que el entrecruzamiento de vehículos sea mayor es la ausencia de una señal de ceda el paso para los vehículos que provienen de Manuel Rodríguez y 10 de Julio. Ambos flujos sumados son de casi la misma magnitud que el flujo de vehículos que salen de la autopista por la rampa. Adicionalmente, los vehículos que vienen de las calles laterales poseen dos pistas de acceso contra una que poseen los vehículos de la rampa de salida.

Estos dos factores contribuyen a que la salida de la autopista ocurra de manera más lenta, con lo que cola originada por el entrecruzamiento de vehículos crece mayoritariamente hacia la autopista y no hacia la caletera, tal como se puede ver en la Figura 3-15.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-15: Cola generada en rampa de salida hacia Santa Isabel

3.5 Otros aspectos de la vialidad en torno a la rampa de salida

En las observaciones en terreno se encontró que la calle Dieciocho, paralela a la caleterera presentaba niveles muy bajos de flujo en comparación con ésta. La capacidad de esta calle es similar a la de la caleterera, no es la misma porque existen autos estacionados en los costados y porque el pavimento se encuentra en peor estado debido a la gran cantidad de grietas. En la Figura 3-16 se puede ver una vista general de esta calle a la misma hora en que la caleterera se encuentra congestionada.

Dada la gran capacidad disponible y que no esta siendo utilizada, esta calle puede ser utilizada como alternativa para los vehículos en las medidas de mitigación que se presenten en este estudio.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-16: Vista de la calle Dieciocho

4. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

4.1 Preliminares

En este capítulo se presenta en primer lugar el diseño del experimento a realizar en esta investigación. Basado en el análisis realizado en el capítulo anterior se estudiará a través del desvío de vehículos de la caletera y 10 de Julio por la Dieciocho en cuanto se mejoran las condiciones de operación de la autopista y en la rampa de salida. En la Figura 3-9 se puede observar un esquema con los desvíos propuestos, indicando la ruta actual de vehículos y la ruta que seguirán los vehículos desviados.

El experimento consiste en dos partes: primero se realiza una simulación en AIMSUN de diferentes medidas de mitigación para ver las mejoras que se producen en la red con su implementación y obtener índices de desempeño para seleccionar la que presenta mayores mejoras en la autopista y obtener algún indicador de cuánto esperar cuando se implemente en terreno.

En la segunda parte del experimento se implementa en terreno la medida que entrega mejores índices de rendimiento, de manera de obtener evidencia empírica de su funcionamiento y adicionalmente contrastar los resultados con los obtenidos con la situación simulada.

4.2 Diseño de alternativas

A partir del análisis previo desarrollado en el capítulo 3 se diseñarán diferentes alternativas de medidas de mitigación para evitar la formación de la cola. Luego estas medidas serán simuladas en AIMSUN para determinar cuales presentan mayores índices de mejora en la red de modelación. Las alternativas se agrupan en tres tipos de medidas:

a) Mejoras de infraestructura en la rampa de salida

En este punto se propone realizar mejoras de infraestructura en la rampa de salida, tales como aumentar el largo de la rampa o aumentar su número de pistas.

b) Gestión en intersección ubicada aguas abajo de la rampa de salida

En este punto se propone realizar una optimización al semáforo de la intersección ubicada inmediatamente aguas abajo de la rampa de salida o aumentar la capacidad de la pista de viraje a la derecha, considerando que dicho movimiento es el que realizan la mayoría de los vehículos que salen de la autopista por la rampa.

c) Reducción de demanda en calles adyacentes a la rampa de salida

En este punto se propone la ubicación de señales de prioridad, como ceda el paso o disco pare, para los vehículos que provienen de las calles adyacentes a la rampa de salida y luego se entrecruzan con los provenientes de la rampa de salida. También se proponen cierres parciales de calles, de modo de reducir o eliminar la interacción de vehículos en la sección de entrecruce.

4.3 Simulación en AIMSUN

Para realizar una simulación en AIMSUN es necesaria una serie de etapas para crear la red de modelación y realizar las simulaciones. Además, existen diferentes indicadores para obtener los resultados de cada simulación, los cuales se presentan a continuación.

4.3.1 Codificación de la red

Esta etapa consiste en la creación de la red, donde se ingresan todos los datos necesarios para poder realizar las simulaciones. Para esto son necesarios los siguientes elementos:

- i) Arcos de la red
- ii) Intersecciones de la red
- iii) Flujos en la red
- iv) Rutas de transporte público en la red
- v) Programaciones de semáforo en la red

La codificación de arcos e intersecciones en la red se realiza de manera gráfica sobre una base de AUTOCAD, donde primero se codifican los arcos y luego se utilizan las intersecciones para unir los arcos y definir los movimientos que realizan los vehículos.

Los flujos pueden ser ingresados a través de matrices, para lo cual es necesario definir Orígenes y Destinos en la red, o a través de flujos en los arcos de entrada a la red y porcentajes de viraje en las intersecciones de la red.

Las rutas de transporte público se ingresan sobre la base gráfica de la red, donde se definen las ubicaciones de los paraderos y las frecuencias de las líneas de transporte público.

Las programaciones de semáforo se ingresan en cada una de las intersecciones semaforizadas, indicando el ciclo del semáforo, el tiempo de verde para cada fase y los entreverdes.

Adicionalmente, se pueden definir rutas estadísticas sobre la base gráfica de la red, las cuales entregan indicadores de rendimiento sobre la ruta para todos los vehículos que circulan por ella. Así, es posible obtener estadísticas de desempeño para rutas específicas, adicionales a las estadísticas que entrega AIMSUN por arco y a nivel agregado

4.3.2 Calibración de la red

Esta etapa consiste en replicar las condiciones de operación de la red, modificando parámetros de comportamiento de los vehículos de modo de que las simulaciones se ajusten a lo observado en terreno. De esta manera se obtienen las condiciones actuales de operación de la autopista, de modo de tener una base de comparación para cuando se implementen los desvíos propuestos.

Existen varios estudios en los cuales se calibra AIMSUN para una determinada realidad, en este caso se utilizarán los estudios de Velasco (2004), Lacalle (2003) y Espinoza (2004), en los cuales se calibra AIMSUN para la realidad del tráfico chileno.

4.3.3 Simulación de medidas de mitigación

Esta parte consiste en simular la implementación de las diferentes medidas de mitigación de manera de comparar con la situación base, lo cual se puede realizar a través de los siguientes indicadores:

- i) Visualización gráfica: AIMSUN presenta de manera gráfica el comportamiento de los vehículos en la red y se puede comparar entre dos situaciones simuladas.
- ii) Estadísticas de simulaciones: AIMSUN entrega estadísticas de los siguientes indicadores de rendimiento en la red:
 - Flujo
 - Velocidad
 - Tiempo de viaje
 - Demora
 - Tiempo de parada
 - Número de paradas
- iii) Gráficos en coordenadas oblicuas: a partir de detectores ubicados en la red se pueden realizar conteos de vehículos en diferentes puntos, para así realizar gráficos del número acumulado de vehículos en coordenadas oblicuas y determinar con las acumulaciones de vehículos entre puntos de conteos y determinar si hubo congestión.

4.4 Selección de mejor alternativa

Basados principalmente en las estadísticas de las simulaciones se seleccionará la mejor alternativa entre las diferentes medidas simuladas, para luego implementar la medida en terreno.

4.5 Implementación de mejor alternativa en terreno

Esta parte del experimento consiste en la replicación de las mediciones realizadas en Sandoval y Muñoz (2008), pero con la implementación de la mejor medida de mitigación simulada en AIMSUN.

En dicho trabajo se realizaron gráficos en coordenadas oblicuas mostrando la evolución de la cola que se generaba en la autopista, y además se contó con datos de espiras y pórticos de la Autopista Central.

4.5.1 Replicación de mediciones anteriores implementando medidas

En el experimento realizado en Sandoval y Muñoz (2008) se realizaron grabaciones en video de 7 puntos del tramo presentado en la Figura 3-1. En este caso las mediciones se realizarán en 3 de los 7 puntos, los cuales son suficientes para determinar la evolución en la formación de la cola que se genera en la rampa de salida hacia Santa Isabel y así comparar la medida de mitigación implementada con lo observado recurrentemente en la rampa mencionada.

Los puntos en los cuales se ubicaron las cámaras de video para realizar las grabaciones En Sandoval y Muñoz (2008) corresponden a:

- g-700: ubicada en la azotea de un edificio en dirección hacia el norte, desde donde se observa la rampa de salida y las 3 pistas de la autopista. (Ver Figura 3-9 (a))
- g-1200: ubicada en la azotea del mismo edificio anterior pero en dirección hacia el sur, desde donde se puede observar las 3 pistas de la autopista. (Ver Figura 3-9 (b))
- g-2250: ubicada en la vereda norte de la calle Rondizzoni sobre la Autopista Central, en dirección hacia el norte, desde donde se puede observar la rampa de salida hacia Avenida Matta. (Ver Figura 3-9 (c))



Fuente: Videos de Sandoval y Muñoz (2008)

Figura 4-1: Vista desde video en punto de grabación: (a) g-700, (b) g-1200 y (c) g-2250

4.5.2 Gráficos en coordenadas oblicuas a partir de videos

A partir de conteos de vehículos en los puntos mencionados anteriormente se pueden realizar los gráficos acumulados de vehículos entre ellos, tal como los que se presentan en la Figura 3-7 entre los puntos g-700 y g-1200 y en la Figura 3-8 entre los puntos g-1200 y g-2250. De esta manera se pueden comparar ambas situaciones y determinar las mejoras que se producen en la autopista por la medida implementada.

4.5.3 Datos de espiras y pórticos.

Utilizando información de espiras y pórticos de la autopista se puede obtener información de ocupación, velocidad y flujos. Con esta información, se pueden construir gráficos acumulados de estos indicadores similares a los que se presentan en la Figura 3-3 o gráficos del promedio de velocidades por pista agregadas al minuto como los que se presentan en la Figura 3-4 y Figura 3-5.

5. PROCESAMIENTO DE DATOS Y RESULTADOS

5.1 Preliminares

En este capítulo se presenta el procesamiento de datos realizado para obtener los resultados de la investigación. En primer lugar se presenta los resultados de la simulación en AIMSUN, para el cual se presenta la codificación de la red, el proceso de calibración y las simulaciones realizadas para los diferentes esquemas de medidas de mitigación propuestos. Luego se presentan los resultados de la implementación de la mejor medida en terreno.

5.2 Simulación en AIMSUN

5.2.1 Codificación de la red de modelación

Se codificó la red en AIMSUN considerando la vialidad descrita en la sección 3.2.2 del presente documento. El mapa de la red presentado en la Figura 3-2 corresponde a la red codificada en AIMSUN.

Se cargaron a la red los flujos presentados en la sección 3.4.2. En el Anexo B se presenta en detalle los flujos y porcentajes de viraje ingresados en la red. Además se utilizó información del estudio realizado por Sandoval y Muñoz (2008) para tener datos precisos del flujo en la autopista.

Se construyeron las líneas de transporte público que circulan actualmente en la red, agrupando líneas que dentro de la red realizan el mismo recorrido. Con las frecuencias medidas en terreno se calculó el intervalo que fue ingresado en AIMSUN. En el Anexo C se presentan las líneas de transporte público presentes en la red, junto con el cálculo de las frecuencias e intervalos entre buses.

Adicionalmente, se utilizaron rutas estadísticas para obtener indicadores de desempeño de la red.

5.2.2 Proceso de calibración de AIMSUN

Se calibró el modelo AIMSUN de acuerdo a los parámetros calibrados para Chile y luego fue necesario realizar una corrección de los flujos de entrada para tener menor error en ciertos flujos más relevantes en la red.

a) Calibración de parámetros

Con los flujos ingresados en la red y los parámetros calibrados para el caso chileno por Velasco (2004), Lacalle (2003) y Espinoza (2004), que se indican en el punto 2.2.5 del presente documento, se obtuvo una red base de modelación.

Luego de ingresar los parámetros calibrados para Chile se encontró que las colas observadas en la red no eran similares a las que efectivamente ocurrían en la realidad. Se variaron diferentes parámetros sin mayores cambios en la red excepto en el caso de Máxima Aceleración, el cual fue ajustado de la manera presentada en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1: Ajuste de parámetros en AIMSUN

MÁXIMA ACELERACIÓN	MEDIA	DESV. EST.	MÍN.	MÁX.
Valor Calibración Velasco (2004)	2,57	0,70	1,36	5,80
Valor Ajustado	3,20	1,00	2,00	5,80

Fuente: Elaboración propia en base a Velasco (2004)

Luego de esta modificación se observó una mejora considerable en la similitud entre las colas simuladas y las observadas en terreno y en los videos de la investigación de Sandoval y Muñoz (2008).

Sin embargo, en ciertos puntos de la red seguían observándose algunas diferencias en los flujos entre las simulaciones y la realidad, por lo que se debió hacer una corrección en algunos flujos de entrada y porcentajes de viraje. El detalle se presenta en la siguiente sección.

b) Corrección de flujos de entrada

Para corregir los flujos de entrada se realizó adaptación del proceso utilizado por Velasco (2004), en el cual se calibraba la red utilizando las colas medidas en terreno.

Se utilizaron los flujos en lugar de las colas como variable a comparar, modificando los datos de entrada de la red hasta obtener flujos similares y una disminución de la diferencia global de flujos en la red.

Se optó esta modificación dada la imposibilidad de medir en terreno las colas en algunos puntos de la red debido a su gran magnitud, como por ejemplo las colas en la caletera desde el semáforo hasta la rampa de salida y las colas en la calle Santa Isabel.

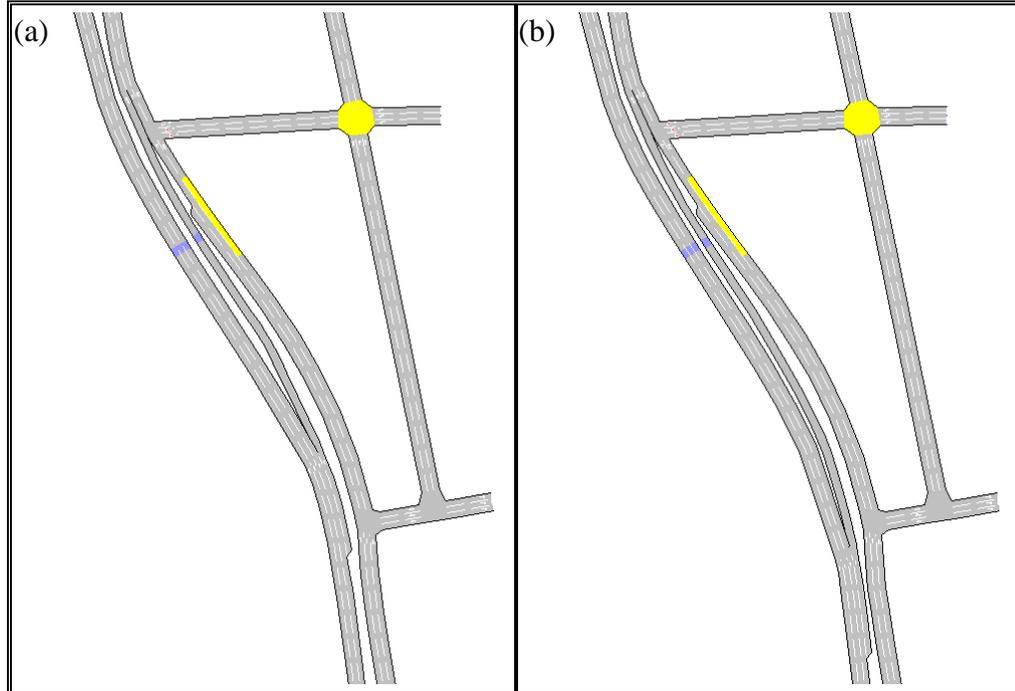
Los flujos y porcentajes de viraje luego de aplicar estos cambios se encuentran en el Anexo B. Luego de aplicar la calibración y la corrección de flujos el error global en los flujos de la red bajó de un 16% a un 7%. El detalle de los errores por punto de medición y período se presentan en el Anexo D. Se intentó disminuir este error, pero no fue posible, por lo que se adoptó esta situación calibrada como situación base.

5.2.3 Simulación de medidas de mitigación en AIMSUN

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones en AIMSUN de los esquemas propuestos en la sección 4.2. Los resultados se presentan según los grupos de medidas mencionados en dicha sección.

a) Mejoras de infraestructura en la rampa de salida

La primera medida simulada de mejora de infraestructura fue el aumento del largo de la rampa de salida en 50 metros hacia aguas arriba. En la Figura 5-1 se presenta una comparación de la rampa de salida en la situación base y la rampa alargada.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-1: Comparación de rampa de salida: (a) situación base y (b) aumento de largo

En la Tabla 5-2 se presentan estadísticas con diferentes indicadores de rendimiento de la red, los cuales entregan los resultados de las simulaciones implementando la medida. Se observa que en todos los indicadores se observan mejoras comparando los resultados con la simulación base. Cabe mencionar que en la columna de los porcentajes se presenta en verde cuando se trata de una mejora en el indicador, como un aumento de velocidad o una disminución de tiempo de viaje, y rojo en el caso de que el indicador empeore.

Adicionalmente, se puede afirmar que prácticamente no existen efectos negativos al implementar la medida, dado que las mayores diferencias que se observan son de un 3%. Al ver la simulación de manera gráfica, se observa que hay una mayor capacidad de almacenamiento en la rampa de salida, lo que provoca las mejoras en la red.

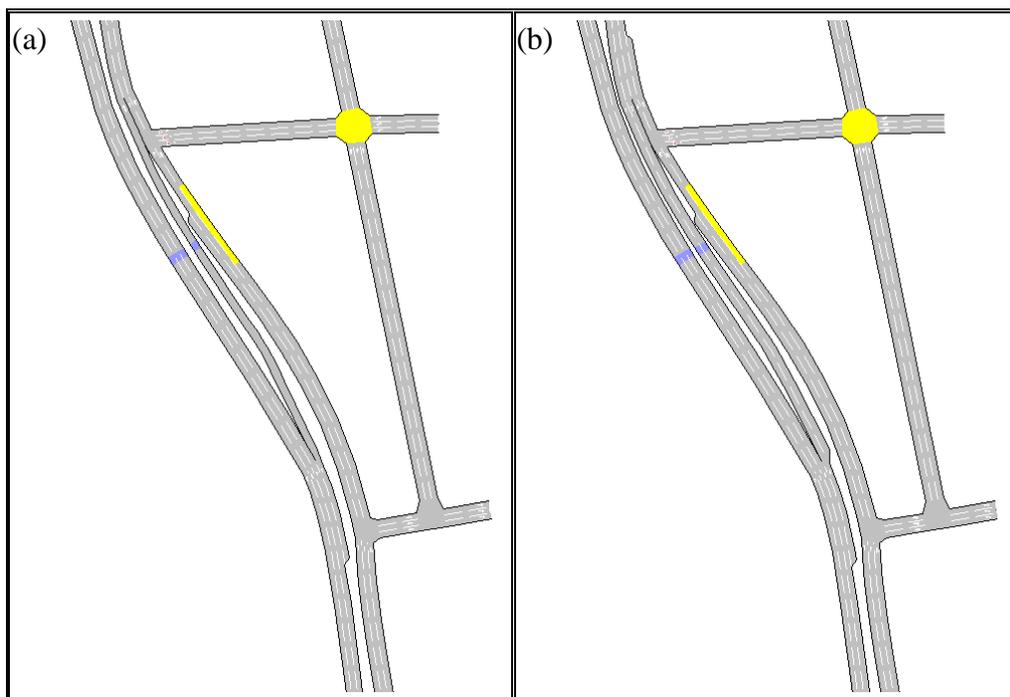
Tabla 5-2: Estadísticas aumento de largo rampa de salida

	Flujo [veh/hr]			Velocidad [km/hr]			Tiempo de viaje [min:seg]		
	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %
Rampa de salida	716	741	4%	15,3	16,4	7%	06:04	05:58	-2%
Autopista Directo	3021	3090	2%	41,9	45,8	9%	02:14	02:01	-10%
Caletera	712	694	-3%	10,4	11,4	10%	04:54	04:11	-15%
Dieciocho	939	947	1%	13,9	13,8	-1%	01:40	01:40	-1%
Santa Isabel	1385	1388	0%	10,7	10,7	0%	02:17	02:17	0%
10 de Julio	1067	1074	1%	12,3	12,4	1%	02:28	02:12	-11%
Total Red	6837	6927	1%	25,5	27,6	8%	02:52	02:41	-6%
	Demora [min:seg]			Tiempo de parada [min:seg]			Número de paradas [paradas/km]		
	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %
Rampa de salida	05:18	05:11	-2%	03:58	03:54	-2%	10,4	10,2	-2%
Autopista Directo	01:40	01:27	-13%	00:49	00:41	-15%	4,1	3,3	-20%
Caletera	04:18	03:35	-17%	04:02	03:17	-19%	4,3	4,3	1%
Dieciocho	01:20	01:19	-1%	01:03	01:02	-1%	2,1	2,1	1%
Santa Isabel	01:59	01:59	0%	01:35	01:36	0%	3,7	3,7	0%
10 de Julio	02:07	01:51	-12%	01:50	01:34	-15%	2,5	2,5	1%
Total Red	02:22	02:11	-8%	01:41	01:33	-9%	4,5	4,1	-8%

Fuente: Elaboración propia

Luego se simuló el aumento a dos pistas en la rampa de salida, lo cual se representa en la Figura 5-2, comparado con la simulación base. En este caso, tal como se ve en la Tabla 5-3, se observan mayores mejoras en los índices de rendimiento a nivel agregado en la red que en la medida simulada anteriormente.

Sin embargo, los índices de rendimiento en 10 de Julio, Dieciocho, y especialmente en la caletera empeoran considerablemente. Esto se debe a que en este caso para mejorar las condiciones de la autopista es necesario darle prioridad en la caletera a los vehículos que salen de la autopista. Esta intervención exige que ahora sean 4 pistas las que desemboquen en las 3 pistas de la caletera, por lo que debe dejarse 2 éstas para el flujo de la rampa, dejando sólo una para paso directo desde la caletera. Evidentemente esto provoca que empeoren los índices de rendimiento en los otros puntos de la red.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-2: Comparación de rampa de salida: (a) situación base y (b) aumento a 2 pistas

Tabla 5-3: Estadísticas aumento a 2 pistas de rampa de salida

	Flujo [veh/hr]			Velocidad [km/hr]			Tiempo de viaje [min:seg]		
	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %
Rampa de salida	716	1031	44%	15,3	16,1	5%	06:04	05:21	-12%
Autopista Directo	3021	3823	27%	41,9	58,8	40%	02:14	01:16	-43%
Caletera	712	350	-51%	10,4	9,1	-12%	04:54	08:23	71%
Dieciocho	939	743	-21%	13,9	12,6	-9%	01:40	01:57	16%
Santa Isabel	1385	1444	4%	10,7	11,2	5%	02:17	02:11	-4%
10 de Julio	1067	867	-19%	12,3	11,6	-6%	02:28	03:01	22%
Total Red	6837	7479	9%	25,5	36,3	43%	02:52	02:27	-15%
	Demora [min:seg]			Tiempo de parada [min:seg]			Número de paradas [paradas/km]		
	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %
Rampa de salida	05:18	04:35	-13%	03:58	03:31	-12%	10,4	6,7	-36%
Autopista Directo	01:40	00:42	-58%	00:49	00:05	-89%	4,1	0,8	-81%
Caletera	04:18	07:49	82%	04:02	07:35	88%	4,3	4,5	5%
Dieciocho	01:20	01:37	21%	01:03	01:19	26%	2,1	2,4	14%
Santa Isabel	01:59	01:53	-5%	01:35	01:30	-6%	3,7	3,5	-7%
10 de Julio	02:07	02:40	26%	01:50	02:22	29%	2,5	2,8	12%
Total Red	02:22	01:55	-19%	01:41	01:20	-21%	4,5	2,5	-44%

Fuente: Elaboración propia

b) Gestión en intersección ubicada aguas abajo de la rampa de salida

La primera medida simulada en la intersección ubicada inmediatamente aguas abajo de la rampa de salida fue la optimización del semáforo que se ubica en dicha intersección, presentado como semáforo 1 en la Figura 3-11. Se fue ampliando el tiempo de verde de los vehículos de la caletera para darles mayor prioridad, sin alterar el largo del ciclo del semáforo pues se encuentra coordinado en red con otros semáforos.

Esta medida se implementó evaluando incrementos sucesivos de 5 segundos por simulación hasta determinar un valor óptimo. Se encontró que al adicionar 20 segundos al tiempo de los vehículos de la caletera se maximizan las mejoras de los indicadores de rendimiento para la red. Las estadísticas de los índices de rendimiento en la red en esta etapa de la optimización se presentan en la Tabla 5-4.

Tabla 5-4: Estadísticas Optimización Semáforo

	Flujo [veh/hr]			Velocidad [km/hr]			Tiempo de viaje [min:seg]		
	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %
Rampa de salida	716	1019	42%	15,3	29,3	91%	06:04	03:15	-47%
Autopista Directo	3021	3625	20%	41,9	58,2	39%	02:14	01:25	-37%
Caletera	712	723	1%	10,4	20,3	96%	04:54	02:39	-46%
Dieciocho	939	912	-3%	13,9	10,7	-23%	01:40	02:41	61%
Santa Isabel	1385	1132	-18%	10,7	7,9	-26%	02:17	02:53	27%
10 de Julio	1067	1048	-2%	12,3	10,9	-11%	02:28	02:44	11%
Total Red	6837	7501	10%	25,5	37,0	45%	02:52	02:10	-24%
	Demora [min:seg]			Tiempo de parada [min:seg]			Número de paradas [paradas/km]		
	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %
Rampa de salida	05:18	02:28	-53%	03:58	01:31	-62%	10,4	4,4	-58%
Autopista Directo	01:40	00:51	-49%	00:49	00:16	-66%	4,1	1,1	-73%
Caletera	04:18	02:03	-52%	04:02	01:44	-57%	4,3	3,4	-21%
Dieciocho	01:20	02:21	77%	01:03	02:03	94%	2,1	2,8	36%
Santa Isabel	01:59	02:35	31%	01:35	02:15	41%	3,7	3,9	5%
10 de Julio	02:07	02:23	13%	01:50	02:04	13%	2,5	3,0	21%
Total Red	02:22	01:38	-31%	01:41	01:06	-35%	4,5	2,3	-49%

Fuente: Elaboración propia

Evidentemente, el efecto negativo de la implementación de esta medida es que los vehículos provenientes de la calle que compite por el verde del semáforo, es decir Santa Isabel, se ven afectados porque a ellos se les disminuye el tiempo de verde. Sin embargo, este efecto es mucho menor que los beneficios que se obtienen en la rampa de salida y en la autopista, lo que se refleja en las mejoras a nivel agregado en la red.

Al agregar 5 segundos más respecto del óptimo al tiempo de verde para la caletera se observan bloqueos en algunos puntos de la red, especialmente en Dieciocho y Santa Isabel. En este caso los efectos negativos sobre estas calles se intensifican, lo que también afecta a la calle 10 de Julio, lo anterior se resume en la Tabla 5-5.

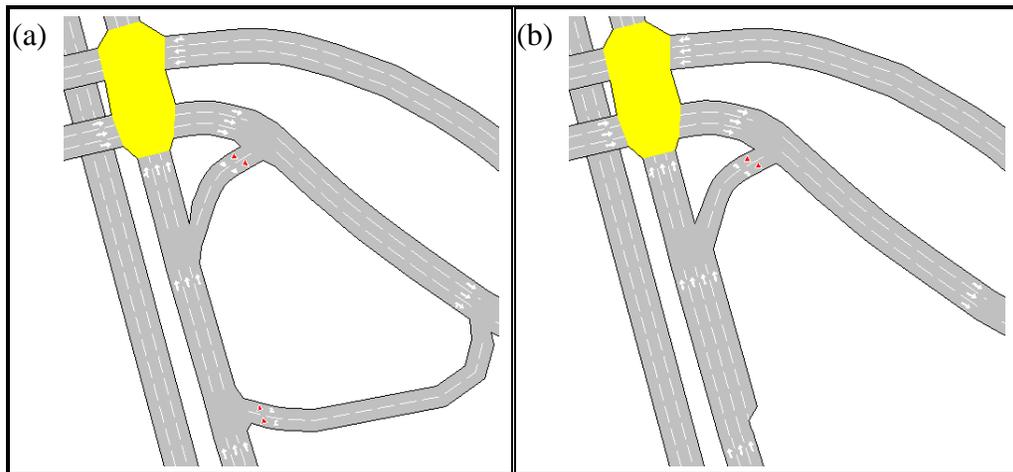
Tabla 5-5: Estadísticas Optimización Semáforo

	Flujo [veh/hr]			Velocidad [km/hr]			Tiempo de viaje [min:seg]		
	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %
Rampa de salida	716	888	24%	15,3	31,8	107%	06:04	03:40	-40%
Autopista Directo	3021	3349	11%	41,9	54,7	31%	02:14	01:47	-20%
Caletera	712	667	-6%	10,4	20,0	93%	04:54	04:29	-9%
Dieciocho	939	731	-22%	13,9	8,5	-39%	01:40	03:54	133%
Santa Isabel	1385	815	-41%	10,7	6,3	-41%	02:17	04:09	82%
10 de Julio	1067	863	-19%	12,3	9,1	-26%	02:28	04:08	68%
Total Red	6837	6530	-4%	25,5	36,6	44%	02:52	02:52	0%
	Demora [min:seg]			Tiempo de parada [min:seg]			Número de paradas [paradas/km]		
	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %
Rampa de salida	05:18	02:53	-45%	03:58	02:03	-48%	10,4	4,0	-61%
Autopista Directo	01:40	01:13	-27%	00:49	00:37	-24%	4,1	1,8	-55%
Caletera	04:18	03:53	-10%	04:02	03:38	-10%	4,3	3,3	-23%
Dieciocho	01:20	03:34	168%	01:03	03:15	209%	2,1	3,6	75%
Santa Isabel	01:59	03:51	95%	01:35	03:32	123%	3,7	3,9	5%
10 de Julio	02:07	03:47	79%	01:50	03:29	89%	2,5	3,8	50%
Total Red	02:22	02:19	-2%	01:41	01:47	6%	4,5	2,7	-40%

Fuente: Elaboración propia

En la etapa anterior de la optimización se observaban ciertos bloqueos en la calle Dieciocho, pero las mejoras a nivel agregado en la red seguían aumentando, lo que no ocurre en este caso.

La segunda medida simulada en la intersección ubicada aguas abajo de la rampa de salida fue la construcción de una pista adicional en la caletera antes de llegar a la pista de viraje hacia Santa Isabel, tal como se presenta en la Figura 5-3, para facilitar el viraje de los vehículos hacia la derecha,.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-3: Comparación de pista de viraje: (a) situación base y (b) pista adicional

Adicionalmente, se eliminó el arco que se utiliza para realizar el viraje a la izquierda desde Santa Isabel hacia la caletera, debido a que este arco prácticamente no se utiliza y los vehículos prefieren llegar hasta la calle Dieciocho, para evitar ingresar a la sección congestionada en la caletera. Al simular esta medida se encontró que existen mejoras a nivel agregado en la red, especialmente para los vehículos provenientes de la rampa de salida y de la autopista, como se puede observar en la Tabla 5-6.

Sin embargo, con esta medida se ven afectados los vehículos provenientes de la caletera y de Santa Isabel. Esto se debe a que se facilita el viraje a la derecha en Santa Isabel para los vehículos provenientes de la rampa de salida, lo que entorpece a los vehículos de la caletera y los vehículos provenientes de Santa Isabel se ven afectados porque hay más vehículos que viran hacia esta calle.

Tabla 5-6: Estadísticas Pista Adicional de Viraje

	Flujo [veh/hr]			Velocidad [km/hr]			Tiempo de viaje [min:seg]		
	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %
Rampa de salida	716	886	24%	15,3	23,6	54%	06:04	04:33	-25%
Autopista Directo	3021	3366	11%	41,9	51,2	22%	02:14	01:42	-23%
Caletera	712	701	-2%	10,4	14,7	42%	04:54	04:14	-14%
Dieciocho	939	940	0%	13,9	14,1	2%	01:40	01:38	-3%
Santa Isabel	1385	1276	-8%	10,7	9,5	-11%	02:17	02:31	10%
10 de Julio	1067	1067	0%	12,3	12,9	5%	02:28	02:13	-10%
Total Red	6837	7237	6%	25,5	31,9	25%	02:52	02:27	-15%
	Demora [min:seg]			Tiempo de parada [min:seg]			Número de paradas [paradas/km]		
	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %
Rampa de salida	05:18	03:46	-29%	03:58	02:41	-33%	10,4	7,0	-32%
Autopista Directo	01:40	01:09	-31%	00:49	00:26	-47%	4,1	2,4	-42%
Caletera	04:18	03:38	-16%	04:02	03:21	-17%	4,3	3,8	-10%
Dieciocho	01:20	01:17	-3%	01:03	01:01	-4%	2,1	2,0	-2%
Santa Isabel	01:59	02:13	12%	01:35	01:48	14%	3,7	4,2	14%
10 de Julio	02:07	01:52	-12%	01:50	01:35	-14%	2,5	2,5	-2%
Total Red	02:22	01:56	-18%	01:41	01:19	-22%	4,5	3,4	-24%

Fuente: Elaboración propia

c) Reducción de demanda en calles adyacentes a la rampa de salida

Se diseñaron diferentes esquemas para reducir la demanda desde la caletera hacia la sección de entrecruce de modo de disminuir o eliminar la interacción de estos vehículos con los provenientes de la rampa de salida. En las primeras simulaciones se incorporó un ceda el paso y un disco pare en la caletera, para dar prioridad a los vehículos de la rampa de salida, pero estas medidas no resultaron efectivas, ya que no observó ningún cambio significativo en la red, tal como se presenta en la Tabla 5-7 para el ceda el paso y en la Tabla 5-8 para el disco pare.

Tabla 5-7: Estadísticas Ceda el Paso

	Flujo [veh/hr]			Velocidad [km/hr]			Tiempo de viaje [min:seg]		
	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %
Rampa de salida	716	707	-1%	15,3	15,0	-2%	06:04	06:10	2%
Autopista Directo	3021	3035	0%	41,9	41,6	-1%	02:14	02:14	0%
Caletera	712	712	0%	10,4	10,6	2%	04:54	04:39	-5%
Dieciocho	939	935	0%	13,9	14,0	1%	01:40	01:39	-1%
Santa Isabel	1385	1392	0%	10,7	10,5	-2%	02:17	02:17	0%
10 de Julio	1067	1061	-1%	12,3	12,4	1%	02:28	02:19	-6%
Total Red	6837	6846	0%	25,5	25,3	-1%	02:52	02:51	-1%
	Demora [min:seg]			Tiempo de parada [min:seg]			Número de paradas [paradas/km]		
	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %
Rampa de salida	05:18	05:23	2%	03:58	04:04	2%	10,4	10,5	1%
Autopista Directo	01:40	01:40	0%	00:49	00:48	-1%	4,1	4,0	-2%
Caletera	04:18	04:03	-6%	04:02	03:46	-6%	4,3	4,4	2%
Dieciocho	01:20	01:19	-1%	01:03	01:02	-1%	2,1	2,1	1%
Santa Isabel	01:59	02:00	1%	01:35	01:36	0%	3,7	3,7	0%
10 de Julio	02:07	01:58	-7%	01:50	01:42	-8%	2,5	2,5	1%
Total Red	02:22	02:21	-1%	01:41	01:40	-1%	4,5	4,4	0%

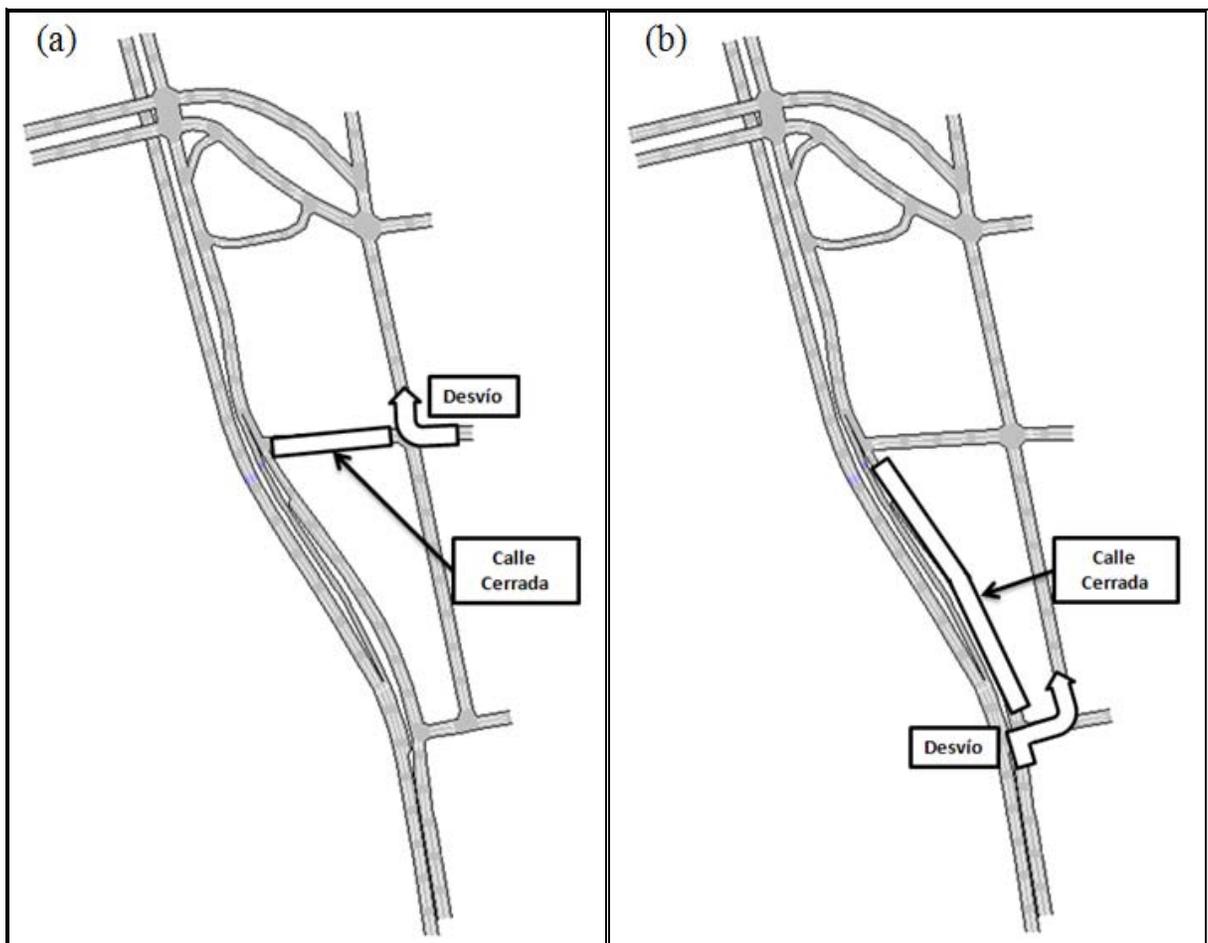
Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-8: Estadísticas Disco Pare

	Flujo [veh/hr]			Velocidad [km/hr]			Tiempo de viaje [min:seg]		
	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %
Rampa de salida	716	714	0%	15,3	15,2	-1%	06:04	06:06	1%
Autopista Directo	3021	3065	1%	41,9	42,0	0%	02:14	02:12	-1%
Caletera	712	719	1%	10,4	10,7	3%	04:54	04:36	-6%
Dieciocho	939	944	1%	13,9	13,7	-2%	01:40	01:42	2%
Santa Isabel	1385	1406	1%	10,7	10,7	0%	02:17	02:16	-1%
10 de Julio	1067	1071	0%	12,3	12,6	2%	02:28	02:18	-7%
Total Red	6837	6914	1%	25,5	25,6	0%	02:52	02:49	-2%
	Demora [min:seg]			Tiempo de parada [min:seg]			Número de paradas [paradas/km]		
	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %
Rampa de salida	05:18	05:20	1%	03:58	04:01	1%	10,4	10,4	0%
Autopista Directo	01:40	01:39	-1%	00:49	00:48	-2%	4,1	4,0	-3%
Caletera	04:18	04:01	-7%	04:02	03:44	-7%	4,3	4,3	1%
Dieciocho	01:20	01:22	2%	01:03	01:04	1%	2,1	2,1	0%
Santa Isabel	01:59	01:58	0%	01:35	01:35	-1%	3,7	3,7	-1%
10 de Julio	02:07	01:57	-7%	01:50	01:41	-9%	2,5	2,5	0%
Total Red	02:22	02:19	-2%	01:41	01:39	-2%	4,5	4,4	-1%

Fuente: Elaboración propia

Luego se simularon cierres parciales de algunas calles para disminuir la demanda en la sección de entrecruce de la caleta. Particularmente se simuló el cierre de las calles 10 de Julio, de la caleta y el cierre de ambas calles en conjunto. En primer lugar se simuló el cierre de la calle 10 de Julio, en el tramo entre Dieciocho y la caleta, tal como se presenta en la Figura 5-4 (a). De esta manera, se elimina el flujo de vehículos que proviene de esa calle e ingresa hacia la caleta en la sección de entrecruce. Los resultados de la simulación de esta medida se presentan en la Tabla 5-9, donde se observa que los resultados son buenos para la red a nivel agregado, especialmente para los vehículos de la autopista, de la rampa de salida y de la caleta.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-4: Cierres parciales de calles: (a) 10 de Julio y (b) caleta

En la Tabla 5-9 se observa que los vehículos de la calle Dieciocho se ven afectados con esta medida porque los vehículos desviados desde 10 de Julio deben circular por esta calle. Los vehículos de la calle 10 de Julio no se ven afectados debido a que ahora no ingresan en la sección de entrecruce de la caletera, que era donde experimentaban sus mayores demoras. A pesar de que las condiciones en la calle Dieciocho ahora son peores, son mejores que las condiciones que experimentaban al ingresar a la caletera.

Tabla 5-9: Estadísticas Cierre 10 de Julio

	Flujo [veh/hr]			Velocidad [km/hr]			Tiempo de viaje [min:seg]		
	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %
Rampa de salida	716	846	18%	15,3	17,0	11%	06:04	05:12	-14%
Autopista Directo	3021	3383	12%	41,9	49,6	19%	02:14	01:44	-22%
Caletera	712	536	-25%	10,4	14,0	35%	04:54	03:22	-31%
Dieciocho	939	1136	21%	13,9	11,9	-14%	01:40	02:01	20%
Santa Isabel	1385	1374	-1%	10,7	10,6	0%	02:17	02:17	0%
10 de Julio	1067	1084	2%	12,3	12,4	1%	02:28	02:00	-19%
Total Red	6837	7347	7%	25,5	29,9	17%	02:52	02:25	-16%
	Demora [min:seg]			Tiempo de parada [min:seg]			Número de paradas [paradas/km]		
	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %
Rampa de salida	05:18	04:25	-17%	03:58	03:07	-21%	10,4	8,2	-21%
Autopista Directo	01:40	01:09	-31%	00:49	00:26	-47%	4,1	2,3	-45%
Caletera	04:18	02:44	-36%	04:02	02:25	-40%	4,3	3,8	-11%
Dieciocho	01:20	01:40	25%	01:03	01:21	29%	2,1	2,5	20%
Santa Isabel	01:59	01:59	0%	01:35	01:36	0%	3,7	3,7	-1%
10 de Julio	02:07	01:40	-21%	01:50	01:21	-26%	2,5	2,5	-1%
Total Red	02:22	01:54	-19%	01:41	01:16	-25%	4,5	3,4	-24%

Fuente: Elaboración propia

Luego se simuló el cierre del tramo de la caletera entre Blanco Encalada y 10 de Julio, justo antes de llegar a la rampa de salida, tal como se presenta en la Figura 5-4 (b). En este caso se observan mejoras a nivel agregado en la red mayores que en el caso del cierre de 10 de Julio, como se observa en la Tabla 5-10. Existen mejoras sustanciales en la red, excepto en los vehículos desviados hacia Dieciocho, que experimentan grandes aumentos en sus demoras.

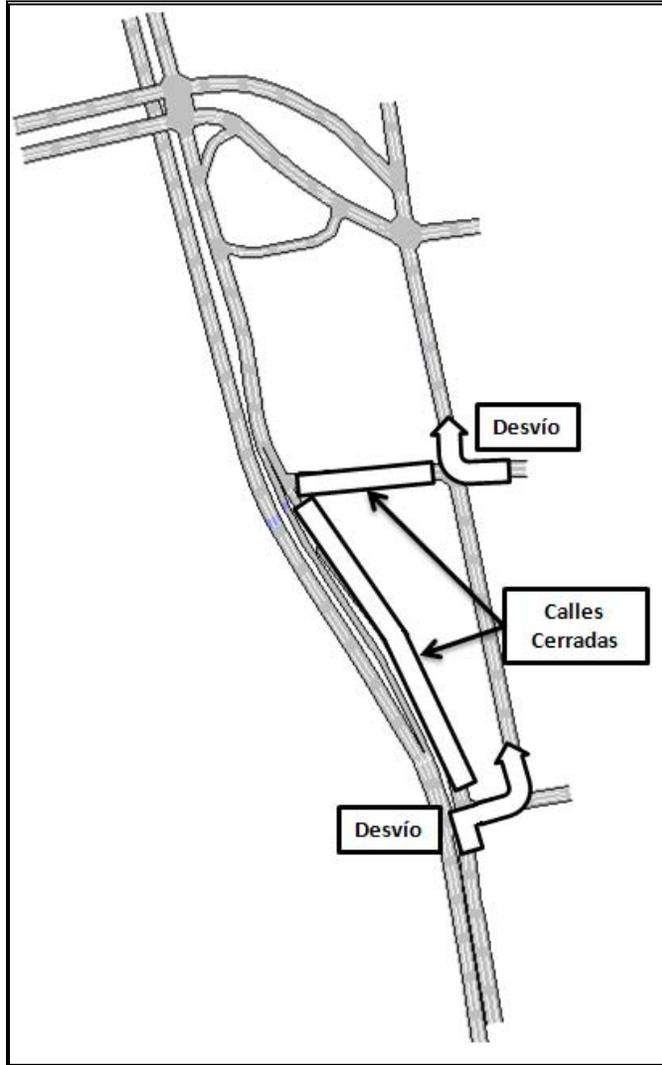
Tabla 5-10: Estadísticas Cierre Caletera

	Flujo [veh/hr]			Velocidad [km/hr]			Tiempo de viaje [min:seg]		
	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %
Rampa de salida	716	1075	50%	15,3	25,0	63%	06:04	03:41	-39%
Autopista Directo	3021	3855	28%	41,9	60,9	45%	02:14	01:13	-45%
Caletera	712	174	-76%	10,4	12,1	16%	04:54	03:01	-39%
Dieciocho	939	1292	38%	13,9	11,4	-18%	01:40	03:42	121%
Santa Isabel	1385	1395	1%	10,7	10,8	2%	02:17	02:15	-1%
10 de Julio	1067	1061	-1%	12,3	12,4	1%	02:28	02:11	-11%
Total Red	6837	8001	17%	25,5	37,4	47%	02:52	02:11	-24%
	Demora [min:seg]			Tiempo de parada [min:seg]			Número de paradas [paradas/km]		
	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %
Rampa de salida	05:18	02:54	-45%	03:58	01:54	-52%	10,4	4,7	-55%
Autopista Directo	01:40	00:39	-61%	00:49	00:06	-88%	4,1	0,6	-84%
Caletera	04:18	02:34	-40%	04:02	02:14	-45%	4,3	3,7	-12%
Dieciocho	01:20	03:17	146%	01:03	02:54	175%	2,1	3,3	59%
Santa Isabel	01:59	01:57	-1%	01:35	01:34	-2%	3,7	3,7	-1%
10 de Julio	02:07	01:50	-13%	01:50	01:31	-17%	2,5	2,4	-4%
Total Red	02:22	01:40	-29%	01:41	01:07	-34%	4,5	2,2	-50%

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se simuló el caso del cierre de ambas calles, lo cual se presenta en la Figura 5-5. En la Tabla 5-11 se presentan los resultados de la simulación para esta medida. Se observa que esta medida entrega una reducción de un 33% de las demoras a nivel agregado en la red. Sin embargo, las demoras en la calle Dieciocho, por la cual circulan los vehículos desviados, aumentan considerablemente, al igual que en el caso del cierre de la caletera.

Para minimizar estos efectos se realizó una optimización manual del semáforo ubicado en la intersección de 10 de Julio con Dieciocho, en la cual se fue aumentando el tiempo de verde para la calle Dieciocho en intervalos de 5 segundos. Se encontró que aumentando 15 segundos se disminuyen considerablemente las demoras sobre esta calle, generando un leve aumento de las demoras en 10 de Julio, que ve reducido su tiempo de verde debido a la optimización. En la Tabla 5-12 se presentan los resultados de la simulación para este último caso. A nivel agregado en la red, las demoras disminuyen en un 51% con la optimización del semáforo con respecto a la simulación base.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-5: Cierre de 10 de Julio y caletera

Tabla 5-11: Estadísticas Cierre de 10 de Julio y caletera

	Flujo [veh/hr]			Velocidad [km/hr]			Tiempo de viaje [min:seg]		
	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %
Rampa de salida	716	1176	64%	15,3	38,1	149%	06:04	01:59	-67%
Autopista Directo	3021	4007	33%	41,9	68,5	63%	02:14	00:59	-56%
Caletera	712	-	-19%	10,4	-	-20%	04:54	-	72%
Dieciocho	939	1333		13,9	9,9		01:40	05:16	
Santa Isabel	1385	1476	7%	10,7	11,1	4%	02:17	02:09	-6%
10 de Julio	1067	1067	0%	12,3	9,2	-25%	02:28	02:32	3%
Total Red	6837	8277	21%	25,5	42,8	68%	02:52	02:06	-27%
	Demora [min:seg]			Tiempo de parada [min:seg]			Número de paradas [paradas/km]		
	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %
Rampa de salida	05:18	01:12	-77%	03:58	00:35	-85%	10,4	1,5	-86%
Autopista Directo	01:40	00:25	-75%	00:49	00:00	-100%	4,1	0,0	-99%
Caletera	04:18	-	86%	04:02	-	93%	4,3	-	5%
Dieciocho	01:20	04:52		01:03	04:30		2,1	3,2	
Santa Isabel	01:59	01:51	-7%	01:35	01:28	-8%	3,7	3,4	-8%
10 de Julio	02:07	02:08	1%	01:50	01:53	2%	2,5	3,0	20%
Total Red	02:22	01:35	-33%	01:41	01:10	-31%	4,5	1,4	-69%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-12: Estadísticas Cierre de 10 de Julio y caletera, Optimización Final

	Flujo [veh/hr]			Velocidad [km/hr]			Tiempo de viaje [min:seg]		
	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %
Rampa de salida	716	1176	64%	15,3	37,8	146%	06:04	02:01	-67%
Autopista Directo	3021	4006	33%	41,9	68,4	63%	02:14	00:59	-56%
Caletera	712	-	-17%	10,4	-	-17%	04:54	-	1%
Dieciocho	939	1369		13,9	10,3		01:40	03:05	
Santa Isabel	1385	1453	5%	10,7	11,2	5%	02:17	02:10	-5%
10 de Julio	1067	830	-22%	12,3	8,1	-34%	02:28	02:53	17%
Total Red	6837	8183	20%	25,5	43,5	71%	02:52	01:42	-41%
	Demora [min:seg]			Tiempo de parada [min:seg]			Número de paradas [paradas/km]		
	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %	Base	Sim.	Dif. %
Rampa de salida	05:18	01:14	-77%	03:58	00:37	-84%	10,4	1,5	-85%
Autopista Directo	01:40	00:25	-75%	00:49	00:00	-100%	4,1	0,0	-99%
Caletera	04:18	-	13%	04:02	-	9%	4,3	-	10%
Dieciocho	01:20	02:57		01:03	02:33		2,1	3,3	
Santa Isabel	01:59	01:51	-6%	01:35	01:28	-7%	3,7	3,4	-7%
10 de Julio	02:07	02:33	21%	01:50	02:12	20%	2,5	3,2	29%
Total Red	02:22	01:10	-51%	01:41	00:43	-57%	4,5	1,4	-69%

Fuente: Elaboración propia

5.2.4 Selección de la mejor medida

Para realizar la selección de la mejor medida entre las medidas propuestas se calculó el costo social de cada una de ellas. El cálculo se realizó con la fórmula de utilizada en el programa de optimización de semáforos SIGCOM (Von Mühlenbrock, 2005), que considera el costo social como la suma el valor social del tiempo y 2 veces el costo de combustibles. La fórmula se define como:

$$CS = cst \cdot \sum_{j=1}^n d_j \cdot q_j + 2 \cdot csc \cdot \left[\sum_{j=1}^n f_2 \cdot d_j \cdot q_j + \sum_{j=1}^n f_{3j}' \cdot h_j \cdot q_j \right] \quad (5.1)$$

Donde:

CS = costo social

cst = valor social del tiempo

csc = valor social del combustible

q_j = flujo

d_j = demoras

h_j = paradas

f_2 = consumo de combustible en ralenti

f_{3j}' = consumo de combustible por paradas

Los valores sociales del tiempo y de combustible se obtuvieron de Mideplan (2009) y los consumos de vehículos se obtuvieron del Mespivu (Sectra, 1988).

De esta manera se realizó el cálculo del costo social para cada una de las alternativas, el cual se resume en la Tabla 5-14. Se presentan los costos en el orden presentado en la Tabla 5-13.

Tabla 5-13: Alternativas simuladas

(1)	Aumento largo rampa	(6)	Disco pare en caletera
(2)	Aumento a 2 pistas en rampa	(7)	Cierre 10 de Julio
(3)	Optimización semáforo en intersección aguas abajo de rampa	(8)	Cierre caletera
(4)	Pista de viraje hacia Santa Isabel	(9)	Cierre 10 de Julio y caletera
(5)	Ceda el paso en caletera	(10)	Cierre 10 de Julio y caletera, con optimización de semáforo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-14: Costos sociales de alternativas simuladas

	Base	(1)		(2)		(3)		(4)		(5)	
		Sim.	Dif. %								
Rampa de salida	178218	180533	1%	208668	17%	115697	-35%	155115	-13%	178883	0%
Autopista Directo	250667	218279	-13%	112318	-55%	132735	-47%	183622	-27%	249937	0%
Caletera	127257	106204	-17%	107202	-16%	67154	-47%	106648	-16%	121391	-5%
Dieciocho	55928	56078	0%	52958	-5%	91586	64%	54184	-3%	55353	-1%
Santa Isabel	127487	127874	0%	125901	-1%	130063	2%	131613	3%	128950	1%
10 de Julio	96059	86642	-10%	96598	1%	107623	12%	86214	-10%	90427	-6%
Total Red	752645	702602	-7%	622943	-17%	538130	-29%	639908	-15%	748583	-1%
	Base	(6)		(7)		(8)		(9)		(10)	
		Sim.	Dif. %								
Rampa de salida	178218	178865	0%	173292	-3%	140505	-21%	60533	-66%	62420	-65%
Autopista Directo	250667	249912	0%	183770	-27%	104483	-58%	60605	-76%	60592	-76%
Caletera	127257	121379	-5%	64114	-50%	19649	-85%	257310	102%	170788	54%
Dieciocho	55928	57460	3%	83990	50%	176169	215%				
Santa Isabel	127487	128937	1%	125987	-1%	126871	0%	126614	-1%	125093	-2%
10 de Julio	96059	90418	-6%	79994	-17%	84470	-12%	100113	4%	91194	-5%
Total Red	752645	748508	-1%	643055	-15%	582051	-23%	536361	-29%	406553	-46%

Fuente: Elaboración propia

Se puede ver que la medida que reduce en mayor cantidad el costo social sobre la red a nivel agregado es el cierre de la caletera y la calle 10 de Julio en conjunto, que luego de la optimización de semáforos entrega una disminución de un 46%. Por otro lado, si se observa la disminución de demoras en la autopista y rampa de salida, nuevamente esta medida aparece como la mejor, con reducciones de un 65% y 76%, respectivamente.

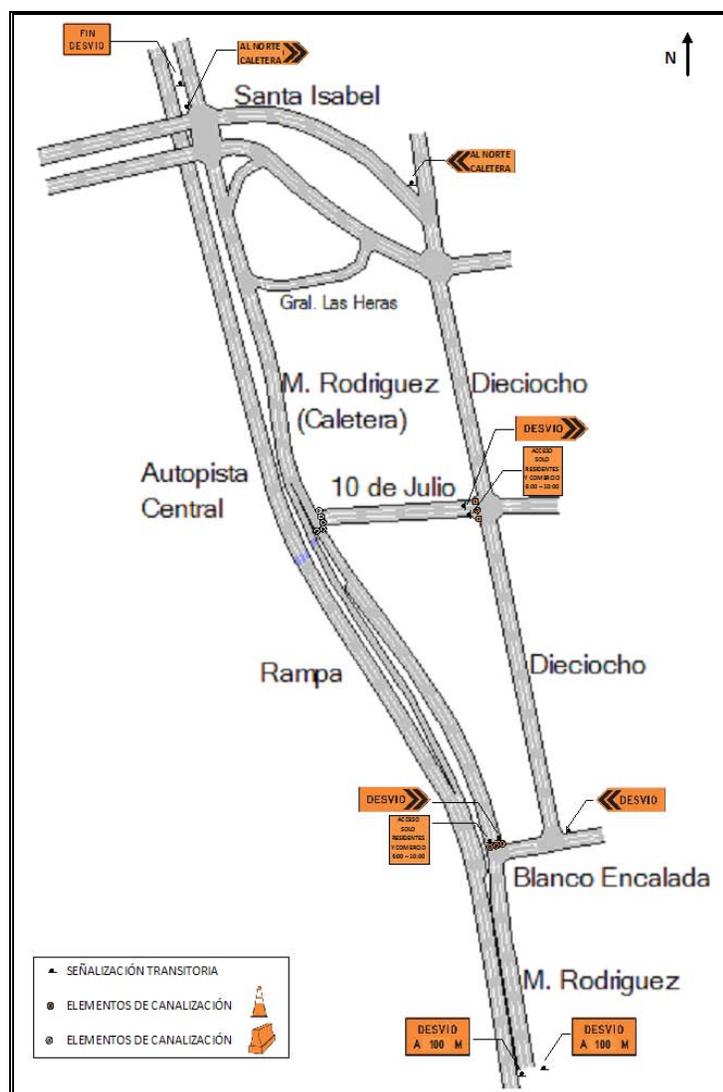
Sin considerar la optimización de semáforos, la medida es similar a la optimización del semáforo ubicado aguas abajo de la rampa de salida, ya que en ambos casos se obtiene un 29% de disminución del costo social. Sin embargo, esta disminución en la autopista y rampa de salida son mucho mayores en el esquema de desvíos con respecto a la optimización del semáforo. El único efecto negativo de esta medida es el aumento del costo social para los vehículos que anteriormente ocupaban la caletera, para los cuales aumenta su costo social en un 102%, además de un leve aumento de costo social en la calle 10 de Julio.

Dado que la medida del cierre del tramo de caletera y de la calle 10 de Julio entrega mejoras importantes en el funcionamiento de la autopista y la rampa de salida, lo que corresponde al objetivo principal de la presente investigación y a que a través de la optimización de semáforos se obtienen mejores índices agregados en la red considerada, se consideró esta medida para su implementación en terreno.

La implementación de los desvíos de tránsito propuestos es simple, debido a que requiere solamente de una adecuada señalización, ubicación de conos y la ayuda de carabineros para dirigir el tránsito por los desvíos propuestos. Con la colaboración de la Unidad Operativa de Control de Tránsito (UOCT) se coordinó los cambios necesarios a realizar en los semáforos. Finalmente, con la autorización de la Seremi Metropolitana de Transporte y la Municipalidad de Santiago y la aprobación de la Autopista Central, UOCT y la Jefatura Metropolitana de Carabineros se procedió a programar los desvíos durante 3 días.

5.3 Mediciones en terreno

Se realizaron las mediciones en terreno durante los días 14, 15 y 16 de Abril de 2009, implementando los desvíos de tránsito propuestos tal como se presenta en el plano de señalización de la Figura 5-6.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-6: Plano de señalización de desvíos

En las siguientes imágenes se presentan los conos instalados en los accesos a las calles cerradas. En la Figura 5-7 (a) se presenta el cierre de la caleterera Manuel Rodríguez y en la Figura 5-7 (b) el cierre de 10 de Julio.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-7: Cierre de calles: (a) Caleterera Manuel Rodríguez y (b) Diez de Julio

5.3.1 Resultados primer día de medición

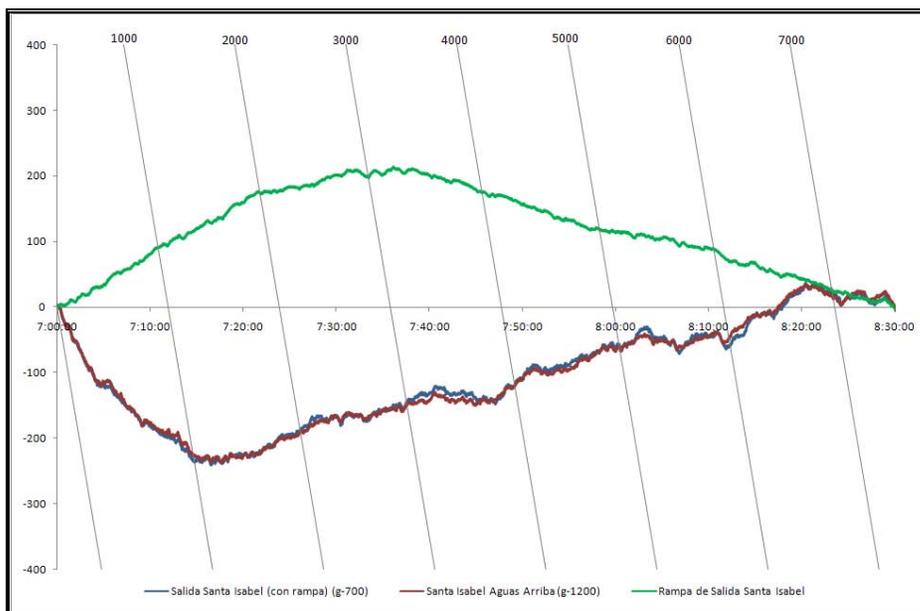
Durante el primer día de medición a simple vista se observó una importante mejora en las condiciones de operación de la autopista, donde la cola que se generaba en la autopista desapareció por completo y se observó tráfico a flujo libre.

Sin embargo, para los vehículos desviados la situación no fue tal como lo que habían indicado las simulaciones. Se formó una cola en Dieciocho mayor a la predicha, a pesar de que se fueron implementando cambios en las programaciones de los semáforos tal como los simulados. Para intentar reducir la congestión se aplicaron cambios aún mayores en las programaciones, pero no se observaron mejoras. Finalmente, para reducir las molestias a los usuarios se abrieron las calles cerradas para restablecer la configuración normal del sector. Por tal razón, finalmente el corte de las calles se realizó entre 6:00 y 8:30 horas, en lugar de entre las 6:00 y 10:00 horas, como había sido programado inicialmente.

Se realizó el conteo de vehículos desde los videos tomados en los puntos g-700, g-1200 y g-2250 (Ver Figura 3-1), durante el período en que estuvieron activos los desvíos. A partir de estos conteos se realizaron gráficos en coordenadas oblicuas de la misma manera que los gráficos realizados en Sandoval y Muñoz (2008).

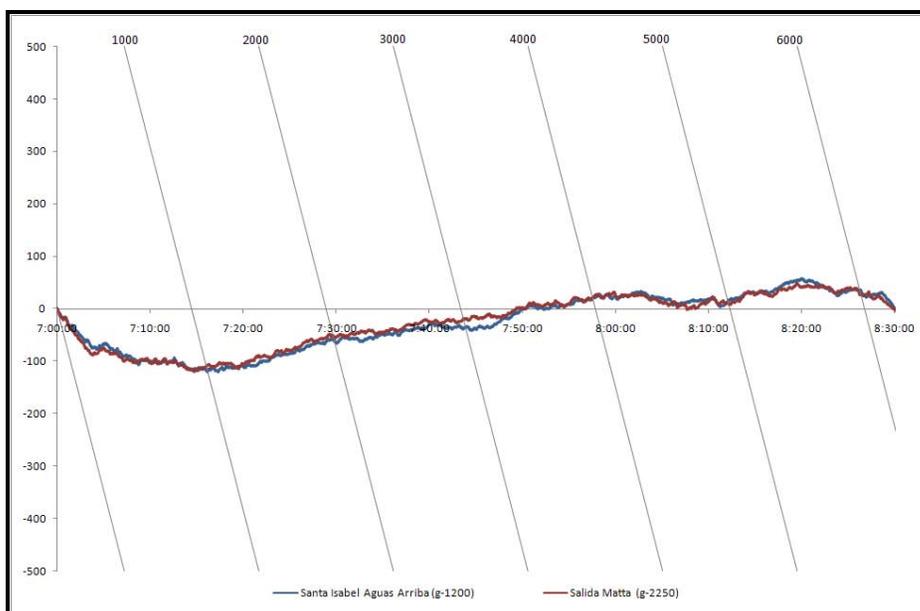
En la Figura 3-7 se presenta el gráfico del número acumulado de vehículos en coordenadas oblicuas entre los puntos g-700 y g-1200 (ver Figura 3-1) para el día 14 de Abril de 2009. Al comparar este gráfico con la Figura 3-7 se puede ver que en este caso las curvas se mantienen juntas en todo momento, lo que indica que durante todo el período en que se mantuvieron los desvíos no se generó congestión en la autopista, mientras que en un día normal existe congestión.

Por otro lado, en la Figura 5-9 se presenta el gráfico del número acumulado de vehículos en coordenadas oblicuas, ahora entre los puntos g-1200 y g-2250 (ver Figura 3-1). En este gráfico, al comparar con la Figura 3-8 se aprecia lo mismo que en el gráfico anterior, ya que las curvas en este caso se mantienen juntas durante casi toda la duración de los desvíos, con lo que se comprueba que no existe congestión hacia aguas arriba.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-8: Curvas acumuladas de vehículos entre puntos g-700 y g-1200, Día 1

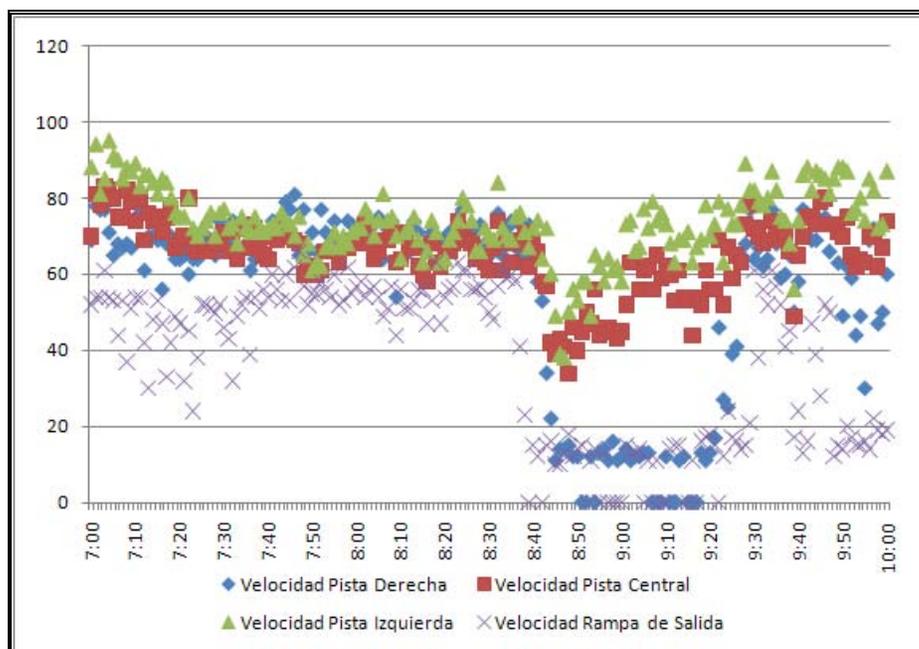


Fuente: Elaboración propia

Figura 5-9: Curvas acumuladas de vehículos entre puntos g-1200 y g-2250, Día 1

Adicionalmente, se graficó en el tiempo las velocidades agregadas al minuto en dos espiras ubicadas aguas arriba de la rampa de salida. En la Figura 5-10 se observan las velocidades para la espira e-975 (Ver Figura 3-1). Al comparar con la Figura 3-4 se observa que mientras se mantuvieron activos los desvíos la velocidad se mantuvo alta, lo que corrobora que no se presentó congestión durante el período.

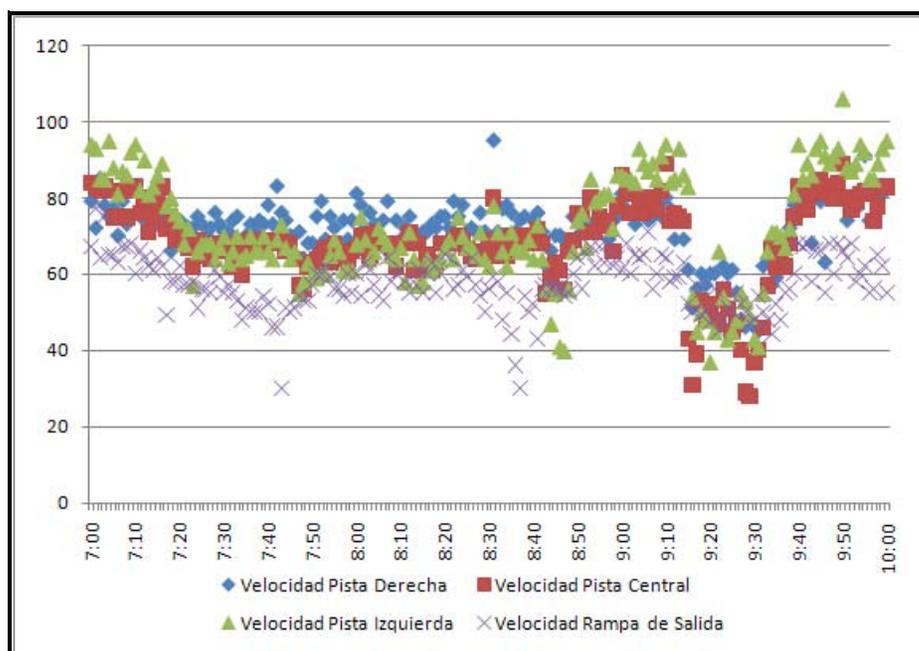
Sin embargo, al abrir las calles cerradas los vehículos que se encontraban acumulados tras el desvío ingresaron en el tramo de caletera donde se producía el entrecruzamiento de vehículos, bloqueando la rampa de salida y generando una cola que se propagó desde la rampa de salida, por lo que se observa una disminución de velocidades a partir de las 8:30. Este bloqueo se mantuvo durante un corto tiempo y luego se disipó, con lo que volvieron las velocidades altas, lo que ocurre cerca de las 9:20. Si se compara con el gráfico de la Figura 3-4, se observa que las velocidades también vuelven a ser altas cerca de las 9:20. Se podría decir que la aplicación de los desvíos retrasó la activación del cuello de botella, pero este finalizó a la misma hora.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-10: Velocidades por pista en espira e-975, Día 1

Ahora, al comparar las velocidades en el punto g-1875 (Ver Figura 3-1), en la Figura 5-11 se observa que existen reducciones similares de velocidades observadas en la Figura 3-5, pero esta disminución solamente se observa durante un período corto, después de la apertura de las calles cerradas y luego se restablecen las velocidades altas.



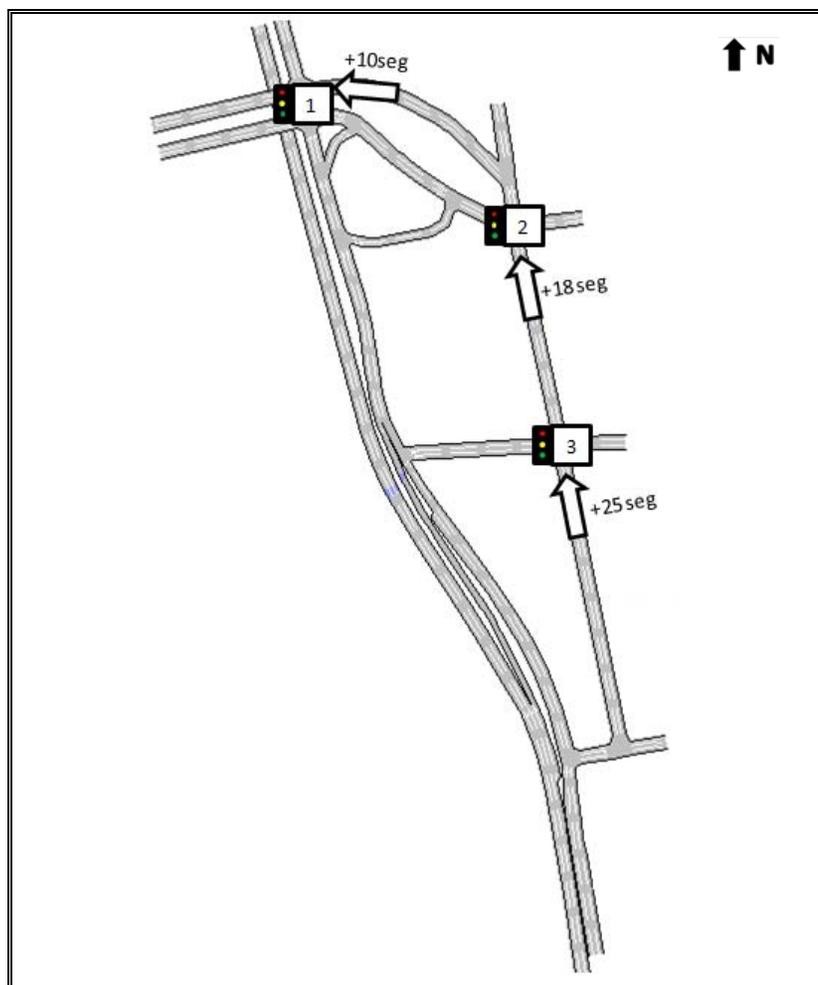
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-11: Velocidades por pista en espira e-1875, Día 1

Si se compara el flujo en la autopista de este día de medición con días normales se puede ver el aumento de la capacidad de descarga de la autopista y la rampa de salida debidos a la medida. El día 31 de Marzo de 2009 el flujo promedio en la autopista medido en la espira e-975 entre 7:00 y 9:00 fue 3367 veh/hr, mientras que este día fue de 4423 veh/hr, lo que representa un aumento de un 31,3%. En la rampa de salida, en el mismo período, el flujo medido el día 31 de Marzo fue de 615 veh/hr, mientras que este día fue de 1777 veh/hr, lo que representa un aumento de un 188,9%. Se tomó como referencia 2 semanas antes debido a que la semana anterior tenía un día feriado.

5.3.2 Resultados segundo día de medición

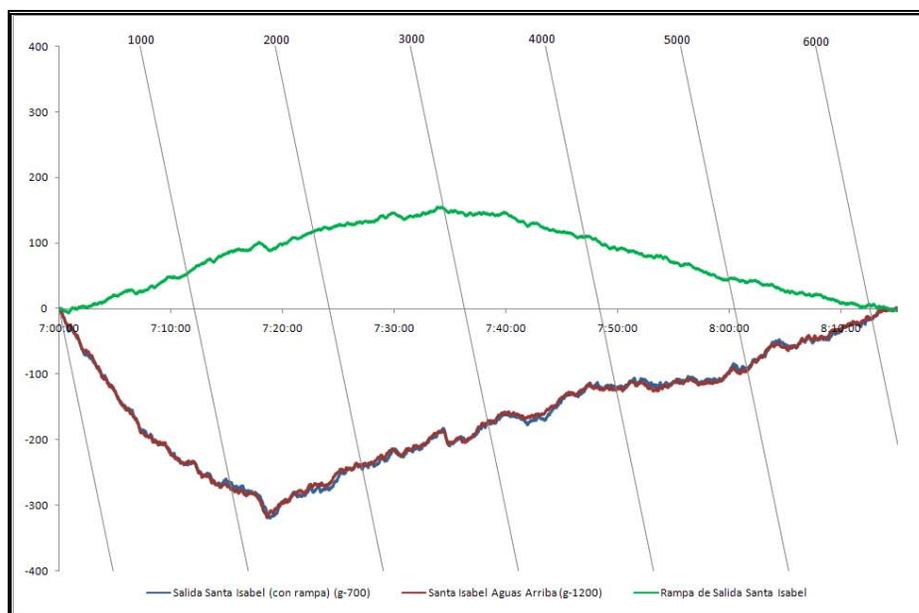
Para el segundo día de mediciones se aplicaron cambios en las programaciones de los semáforos desde el comienzo de los desvíos. En la Figura 3-11 se resumen los cambios implementados. Se utilizaron las programaciones a las cuales se había llegado al final de los desvíos del día anterior y adicionalmente se agregó más tiempo a Santa Isabel en el semáforo 1, dado que se encontró que desde aquel semáforo se originaba la cola y no desde los otros como indicaban las simulaciones.



Fuente: Elaboración propia

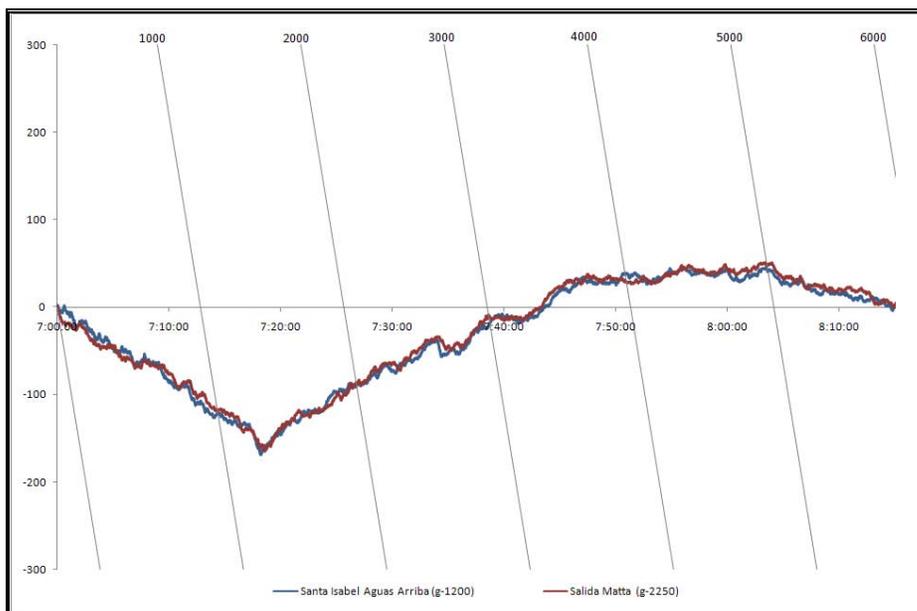
Figura 5-12: Cambios en programaciones de semáforos

A pesar de los cambios implementados los resultados no fueron mejores que el día anterior, por lo que nuevamente se canceló el experimento con anticipación, esta vez a las 8:20. En la Figura 5-13 se presenta el gráfico del número acumulado de vehículos entre los puntos g-700 y g-1200 durante el período en que se implementaron los desvíos. Se observa que, a pesar de que se redujo el tiempo de verde de los vehículos provenientes de la rampa de salida, esto no tuvo efecto y nuevamente no se registró cola en la autopista. En la Figura 5-14 se presenta el mismo gráfico anterior, ahora entre los puntos g-1200 y g-2250, donde nuevamente se observa la ausencia de congestión en la autopista.



Fuente: Elaboración propia

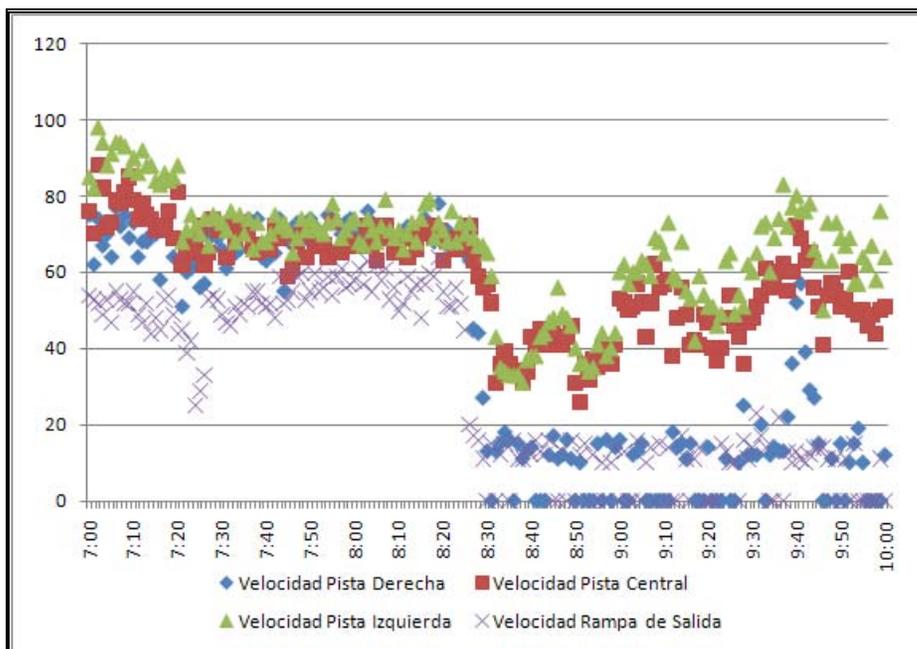
Figura 5-13: Curvas acumuladas de vehículos entre puntos g-700 y g-1200, Día 2



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-14: Curvas acumuladas de vehículos entre puntos g-1200 y g-2250, Día 2

Sin embargo, este día los efectos sobre la autopista luego de abrir los desvíos fueron peores que el primer día de medición. En la Figura 5-15 se presentan las velocidades agregadas al minuto para la espira e-975. Se observa que se bloquea la autopista al igual que el primer día (Ver Figura 5-10), sin embargo el tráfico no se logra recuperar como el primer día. No se tiene claro las causas de esto, pero una podría ser que como este día se modificó la programación del semáforo entre Manuel Rodríguez y Santa Isabel (semáforo 1 en Figura 3-11) había un mayor número de vehículos acumulados en el tramo de la caletera entre este semáforo y la rampa de salida, lo que adicionado al flujo de vehículos que ingresó al momento de abrir las calles cerradas creó una congestión mayor, la cual fue más difícil de disipar. En los videos se observa que la cola que se genera en la caletera es mayor y se forma más rápido que la del primer día.

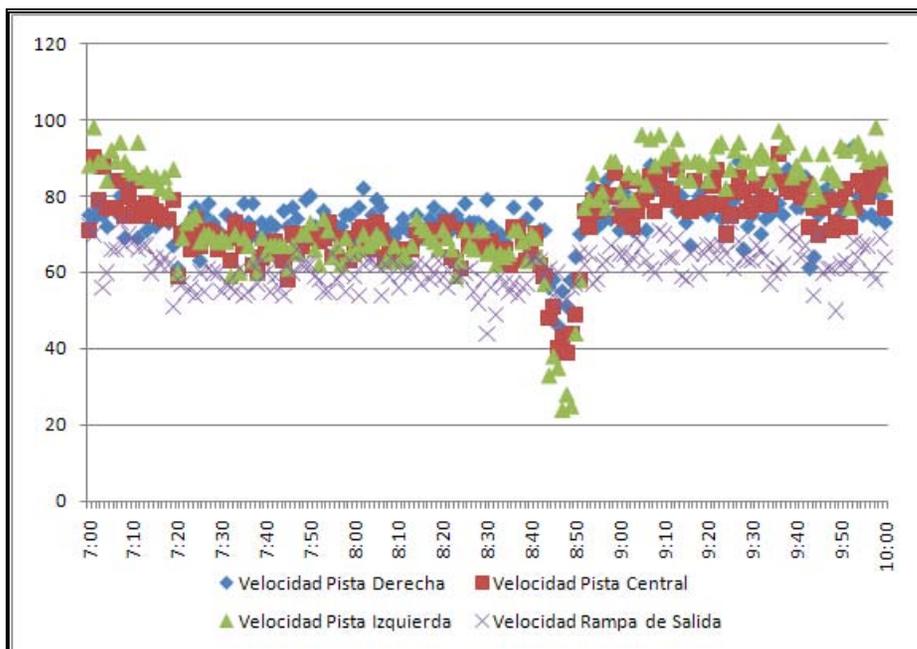


Fuente: Elaboración propia

Figura 5-15: Velocidades por pista en espira e-975, Día 2

Por otro lado, en la Figura 5-16 se presentan las velocidades para el punto e-1875. Se observa que la reducción de velocidad en este punto fue menor que en el primer día (Ver Figura 5-11), lo que refleja que el efecto observado en la Figura 5-15 fue más bien local y no se propagó hacia aguas arriba.

El día 1 de Abril de 2009 el flujo promedio en la autopista medido en la espira e-975 entre 7:00 y 9:00 fue 3571 veh/hr, mientras que este día fue de 4313 veh/hr, lo que representa un aumento de un 20,8%. La diferencia con el día puede deberse al bloqueo que se produjo este día, lo que provocó mayor cola en la autopista. En la rampa de salida, en el mismo período, el flujo medido 2 semanas antes fue de 607 veh/hr, mientras que este día fue de 1735 veh/hr, lo que representa un aumento de un 185,8%.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-16: Velocidades por pista en espira e-1875, Día 2

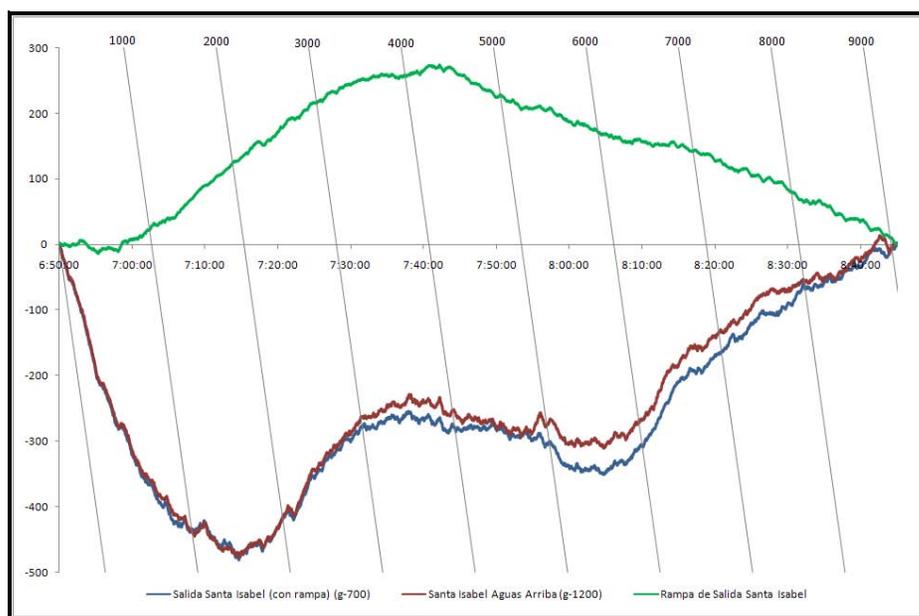
5.3.3 Resultados tercer día de medición

En el tercer día de mediciones, dados los efectos negativos que se producían en la rampa de salida al abrir las calles cerradas, se decidió anticipar esta apertura a algún momento en que la cola que se generaba todavía no llegara hasta el punto donde comenzaban los desvíos. De esta manera se evita que ingrese un gran flujo de vehículos en pelotón al tramo de caletera entre la rampa de salida y se bloquee la rampa de salida.

Se implementaron los desvíos al igual que el segundo día, con las mismas programaciones de semáforos. Para registrar la cola de los vehículos desviados, se utilizó la cámara que los días anteriores se había instalado en la salida hacia Matta (punto g-2250) y se colocó en el mismo edificio donde se tenían las cámaras que registraban los puntos g-700 y g-1200, pero en dirección hacia la calle Dieciocho.

La cola de la calle Dieciocho llegó cerca de las 7:50 hacia el punto donde comenzaban los desvíos, por lo que a partir de esa hora se abrieron las calles desviadas y se restablecieron las programaciones de semáforos. De esta manera, el flujo de vehículos que ingresaba en el tramo de la caletería lo hacía a su tasa habitual de llegada y no en pelotón, por lo que no se formó de manera inmediata la cola en la rampa de salida.

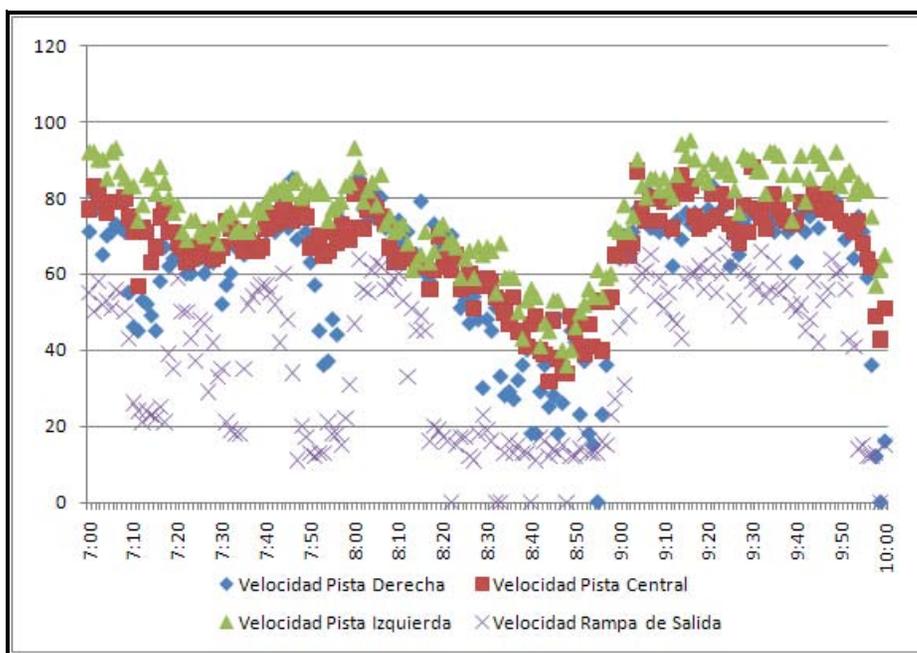
En la Figura 5-17 se presenta la curva acumulada de vehículos entre los puntos g-700 y g-1200. Luego de que se abren los desvíos comienza a aumentar la acumulación de vehículos desde la rampa de salida hacia la autopista. Sin embargo, si se compara este gráfico con la Figura 3-7 se observa que en este caso la acumulación de vehículos es menor.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-17: Curvas acumuladas de vehículos entre puntos g-700 y g-1200, Día 3

En la Figura 5-18 se presentan las velocidades agregadas al minuto en la espira e-975. Se observa que en el momento de la apertura de las calles cerradas hay unas leves disminuciones de velocidad en la rampa de salida y la pista adyacente a ésta, lo que se debe a que se acumularon algunos vehículos justo en el comienzo de los desvíos. Después de la apertura de las calles se mantienen las velocidades altas hasta que cerca de 30 minutos después la velocidad comienza a caer y se activa un cuello de botella, más corto en duración que el que se observa normalmente. El término de este período congestionado es similar al del final del cuello de botella que se genera habitualmente en la rampa de salida.

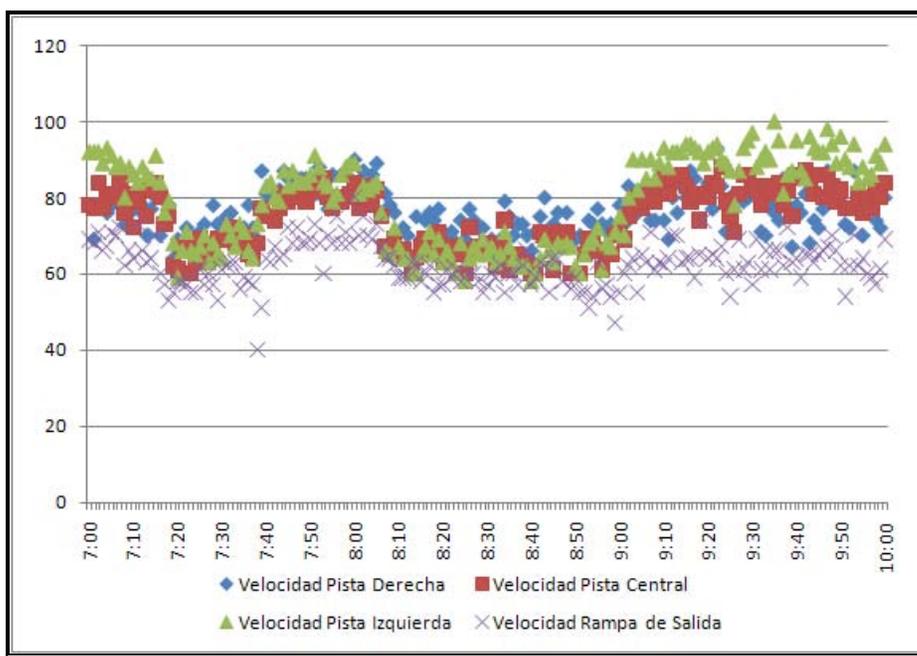


Fuente: Elaboración propia

Figura 5-18: Velocidades por pista en espira e-975, Día 3

Adicionalmente, en la Figura 5-19 se observa el mismo gráfico anterior, ahora para el punto e-1875. Se observa que la velocidad no disminuye mayormente, sino que durante el

período en que está activo el cuello de botella desde la rampa de salida hay una leve disminución de velocidad.



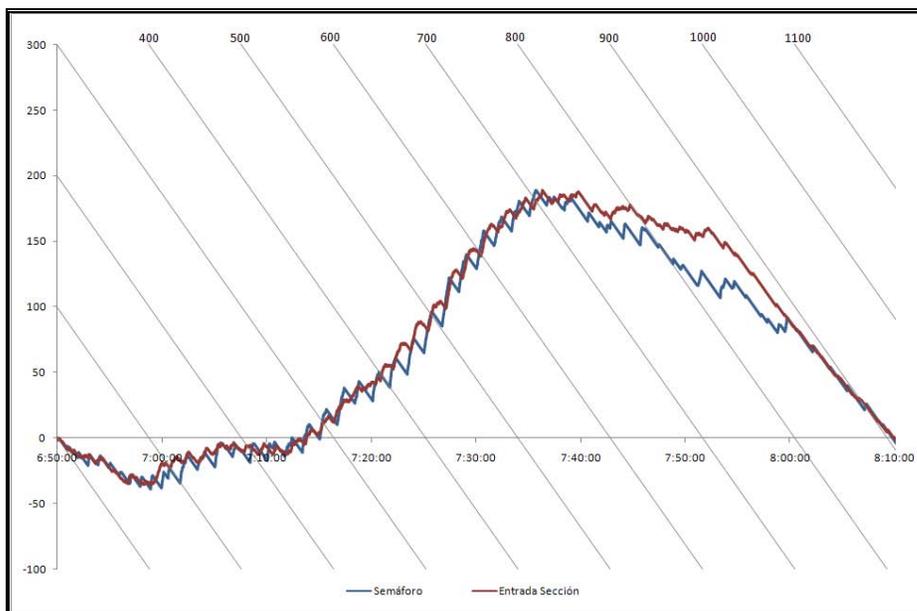
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-19: Velocidades por pista en espira e-1875, Día 3

Estos resultados indican que a través de la eliminación de la interacción de flujos en el tramo entre la rampa de salida y el semáforo ubicado hacia aguas abajo durante el período en que se activa normalmente el cuello de botella se retrasa su activación, y la duración del cuello de botella es menor.

Adicionalmente, la menor duración de los desvíos implica que existen menores demoras en los vehículos desviados, como se puede apreciar en la Figura 5-20. Se realizó el conteo de vehículos entre la entrada al tramo y el semáforo de la intersección entre Dieciocho y 10 de Julio y se graficó en coordenadas oblicuas. La curva de los vehículos en el conteo realizado tiene forma escalonada debido a que la salida de vehículos se realiza en pelotones, cuando tienen luz verde. En la curva se observan acumulaciones de vehículos entre 7:20 y 7:40, pero que se disipan cuando los vehículos tienen luz verde, pero a partir

de las 7:40 comienza a aumentar la acumulación. En el momento en que se abren las calles cerradas (7:50) comienza a bajar la acumulación de vehículos y la cola se disipa en 10 minutos.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-20: Curvas acumuladas de vehículos entre puntos g-700 y g-1200, Día 3

El día 2 de Abril de 2009 el flujo promedio en la autopista medido en la espira e-975 entre 7:00 y 9:00 fue 3361 veh/hr, mientras que este día fue de 4461 veh/hr, lo que representa un aumento de un 32,7%. La diferencia con el día puede deberse al bloqueo que se produjo este día, lo que provocó mayor cola en la autopista. En la rampa de salida, en el mismo período, el flujo medido 2 semanas antes fue de 587 veh/hr, mientras que este día fue de 1405 veh/hr, lo que representa un aumento de un 139,4%.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Preliminares

En este capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos tanto en las simulaciones como en la implementación en terreno del esquema de desvíos propuesto.

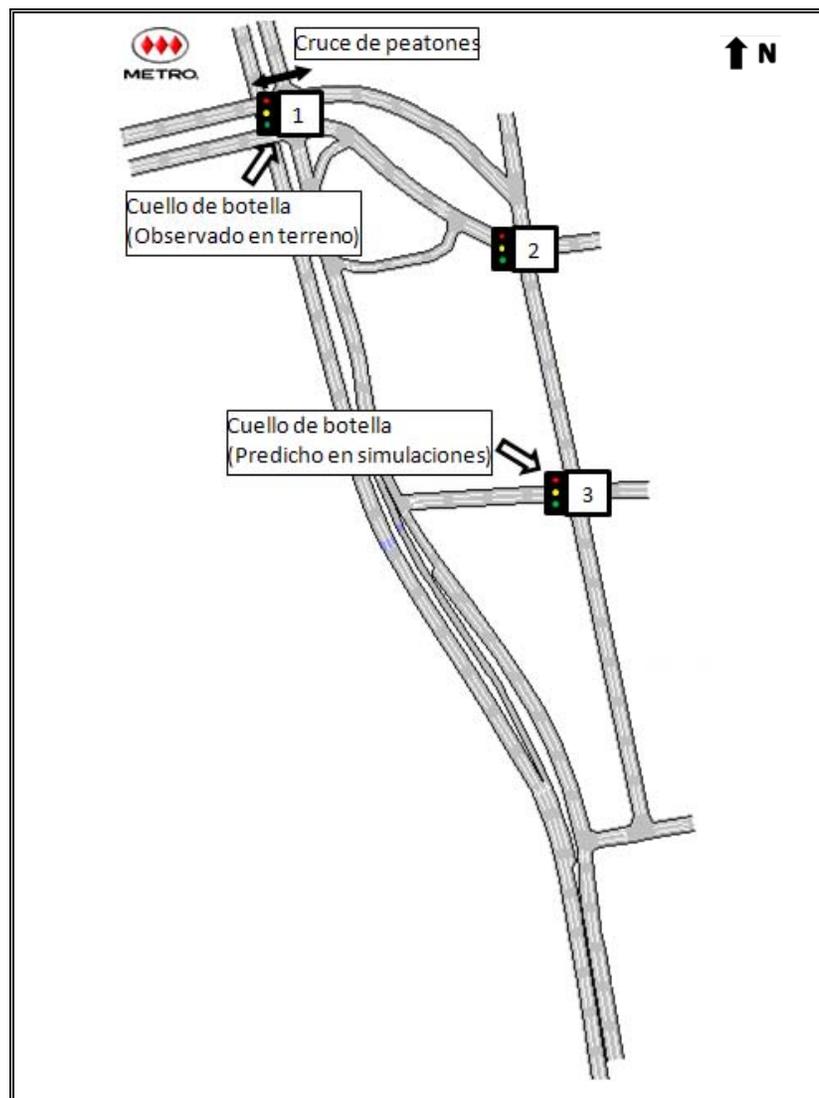
En primer lugar se realiza un análisis de las diferencias que se obtuvieron entre las simulaciones y la implementación en terreno, explicando las causas de estas diferencias.

A continuación, se presenta la replicación de lo efectivamente ocurrido en terreno mediante simulaciones en el microsimulador de tráfico AIMSUN, junto con la proposición de nuevas medidas de mitigación, generadas a partir de los resultados en terreno. Finalmente, se realiza un análisis de sensibilidad sobre estas nuevas medidas.

6.2 Diferencias entre simulación e implementación en terreno

En las mediciones en terreno de los desvíos de tránsito realizados se observaron mayores colas que las que habían sido simuladas. En AIMSUN, se había predicho que, luego de que haber optimizado el semáforo de Dieciocho con 10 de Julio (semáforo 3 en Figura 3-11) las colas no llegarían hasta el punto en que comenzaban los desvíos.

Esto no ocurrió así y las colas efectivamente llegaron más allá de ese punto, llegando a un nivel en que se decidió terminar con los desvíos antes de la hora prevista inicialmente. Observando en terreno el origen de la formación de la cola, se encontró que el cuello de botella que la generaba no era el semáforo que se optimizó y que la cola provenía desde aguas abajo. Un factor observado en terreno que puede tener influencia en este cambio es la presencia de un gran flujo de peatones que cruza en el momento en que los vehículos desviados tienen verde para virar a la derecha desde Santa Isabel para volver hacia la caletera. El gran flujo de peatones se debe a la presencia de una estación de metro en el lugar, tal como se muestra en la Figura 3-11. En la Figura 3-12 se presenta una secuencia de imágenes de peatones bloqueando a los vehículos desviados.



Fuente: Elaboración propia

Figura 6-1: Cuello de botella simulado y observado en terreno

Se intentó corregir el efecto que causaban los peatones en el arco, intentando que algunos de vehículos desviados no volvieran a la caletería por la calle Santa Isabel, sino que siguieran directo por Dieciocho y volvieran por la siguiente calle. El tercer día de mediciones se removió la señalética que indicaba que el desvío debía seguir por Santa Isabel, pero la llegada tardía de carabinero ese día impidió que se pudiera realizar.



Fuente: Elaboración propia

Figura 6-2: Bloqueo de peatones a vehículos desviados

Luego de la implementación en terreno de los desvíos se revisaron las simulaciones realizadas para determinar si existió un error en la modelación que hubiese causado la diferencia de colas observadas en los arcos ubicados entre los semáforos 1 y 2 de la Figura 6-1.

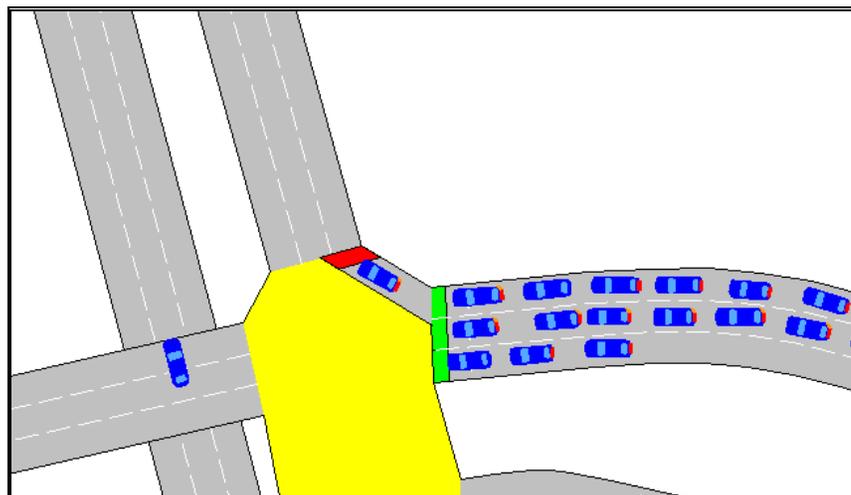
Se encontró que la diferencia se debió principalmente al uso de flujos de entrada y porcentajes de viraje para ingresar flujos a la red. Debido a los desvíos realizados se aumenta el flujo en la calle Dieciocho, el que para volver a la caletera causa un aumento del porcentaje de viraje hacia la izquierda desde Dieciocho hacia Santa Isabel (semáforo 2 de la Figura 3-11) y del porcentaje de viraje hacia la derecha desde Santa Isabel hacia la caletera (semáforo 1 de la Figura 3-11). En este caso, como existen reasignaciones de flujo en la red hubiera sido más adecuado el uso de matrices para ingresar los datos a la red.

6.3 Replicación de implementación en terreno en AIMSUN

Para replicar lo ocurrido en terreno se corrigieron en AIMSUN los factores mencionados anteriormente.

En primer lugar se estimaron matrices de viaje a partir de los datos ingresados inicialmente en AIMSUN, para poder realizar las reasignaciones de flujo necesarias al simular los desvíos. En el Anexo E se presentan las matrices estimadas.

Para incorporar el efecto del tiempo perdido de los vehículos que viran debido a los peatones se agregó un arco con un semáforo que simula el tiempo perdido de los vehículos, de la manera que se presenta en la Figura 6-3.



Fuente: Elaboración propia

Figura 6-3: Arco para simular bloqueo de peatones

De este modo, en primer lugar se simuló en AIMSUN los desvíos durante el período completo programado originalmente los desvíos, considerando las optimizaciones de semáforo realizadas en terreno, para ver la diferencia con los resultados de las simulaciones realizadas con anterioridad a la implementación de los desvíos en terreno. En la Tabla 5-2 se presentan los resultados para esta simulación.

Al comparar estos resultados con aquellos de la Tabla 5-12, la cual corresponde a la optimización final optimizada antes de implementar los desvíos en terreno, se puede apreciar que en este caso que algunos de los índices son peores que los observados en la simulación realizada, dados los errores cometidos en aquella simulación. En particular, en el caso de las demoras se tiene que las mejoras son sólo de un 28% en comparación con el 51% que entregaban las simulaciones previas. Considerando estos resultados, esta medida resulta no ser la mejor como se había anticipado a los desvíos, pero presenta niveles similares de mejora que otras medidas simuladas, las cuales estaban en niveles de mejora en la red cercanos al 30%. Sin embargo, en este caso los resultados de la medida en la autopista siguen siendo mejores que las demás medidas simuladas, con disminuciones de un 69% y un 82% de demoras en la rampa de salida y autopista, respectivamente.

Tabla 6-1: Estadísticas simulación final, desvío completo

	Flujo [veh/hr]			Velocidad [km/hr]			Tiempo de viaje [min:seg]		
	Base	Desvío Final	Diferencia Porcentual	Base	Desvío Final	Diferencia Porcentual	Base	Desvío Final	Diferencia Porcentual
Rampa de salida	716	1017	42%	15,3	35,8	133%	06:04	02:25	-60%
Autopista Directo	3021	3879	28%	41,9	73,2	75%	02:14	00:53	-61%
Caletera	712	1651	-	10,4	12,4	-	04:54	03:04	-
Dieciocho	939	1082	1082	13,9	9,2	9,2	01:40	05:37	05:37
Santa Isabel	1385	872	872	10,7	7,4	7,4	02:17	04:38	04:38
10 de Julio	1067	655	655	12,3	9,9	9,9	02:28	03:06	03:06
Total Red	6837	7049	7049	25,5	49,4	49,4	02:52	02:14	02:14
	Demora [min:seg]			Tiempo de parada [min:seg]			Número de paradas [paradas/km]		
	Base	Desvío Final	Diferencia Porcentual	Base	Desvío Final	Diferencia Porcentual	Base	Desvío Final	Diferencia Porcentual
Rampa de salida	05:18	01:38	01:38	03:58	01:08	01:08	10,4	1,5	1,5
Autopista Directo	01:40	00:18	00:18	00:49	00:00	00:00	4,1	0,0	0,0
Caletera	04:18	02:37	-	04:02	02:20	-	4,3	3,0	-
Dieciocho	01:20	05:14	05:14	01:03	04:54	04:54	2,1	4,0	4,0
Santa Isabel	01:59	04:21	04:21	01:35	04:01	04:01	3,7	3,7	3,7
10 de Julio	02:07	02:46	02:46	01:50	02:27	02:27	2,5	3,6	3,6
Total Red	02:22	01:41	01:41	01:41	01:22	01:22	4,5	1,2	1,2

Fuente: Elaboración propia

Luego se realizó la misma simulación anterior, considerando un desvío aplicado hasta las 8:30 de modo de replicar los resultados obtenidos en terreno durante los 2 primeros días de medición, en los cuales se obtuvieron resultados similares. Los resultados de esta simulación se presentan en la Tabla 6-2.

En este caso se observa que los resultados son peores que en el caso de aplicar un desvío completo durante todo un período. Esto se debe a que debido al cierre anticipado de las calles se producen bloqueos en la sección de caletera ubicada hacia aguas abajo de la rampa de salida, lo que provoca que también se bloquee la rampa de salida y se propague esta cola hacia la autopista por algunos instantes. En el caso en que se mantienen los desvíos durante el período completo esto no ocurre, por lo que a nivel agregado no existen mejoras en este caso.

Tabla 6-2: Estadísticas simulación final, desvío hasta 8:30

	Flujo [veh/hr]			Velocidad [km/hr]			Tiempo de viaje [min:seg]		
	Base	Desvío 8:30	Diferencia Porcentual	Base	Desvío 8:30	Diferencia Porcentual	Base	Desvío 8:30	Diferencia Porcentual
Rampa de salida	716	995	39%	15,3	31,3	104%	06:04	02:47	-54%
Autopista Directo	3021	3802	26%	41,9	69,9	67%	02:14	01:02	-53%
Caletera	712	485	-32%	10,4	9,5	-8%	04:54	07:55	62%
Dieciocho	1651	841	-10%	12,4	9,4	-24%	03:04	05:41	86%
Santa Isabel	1385	1132	-18%	10,7	7,8	-27%	01:40	04:24	164%
10 de Julio	1067	838	-21%	12,3	9,6	-21%	02:28	03:17	34%
Total Red	6837	7417	8%	25,5	43,3	70%	02:52	02:28	-14%
	Demora [min:seg]			Tiempo de parada [min:seg]			Número de paradas [paradas/km]		
	Base	Desvío 8:30	Diferencia Porcentual	Base	Desvío 8:30	Diferencia Porcentual	Base	Desvío 8:30	Diferencia Porcentual
Rampa de salida	05:18	02:00	-62%	03:58	01:17	-68%	10,4	2,6	-75%
Autopista Directo	01:40	00:28	-72%	00:49	00:02	-95%	4,1	0,4	-91%
Caletera	04:18	07:20	71%	04:02	06:52	71%	4,3	5,4	28%
Dieciocho	02:37	05:14	101%	02:20	04:51	108%	3,0	4,3	44%
Santa Isabel	01:20	04:02	203%	01:03	03:42	251%	2,1	3,7	79%
Santa Isabel	01:59	02:54	46%	01:35	02:31	59%	3,7	3,9	4%
10 de Julio	02:07	02:56	39%	01:50	02:36	41%	2,5	3,6	44%
Total Red	02:22	01:56	-18%	01:41	01:30	-12%	4,5	1,9	-57%

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se realizó la misma simulación anterior, considerando ahora un desvío aplicado hasta las 7:50 para replicar los resultados obtenidos en terreno durante el tercer día de medición. Los resultados de esta simulación se presentan en la Tabla 6-3.

En este caso se observa que existen mejoras en comparación con el caso anterior, debido a que anticipando la apertura de las calles cerradas se evita el bloqueo que ocurre en el caso anterior. Sin embargo, dado que en este caso vuelve a haber flujo en la autopista se activa el cuello de botella de manera tardía, lo que provoca que bajen las condiciones de operación de la autopista en comparación con la simulación en que se tenía el desvío completo.

Tabla 6-3: Estadísticas simulación final, desvío hasta 7:50

	Flujo [veh/hr]			Velocidad [km/hr]			Tiempo de viaje [min:seg]		
	Base	Desvío 7:50	Diferencia Porcentual	Base	Desvío 7:50	Diferencia Porcentual	Base	Desvío 7:50	Diferencia Porcentual
Rampa de salida	716	898	26%	15,3	31,3	104%	06:04	02:47	-54%
Autopista Directo	3021	3689	22%	41,9	68,9	65%	02:14	01:05	-51%
Caletera	712	715	0%	10,4	11,0	6%	04:54	05:32	13%
Dieciocho	1651	1502	-9%	12,4	10,5	-15%	03:04	04:25	44%
Santa Isabel	1385	1150	-17%	10,7	8,3	-23%	01:40	03:03	34%
10 de Julio	1067	858	-20%	12,3	9,1	-26%	02:28	03:18	34%
Total Red	6837	7342	7%	25,5	42,2	66%	02:52	02:19	-19%
	Demora [min:seg]			Tiempo de parada [min:seg]			Número de paradas [paradas/km]		
	Base	Desvío 7:50	Diferencia Porcentual	Base	Desvío 7:50	Diferencia Porcentual	Base	Desvío 7:50	Diferencia Porcentual
Rampa de salida	05:18	02:30	-53%	03:58	01:23	-65%	10,4	2,7	-74%
Autopista Directo	01:40	00:27	-73%	00:49	00:17	-64%	4,1	0,5	-88%
Caletera	04:18	05:03	17%	04:02	04:37	15%	4,3	4,8	12%
Dieciocho	02:37	04:00	53%	02:20	03:37	55%	3,0	4,1	34%
Santa Isabel	01:20	03:03	129%	01:03	02:43	157%	2,1	3,4	65%
10 de Julio	01:59	02:46	40%	01:35	02:23	50%	3,7	3,8	4%
Total Red	02:07	03:02	44%	01:50	02:41	46%	2,5	3,7	49%
Total Red	02:22	01:49	-23%	01:41	01:27	-14%	4,5	2,1	-54%

Fuente: Elaboración propia

6.4 Proposición de medidas basadas en resultados en terreno

6.4.1 Autorizar viraje de vehículos desviados con luz roja

Una primera alternativa que se simuló para evitar el efecto de los peatones que bloqueaban el viraje de vehículos fue darle la posibilidad de virar con luz roja a los vehículos que eran desviados en la intersección 1 de la Figura 6-1. De este modo, los vehículos pueden virar sin ser bloqueados por los peatones. Esta medida es posible de implementar por la baja en la demanda en la caletera debida a los desvíos, por lo que se puede orientar los flujos de los vehículos provenientes desde la caletera hacia las dos pistas hacia la izquierda y dejar la tercera para el viraje, de la manera que se presenta en la Figura 6-4.

En la Tabla 6-4 se presentan los resultados de la simulación de esta medida. Se observa que se minimizan los efectos negativos sobre los vehículos desviados, sin embargo las mejoras a nivel global no son tan buenas como anteriormente, debido a que el nivel de disminución de demoras en la autopista y rampa de salida no son tan altos.

6.4.2 Esquema de control dinámico de flujos para rampas de salida

Durante el tercer día de medición se aplicó un cierre de calles y desvío de vehículos durante un período corto de tiempo, con lo cual se disipó la cola de los vehículos desviados en 10 minutos y se formó una leve cola en la rampa de salida, la cual no se propagó mayormente en la autopista.

Considerando el hecho de que la cola se disipó en un período corto de tiempo sugiere que para evitar la cola que se formó a continuación en la rampa de salida se podría haber vuelto a cerrar las calles y así eliminar esta cola. De este modo, se volvería a formar una nueva cola de vehículos desviados, la cual se podría volver a eliminar nuevamente abriendo las calles cerradas antes de que se bloquee el punto donde comienzan los desvíos.

Así, se podría seguir sucesivamente alternando entre apertura y cierre de calles durante el período punta hasta que el flujo baje, implementando un esquema similar a uno de *ramp metering* (Ver punto 2.3.4), pero en este caso para controlar un cuello de botella en rampas de salida. En este caso, la existencia de una calle paralela a la caletera permite que los vehículos que son restringidos por este tipo de esquema puedan seguir circulando, no como en un esquema de *ramp metering* para rampas de entrada, en el cual los vehículos esperan directamente en la rampa.

Se utilizaron las simulaciones realizadas en los puntos anteriores, las que replican lo sucedido efectivamente en terreno, para simular este esquema. La forma de controlar este esquema se realizó observando la cola que se generaba en la calle por donde se desviaban los vehículos y de esta manera, cuando se formaba cola se abría el desvío y cuando se disipaba, se volvía a cerrar. Se consideró una cola menor a la observada en terreno, para anticipar el momento en que la cola llegara al punto donde comenzaban los desvíos.

En la Tabla 6-5 se presentan las estadísticas obtenidas en AIMSUN para la simulación de este esquema de control dinámico de flujos para rampas de salida.

Tabla 6-5: Estadísticas simulación control dinámico de flujos

	Flujo [veh/hr]			Velocidad [km/hr]			Tiempo de viaje [min:seg]											
	Base	Ramp Metering	Diferencia Porcentual	Base	Ramp Metering	Diferencia Porcentual	Base	Ramp Metering	Diferencia Porcentual									
Rampa de salida	716	1010	41%	15,3	30,7	100%	06:04	02:45	-55%									
Autopista Directo	3021	3888	29%	41,9	70,5	68%	02:14	01:01	-54%									
Caletera	712	1651	719	1499	1%	-9%	10,4	12,4	20,3	15,7	95%	27%	04:54	03:04	02:38	02:42	-46%	-12%
Dieciocho	939	780	-17%	-9%	13,9	12,4	11,6	15,7	-17%	27%	01:40	03:04	02:45	02:42	65%	-12%		
Santa Isabel	1385	1264	-9%	10,7	8,7	-19%	02:17	02:38	15%									
10 de Julio	1067	866	-19%	12,3	11,4	-7%	02:28	02:35	5%									
Total Red	6837	7730	13%	25,5	44,3	74%	02:52	01:51	-36%									
	Demora [min:seg]			Tiempo de parada [min:seg]			Número de paradas [paradas/km]											
	Base	Ramp Metering	Diferencia Porcentual	Base	Ramp Metering	Diferencia Porcentual	Base	Ramp Metering	Diferencia Porcentual									
Rampa de salida	05:18	01:58	-63%	03:58	01:14	-69%	10,4	2,6	-75%									
Autopista Directo	01:40	00:27	-73%	00:49	00:03	-93%	4,1	0,3	-92%									
Caletera	04:18	02:37	02:03	02:13	-52%	-15%	04:02	02:20	01:41	01:52	-58%	-20%	4,3	3,0	3,1	3,1	-27%	4%
Dieciocho	01:20	02:22	78%	01:03	02:01	92%	2,1	3,2	52%									
Santa Isabel	01:59	02:20	18%	01:35	01:57	22%	3,7	3,7	1%									
10 de Julio	02:07	02:13	5%	01:50	01:53	2%	2,5	3,3	33%									
Total Red	02:22	01:18	-45%	01:41	00:53	-48%	4,5	1,7	-61%									

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que en comparación con las simulaciones de lo efectivamente sucedido en terreno esta medida es mucho mejor en todos los índices de desempeño de la red. Adicionalmente, se obtienen niveles de mejora similares a los que se había simulado originalmente en el esquema de desvíos con optimización de semáforos.

Adicionalmente, se observan mejoras en la autopista y la rampa de salida cercanas a las que se obtienen originalmente con la implementación de desvíos durante el período completo, lo que indica que para evitar el cuello de botella que se produce en torno a la rampa de salida no es necesario realizar un desvío de todos los vehículos que causan el entrecruzamiento con los vehículos provenientes de la rampa de salida, sino que con eliminar un cierto porcentaje de estos vehículos se obtienen mejoras importantes en la operación de la autopista.

Por otro lado, los efectos negativos que se observan en la red mayoritariamente son sobre los vehículos que circulan habitualmente por la calle Dieciocho, lo que representa un flujo bajo en comparación con los vehículos que se ven beneficiados por la medida.

6.5 Análisis de sensibilidad para esquema de control dinámico de flujos

Se realizó un análisis de sensibilidad para el esquema tipo control dinámico de flujos propuesto. Para esto se aumentó el flujo en la red en un 10% para determinar si la medida funciona en este caso.

Dado el aumento en el flujo fue necesario cambiar los tiempos entre los cuales se aplica el cierre de calles. En este caso se abrieron las calles cerradas desde más temprano, debido a la mayor acumulación de vehículos. También fue necesario realizar una mayor cantidad de cierres y con mayor frecuencia.

En la Tabla 6-6 se presentan los resultados de la simulación de este caso. Se puede ver que la medida resulta efectiva, aunque como era de esperar, en menor medida. Las demoras en este caso se reducen en un 33% en la situación base, en comparación con el 45% en que se reducen con el flujo normal. Las demoras son mayores para los vehículos desviados y las mejoras para los vehículos de la autopista y rampa de salida son menores.

Tabla 6-6: Estadísticas análisis de sensibilidad simulación control dinámico de flujos

	Flujo [veh/hr]				Velocidad [km/hr]				Tiempo de viaje [min:seg]									
	Base		Análisis Sensibilidad		Diferencia Porcentual		Base		Análisis Sensibilidad		Diferencia Porcentual		Base		Análisis Sensibilidad		Diferencia Porcentual	
Rampa de salida	716		1085		52%		15,3		30,0		95%		06:04		03:15		-47%	
Autopista Directo	3021		4182		38%		41,9		70,3		68%		02:14		01:13		-46%	
Caletera	712	1651	676	1558	-5%	-6%	10,4	12,4	16,1	12,8	56%	3%	04:54	03:04	03:06	03:15	-37%	6%
Dieciocho	939		882		-6%		13,9		10,2		-27%		01:40		03:22		102%	
Santa Isabel	1385		1178		-15%		10,7		7,8		-27%		02:17		02:54		27%	
10 de Julio	1067		910		-15%		12,3		10,0		-18%		02:28		02:48		14%	
Total Red	6837		8088		18%		25,5		44,3		74%		02:52		02:08		-25%	
	Demora [min:seg]				Tiempo de parada [min:seg]				Número de paradas [paradas/km]									
	Base		Análisis Sensibilidad		Diferencia Porcentual		Base		Análisis Sensibilidad		Diferencia Porcentual		Base		Análisis Sensibilidad		Diferencia Porcentual	
Rampa de salida	05:18		02:28		-53%		03:58		01:31		-62%		10,4		3,2		-69%	
Autopista Directo	01:40		00:38		-62%		00:49		00:05		-91%		4,1		0,5		-87%	
Caletera	04:18	02:37	02:31	02:47	-41%	6%	04:02	02:20	02:07	02:24	-48%	3%	4,3	3,0	3,7	3,6	-14%	19%
Dieciocho	01:20		02:59		124%		01:03		02:37		149%		2,1		3,5		69%	
Santa Isabel	01:59		02:37		32%		01:35		02:13		40%		3,7		3,8		3%	
10 de Julio	02:07		02:26		15%		01:50		02:04		13%		2,5		3,6		44%	
Total Red	02:22		01:36		-33%		01:41		01:02		-38%		4,5		2,0		-56%	

Fuente: Elaboración propia

6.6 Costo social para esquema de control dinámico de flujos

Se calculó el costo social para el esquema de control dinámico de flujos propuesto, de la misma manera que en la sección 4.4, para obtener una comparación entre las alternativas simuladas previamente, la implementación de medidas en terreno y las simulaciones realizadas posteriormente. En la Tabla 6-8 se presenta el resumen de los indicadores de rendimiento, de acuerdo a las alternativas presentadas en la Tabla 6-7.

Tabla 6-7: Alternativas finales simuladas

(1)	Cierre 10 de Julio y caletera, con optimización de semáforo
(2)	Cierre 10 de Julio y caletera, representativo día 1 y 2 de medición
(3)	Cierre 10 de Julio y caletera, representativo día 3 de medición
(4)	Cierre 10 de Julio y caletera, esquema de control dinámico de flujos

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-8: Costos sociales de esquemas finales

	Base	(1)		(2)		(3)		(4)	
		Sim.	Dif. %						
Rampa Salida	178218	68175	-62%	85885	-52%	94785	-47%	86401	-52%
Autopista	250667	42131	-83%	71357	-72%	70076	-72%	69581	-72%
Caletera	127257	228019	86%	142660	12%	148960	17%	65469	-49%
Dieciocho	55928			139352	149%	101488	81%	80398	44%
Santa Isabel	127487	154560	21%	142451	12%	139189	9%	132845	4%
10 de Julio	96059	78484	-18%	105491	10%	111796	16%	85535	-11%
Total Red	752645	478078	-36%	598656	-20%	566754	-25%	439183	-42%

Fuente: Elaboración propia

Se observa que el esquema de desvíos propuestos tiene beneficios sociales menores a lo que se había simulado previo a la implementación de los desvíos, correspondientes a los indicados en la columna (10) de la Tabla 5-14.

Sin embargo, la alternativa sigue siendo superior a todas las alternativas simuladas previamente, lo que indica que a pesar del error cometido en las simulaciones no habría cambiado la selección de la alternativa. Adicionalmente, se observa que los beneficios sociales en la autopista y la rampa de salida son mayores.

Por otro lado, se observa que los indicadores de rendimiento para las replicaciones de las mediciones en terreno son menores que lo la simulación durante el período completo, lo que se debe a los bloqueos producidos en la rampa de salida por los vehículos que permanecían esperando por los desvíos.

Finalmente, se observa que al simular la medida de control dinámico de flujos con apertura y cierre de desvío se obtienen mejoras mucho mayores a todos los esquemas simulados, con anterioridad y posteriormente a la implementación de los desvíos. Se obtienen grandes mejoras en la autopista y rampa de salida y se minimizan los efectos negativos sobre los vehículos desviados por el esquema.

6.7 Factibilidad de implementación de esquema de forma permanente

La aplicación de los desvíos en terreno fue de relativamente fácil implementación. A través del uso de conos y una adecuada señalética sólo fue necesario el apoyo de carabineros para dirigir el tráfico en los momentos en que se produjo algo de congestión.

Sin embargo, para la aplicación de un esquema del tipo control dinámico de flujos con apertura y cierre de desvíos es necesario mayor control. En primer lugar es necesario monitorear los niveles de cola en la calle por donde se desvían los vehículos, para determinar cuando se debe aplicar la apertura o cierre de los desvíos, lo cual se puede hacer a través de instalación de cámaras y monitoreo desde una sala de control o algún mecanismo automático de medición de colas como el uso de espiras.

Adicionalmente, se debe tener un sistema de información a los usuarios de cuando le corresponde seguir directo o tomar el desvío. El uso de conos en este caso no es factible, debido a que su instalación requiere de tiempo y personal, y adicionalmente es complicado instalarlos cuando los flujos aumentan. Cuando se implementaron los desvíos, los conos fueron instalados a las 6:00 horas, momento en que el flujo era casi nulo.

Para informar al usuario sobre cuál camino debe tomar se puede utilizar semáforos o paneles de señalización variable (*VMS*), de manera similar a esquemas de *ramp metering* en rampas de entrada. Para asegurarse de que los usuarios respeten la medida y no ingresen al tramo de caletera cuando deben tomar el desvío se pueden instalar cámaras para monitorear el ingreso de vehículos y cursar infracciones cuando no se respete la medida.

Por otro lado, es necesario mantener coordinación con la UOCT para realizar los cambios en la programación de semáforos entre los períodos en que el desvío está activado o desactivado. Cuando esta activo el desvío, se debe darle mayor prioridad a los vehículos desviados y en el caso contrario mayor prioridad a los vehículos en la caletera.

Finalmente, se recomienda en este caso realizar mejoras a la calle Dieciocho, como por ejemplo una repavimentación y prohibir el estacionamiento en ambos costados, para darle mayor capacidad al desvío de vehículos, ya que esta calle es parte importante del esquema.

6.8 Metodología para implementación en otras rampas de salida

En esta investigación se aplicó una metodología aplicada a un sitio de estudio en particular, en la cual se mejoró la operación de un tramo de autopista a través de desvíos de tránsito en torno a la rampa de salida desde donde se originaba la cola hacia la autopista.

Esta metodología puede ser aplicada en otros sitios similares en los cuales existan cuellos de botella de este tipo. A continuación se resume los pasos aplicados:

- a) Observación en terreno de algún sitio en el cual exista una cola originada en torno a una rampa de salida. Realizar mediciones con cámaras de video de las colas

generadas, teniendo cuidado de tener continuidad de flujo entre los puntos de grabación.

- b) Realizar gráficos acumulados de vehículos en coordenadas oblicuas a partir de los videos realizados y hacer gráficos de velocidades en el tiempo a partir de información de espiras para determinar la evolución de la cola. Determinar flujos y capacidad de descarga de la rampa de salida.
- c) Observación en terreno del entorno de la rampa de salida, verificando la vialidad adyacente, las posibles causas del cuello de botella y realizar mediciones de flujo en el entorno de la rampa de salida.
- d) Análisis de la vialidad adyacente para encontrar un sitio donde sea factible realizar el desvío de vehículos minimizando las demoras para los vehículos desviados.
- e) Simulación en AIMSUN del esquema de desvíos y determinación de índices a priori de mejoras esperadas. Evaluar uso de esquemas de control dinámico de flujos como el propuesto en esta investigación.
- f) Implementación experimental en terreno de esquema de desvíos y comparación con simulaciones. Determinación de capacidades de descarga de la rampa de salida y aumentos de flujos en autopista a través del uso de gráficos acumulados de vehículos en coordenadas oblicuas y gráficos de velocidades en el tiempo.
- g) Comparación entre situación simulada y mediciones en terreno, comparando niveles de cola y flujos. Evaluar aumentos de capacidades de descarga en autopista y rampa de salida.
- h) Evaluar si es necesario modificar simulaciones en AIMSUN para replicar implementación en terreno y evaluar a través de nuevas simulaciones posibles medidas que surjan luego de la implementación en terreno.
- i) Proposición final de esquema de desvíos o control dinámico de flujos, junto con todas las obras de ingeniería de detalle que requeriría el esquema.

7. CONCLUSIONES

7.1 Principales Conclusiones

Las principales conclusiones de la presente Tesis son las siguientes:

- a) Se estudió de manera detallada el comportamiento del tráfico en torno a la rampa de salida de autopista en estudio, en la que existía una cola que irrumpía desde la rampa de salida y se propagaba hacia la autopista.
- b) En el cuello de botella de la rampa de salida se encontró que el flujo de la autopista baja al activarse el cuello de botella. Se observó en primer lugar una cola que irrumpió desde la rampa de salida hacia la primera pista y que luego se propagó hacia las pistas contiguas hasta alcanzar las tres pistas.
- c) Se encontró que la interacción y entrecruzamiento entre los vehículos que salían de la autopista y los vehículos que provenían de las calles laterales a la autopista era uno de los principales factores que influían en la irrupción de la cola hacia la autopista, ya que se producía una sección de entrecruce entre la rampa de salida y la intersección ubicada inmediatamente aguas abajo de ésta.
- d) Se encontró que otros factores que influían en la formación de la cola era la existencia de un semáforo en la intersección ubicada inmediatamente aguas abajo de la rampa de salida y la corta distancia entre este semáforo y la rampa de salida.
- e) Se simularon diferentes esquemas de medidas de mitigación, encontrándose en todos ellos mejoras en las condiciones de operación de la autopista y la rampa de salida. Estos esquemas correspondieron a medidas de mejoramiento de infraestructura en la rampa de salida, medidas de optimización de semáforos en la intersección ubicada inmediatamente aguas abajo de la rampa de salida, y medidas conducentes a reducir la demanda en la sección de entrecruce de vehículos que salían de la autopista y los provenientes de calles laterales.

- f) En cuanto al diseño de las rampas de salida se encontró que a mayor longitud o número de las pistas de salida los vehículos salen a mayor velocidad de la autopista, lo que retrasa la formación de la cola. Asimismo, esto permite mayor capacidad de almacenamiento de vehículos cuando el cuello de botella está activo y existe cola en la rampa de salida.
- g) Se encontró que a través de la optimización del semáforo ubicado inmediatamente aguas abajo de la rampa de salida se obtienen mejoras importantes en la descarga de vehículos en la sección de entrecruce de vehículos, lo que retrasa la formación de la cola que irrumpe hacia la rampa de salida y la autopista. La simulación de esta medida arrojó una disminución del costo social de un 47% en la autopista y de un 35% en la rampa de salida.
- h) La medida que entregó mejores indicadores para la autopista y la rampa de salida evitando completamente la formación de la cola consistió en implementar desvíos de tránsito en la vialidad ubicada en torno a la rampa de salida. Esto permitió eliminar la interacción de vehículos entre los que salían de la autopista y los provenientes de las calles laterales a la autopista, aumentando la capacidad de descarga de la autopista y la rampa de salida. Las simulaciones del esquema de desvíos entregaron una disminución del costo social de un 76% en la autopista y un 65% en la rampa de salida.
- i) Al implementar en terreno un esquema de desvío de vehículos para eliminar la interacción de vehículos en la sección de entrecruce ubicada aguas abajo de una rampa de salida, se encontró que la cola de la autopista y de la rampa de salida desaparece por completo, al igual que la interacción y entrecruzamiento de vehículos en la sección de entrecruce.
- j) Al implementar en terreno el esquema propuesto, se encontró que la capacidad de descarga de la autopista aumenta en cerca de un 30%, mientras que en la rampa de salida en más de un 140%.

- k) A través de la optimización de semáforos ubicado en la ruta por donde se desvían los vehículos, se reducen los impactos para los vehículos que se deben desviar para dar prioridad a los vehículos provenientes de la rampa de salida de la autopista. En este caso particular de estudio, a pesar de que disminuyen sus demoras, igualmente se generan colas.
- l) Se diseñó una propuesta de esquema de control dinámico de flujos para rampas de salida, el cual consiste en aplicar desvíos temporales de vehículos mientras la congestión para los vehículos sea baja. Cuando aumenta la cola para estos vehículos, la cual actúa como mecanismo de control del esquema, se cancela el desvío hasta que baje la cola generada y en ese momento se vuelve a aplicar el desvío.
- m) Al simular el esquema de control dinámico de flujos para rampas de salida se encontró que las demoras en los vehículos desviados disminuyen notablemente con la aplicación del esquema. En el caso del esquema de control dinámico de flujos se obtuvo que el costo social agregado en la red disminuyen en un 42%, mientras que en el esquema de desvíos aplicado durante el período completo la disminución era de un 36%. Por otro lado, al aplicar este esquema, se obtienen disminuciones del costo social de un 72% en la autopista y un 52% en la rampa de salida, las cuales son cercanas a las obtenidas por el esquema de desvíos aplicado durante el período completo.
- n) Se propone una lista de recomendaciones para la eventual aplicación en terreno de manera definitiva del esquema de control dinámico de flujos para rampas de salida propuesto en este caso, las cuales pueden ser consideradas para otros sitios de estudio.
- o) Se propone una metodología general de análisis para estudiar otros sitios en los cuales existan cuellos de botella en torno a rampas de salida y enfrentar los problemas que se presentan en ellas.

7.2 Recomendaciones para Futuras Investigaciones

Las recomendaciones que se originan a partir de la presente Tesis son las siguientes:

- a) En primer lugar, se recomienda continuar con la investigación de esquemas del tipo control dinámico de flujos como el propuesto. En particular, aplicar en terreno el esquema en el sitio estudiado y analizar los resultados de su implementación para evaluar su aplicación definitiva.
- b) Se recomienda evaluar la factibilidad del esquema propuesto de control dinámico de flujos en otros sitios que presenten cuellos de botella generados en rampas de salida, para lo cual se recomienda utilizar la metodología propuesta. En el caso de que no sea factible, se recomienda evaluar las otras medidas propuestas.
- c) En cuanto al cuello de botella encontrado en la rampa de entrada del estudio de Sandoval y Muñoz (2008), el cual no fue considerado en esta investigación, se recomienda aplicar una metodología similar de análisis para generar medidas de mitigación.
- d) En este caso, se recomienda estudiar los efectos de las medidas propuestas en este estudio en aquel cuello de botella, analizando si la medida causó algún aumento de flujos desde ese lugar o alguna reducción de colas.
- e) Se recomienda estudiar la aplicación de esquemas del tipo *ramp metering* más tradicionales para aquella rampa de entrada, los cuales consisten en un control de acceso de vehículos a la autopista colocando un semáforo en la rampa de entrada, que de luz verde para permitir la entrada de vehículos.
- f) Por otro lado, se recomienda investigar si es posible aplicar un esquema de desvíos o reorientación de flujos como el aplicado en esta Tesis en aquel caso para evaluar si es posible reducir la demanda de vehículos que ingresa en la rampa de entrada. Adicionalmente, habría que estudiar los efectos negativos que tendría esta medida y la factibilidad de su eventual aplicación.

BIBLIOGRAFÍA

Cassidy, M. J. (2002). Critique of a Freeway On-Ramp Metering Scheme and Broader Related Issues. *Institute of Transportation Studies Research Report 2002-4. University of California.*

Cassidy, M. J. (2003). Freeway On-Ramp Metering, Delay Savings and the Diverge Bottleneck. *Transportation Research Record*, (1856), 1-5.

Cassidy, M. J. y Rudjanakanoknad, J. (2005). Increasing the Capacity of an Isolated Merge by Metering its On-Ramp. *Transportation Research Part B: Methodological*, 39(10), 896-913.

Cassidy, M. J. y Windover, J. R. (1995). Methodology for Assessing Dynamics of Freeway Traffic Flow. *Transportation Research Record*, (1484), 73-79.

Cassidy, M. J., Anani, S. B. y Haigwood, J. M. (2002), Study of Freeway Traffic near an Off-Ramp. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 36(6), 563-572.

Daganzo, C. F. (1999), Remarks on Traffic Flow Modeling and its Applications. *Traffic and Mobility Simulation Economics and Environment Conference*, Aachen, Germany, 105-115.

Daganzo, C. F., Cassidy, M. J. y Bertini, R. L. (1999). Possible Explanations of Phase Transitions in Highway Traffic. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33(5), 365-379.

Daganzo, C. F., Laval, J. A. y Muñoz, J. C. (2002). Some Ideas for Freeway Congestion Mitigation with Advanced Technologies. *Traffic Engineering and Control*, 43(10), 397-403.

Espinoza, C. (2004), Calibración de parámetros de transporte público en tráfico mixto para modelos micro: GETRAM en Santiago. *Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, Pontificia Universidad Católica de Chile.*

Gipps, P. G. (1981). A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Board, Vol. 15-B*, 105-111.

Gipps, P. G. (1986a). A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research Part B: Methodological* 20(5), 403-414.

Gipps, P. G. (1986b). MULTSIM: A Model for Simulating Vehicular Traffic on Multi-Lane Arterial Roads. *Mathematics and Computers in Simulation*, 28, 291-295.

Hagen, L., Pei-Sung, L. y Fabregas, A. (2006). A Toolbox for reducing queues at Freeway Off-Ramps. *Center for Urban Transportation Research, Florida Department of Transportation, University of South Florida.* Report BD544-10.

Jia, Z., Varaiya, P., Chen, C., Petty, K. y Skabardonis, A. (2000). Congestion, Excess Demand, and Effective Capacity in California Freeways. *PeMS Development Group, University of California at Berkeley.*

Kerner, B. S. y Rehborn, H. (1997). Experimental Properties of Phase Transitions in Traffic Flow. *Physical Review Letters*, 79(20), 4030-4033.

Lacalle, M. (2003), Calibración del microsimulador AIMSUN para flujo ininterrumpido en la ciudad de Santiago. *Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, Pontificia Universidad Católica de Chile.*

Lastra, M. S. (2003). Aplicación y calibración del HCM 2000 en una autopista chilena. *Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile.*

Mideplan (2009). Precios sociales para la evaluación social de proyectos. Sistema de Estadísticas Básicas de Inversión (SEBI) 2010.

Muñoz, J. C. y Daganzo, C. F. (2000). Experimental Characterization of Multi-Lane Freeway Traffic Upstream of an Off-Ramp Bottleneck. *California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH), Working Papers.*

Muñoz, J. C. y Daganzo, C. F. (2002a). Fingerprinting Traffic from Static Freeway Sensors. *Cooperative Transportation Dynamics I*, 1-11.

Muñoz, J. C. y Daganzo, C. F. (2002b). The Bottleneck Mechanism of a Freeway Diverge. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 36(6), 483-505.

Newell, G. F. (1999). Delays Caused by a Queue at a Freeway Exit Ramp. *Transportation Research Part B: Methodological*, 33(5), 337-350.

Salas, F. (2006). Avance Hacia el Desarrollo de un Manual Básico de Gestión de Tránsito. *Memoria de Título, Ingeniería Civil, Universidad de Chile.*

Sandoval, F. y Muñoz, J. C. (2008). Análisis de formación y propagación de congestión en autopistas urbanas en Santiago de Chile. Caso de estudio: Autopista Central. *XV Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte*, Cartagena de Indias, Colombia, 14-17 de Septiembre de 2008.

Sectra (1988). Manual de diseño y evaluación social de proyectos de vialidad urbana (Mespivu).

TSS Transport Simulation Systems (2006), *AIMSUN 5.1 Microsimulator User's Manual Version 5.1.4*.

Velasco, L. M. (2004), Calibración de parámetros básicos vehiculares para flujo interrumpido en modelos de simulación microscópica: GETRAM en Santiago. *Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, Pontificia Universidad Católica de Chile*.

Von Mühlenbrock, H. (2005), Optimización de Semáforos: SIGCOM 2. *Memoria de título de Ingeniero Civil de Industrias, con Diploma en Ingeniería de Transporte. Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, Pontificia Universidad Católica de Chile*.

ANEXOS

ANEXO A: CONTEOS DE TRÁFICO

En las siguientes tablas se presentan los conteos de tráfico realizados en las 4 intersecciones consideradas en el estudio. Se presentan los conteos agrupados cada 15 minutos y luego el flujo promedio de todo el período de medición.

Tabla A-1: Conteos en rampa de salida e intersección Manuel Rodríguez/10 de Julio

Rampa de salida e Intersección Manuel Rodríguez/10 de Julio											
Hora		Autopista	Rampa de salida			Manuel Rodríguez			10 de Julio		
			Autos	Buses	Camiones	Autos	Buses	Camiones	Autos	Buses	Camiones
7:00	7:15	671	290	10	3	118	8	9	16	1	0
7:15	7:30	961	331	18	2	159	9	5	36	0	0
7:30	7:45	1045	281	12	2	147	2	7	63	0	1
7:45	8:00	1070	201	9	2	149	8	6	80	0	2
8:00	8:15	1046	207	15	6	159	6	3	69	0	3
8:15	8:30	1060	189	12	5	145	7	6	55	1	2
8:30	8:45	841	150	15	6	115	5	5	48	0	3
8:45	9:00	817	157	21	12	121	9	6	43	0	6
9:00	9:15	911	155	6	6	119	3	12	48	0	3
9:15	9:30	837	195	8	3	150	3	3	63	0	2
Promedio (veh/hr)		3704	862	50	19	553	24	25	208	1	9

Fuente: Elaboración propia

Tabla A-2: Conteos en intersección Manuel Rodríguez/Santa Isabel

Intersección Santa Isabel/M. Rodríguez										
Hora		Manuel Rodríguez								
		Directo			Derecha			Izquierda		
		Autos	Buses	Camiones	Autos	Buses	Camiones	Autos	Buses	Camiones
7:00	7:15	253	19	10	159	0	2	12	0	1
7:15	7:30	383	27	6	125	0	1	18	0	0
7:30	7:45	330	14	8	146	0	2	15	0	0
7:45	8:00	279	17	7	133	0	2	16	1	1
8:00	8:15	239	21	10	176	0	2	20	0	0
8:15	8:30	216	20	10	155	0	3	18	0	0
8:30	8:45	142	20	11	153	0	3	18	0	2
8:45	9:00	150	30	19	153	0	5	18	0	1
9:00	9:15	161	9	17	144	0	4	17	0	0
9:15	9:30	250	11	6	141	0	2	16	0	0
Promedio (veh/hr)		962	75	42	594	0	10	68	0	2
Hora		Santa Isabel								
		S. Isa. Directo Sube			S. Isa. Directo Baja			S. Isa. Derecha Baja		
		Autos	Buses	Camiones	Autos	Buses	Camiones	Autos	Buses	Camiones
7:00	7:15	261	6	4	34	2	0	13	0	0
7:15	7:30	430	19	5	67	18	0	36	0	0
7:30	7:45	500	10	7	89	9	0	121	0	0
7:45	8:00	517	13	7	82	13	0	102	0	0
8:00	8:15	518	12	7	85	12	0	111	0	0
8:15	8:30	527	14	9	65	13	0	114	0	0
8:30	8:45	549	14	10	82	14	0	115	0	0
8:45	9:00	503	20	16	73	19	0	107	0	0
9:00	9:15	493	6	14	69	6	0	105	0	0
9:15	9:30	485	7	5	70	7	0	103	0	0
Promedio (veh/hr)		1912	48	34	286	45	0	371	0	0

Fuente: Elaboración propia

Tabla A-3: Conteos en intersección Santa Isabel/Dieciocho

Intersección Santa Isabel - Dieciocho													
Hora		Santa Isabel Directo						Dieciocho					
		Santa Isabel Directo			Santa Isabel Hacia 18			18 Directo			18 Hacia Santa Isabel		
		Autos	Buses	Camiones	Autos	Buses	Camiones	Autos	Buses	Camiones	Autos	Buses	Camiones
7:00	7:15	206	2	3	55	4	1	71	9	0	14	9	1
7:15	7:30	316	18	5	114	1	0	155	12	0	23	4	0
7:30	7:45	318	9	5	182	1	2	266	10	2	18	6	0
7:45	8:00	343	13	7	174	0	0	378	10	0	23	2	0
8:00	8:15	349	12	6	168	1	1	286	10	1	23	4	1
8:15	8:30	347	13	8	180	1	1	319	12	1	22	5	0
8:30	8:45	365	14	9	184	0	1	346	12	1	24	4	1
8:45	9:00	335	19	14	168	1	2	300	16	2	22	6	0
9:00	9:15	327	6	13	166	0	2	301	5	2	21	2	0
9:15	9:30	322	7	5	162	0	1	297	6	1	21	2	1
Promedio (veh/hr)		1291	45	30	621	4	4	1088	40	3	84	17	2

Fuente: Elaboración propia

Tabla A-4: Conteos en intersección 10 de Julio/Dieciocho

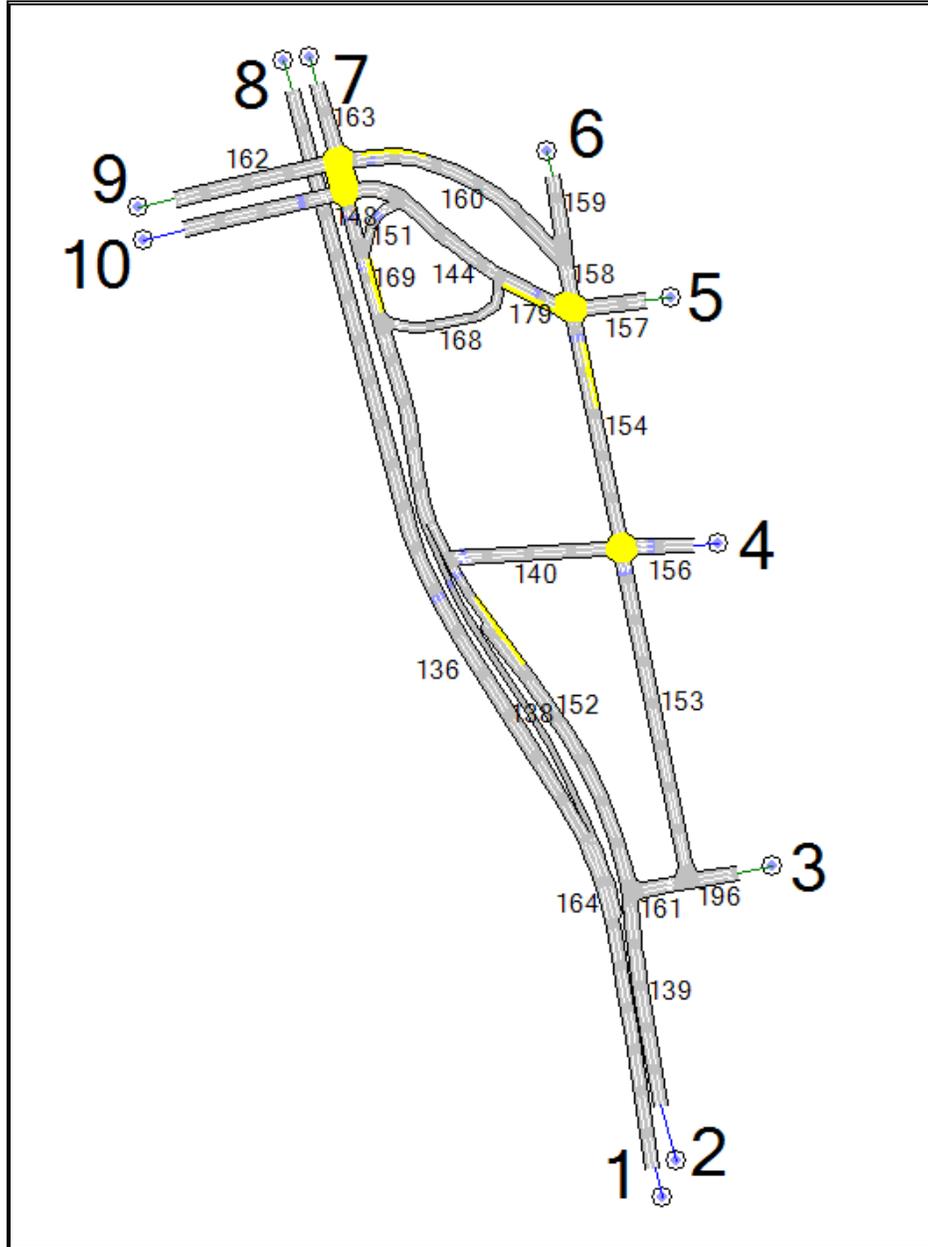
10 de Julio - Dieciocho													
Hora		10 de Julio						Dieciocho					
		10 de Julio Directo			10 de Julio Hacia 18			18 Directo			18 Hacia 10 de Julio		
		Autos	Buses	Camiones	Autos	Buses	Camiones	Autos	Buses	Camiones	Autos	Buses	Camiones
7:00	7:15	14	1	0	76	18	1	9	0	0	2	0	0
7:15	7:30	32	0	0	159	16	0	19	0	0	4	0	0
7:30	7:45	56	0	1	254	16	2	30	0	0	7	0	0
7:45	8:00	71	0	2	358	12	0	43	0	0	9	0	0
8:00	8:15	61	0	3	276	13	2	33	0	0	8	0	0
8:15	8:30	49	1	2	305	16	1	37	0	0	6	0	0
8:30	8:45	43	0	3	330	15	1	40	0	0	5	0	0
8:45	9:00	38	0	6	287	22	2	34	0	0	5	0	0
9:00	9:15	43	0	3	288	7	2	35	0	0	5	0	0
9:15	9:30	56	0	2	284	8	1	34	0	0	7	0	0
Promedio (veh/hr)		186	1	9	1046	57	5	126	0	0	23	0	0

Fuente: Elaboración propia

ANEXO B: DATOS INGRESADOS EN AIMSUN

En este anexo se presentan los datos ingresados de flujos ingresados en AIMSUN. Se indican los flujos de entrada en la red y los porcentajes de viraje en cada intersección. Los códigos de AIMSUN para los arcos se presentan en la Figura B-1.

Después se presentan los flujos y porcentajes de viraje ingresados y luego estos mismos datos corregidos. Finalmente se presenta la diferencia porcentual entre los datos ingresados y corregidos.



Fuente: Elaboración propia

Figura B-1: Códigos de arcos y pares O-D en AIMSUN

Tabla B-1: Flujos y porcentajes de viraje ingresados en AIMSUN

Hora	9:00 - 9:15	9:15 - 9:30	9:30 - 9:45	9:45 - 10:00	10:00 - 10:15	10:15 - 10:30	10:30 - 10:45	10:45 - 11:00
Origen	Flujos [veh/hr]							
1	3.844	5.168	5.304	5.084	5.012	4.996	3.964	3.896
2	515	728	737	800	798	751	640	639
4	361	764	1.239	1.716	1.349	1.414	1.491	1.302
10	1.044	1.720	2.000	2.066	2.070	2.106	2.196	2.010
Movimiento	Porcentajes de viraje							
139/152	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%
139/161	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
144/179	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%
144/168	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
148/163	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%
148/162	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
153/154	84%	83%	82%	83%	81%	86%	88%	88%
153/140	16%	17%	18%	17%	19%	14%	12%	12%
154/158	84%	87%	94%	94%	93%	94%	94%	93%
154/157	16%	13%	6%	6%	7%	6%	6%	7%
156/140	16%	17%	18%	17%	18%	14%	11%	12%
156/154	84%	83%	82%	83%	82%	86%	89%	88%
158/159	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
158/160	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
160/162	72%	65%	42%	45%	43%	36%	42%	41%
160/163	28%	35%	58%	55%	57%	64%	58%	59%
161/196	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%
161/153	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%
164/138	30%	26%	21%	16%	17%	15%	15%	16%
164/136	70%	74%	79%	84%	83%	85%	85%	84%
169/148	61%	75%	69%	68%	58%	58%	48%	50%
169/151	39%	25%	31%	32%	42%	42%	52%	50%
179/157	79%	73%	64%	66%	68%	66%	67%	67%
179/158	21%	27%	36%	34%	32%	34%	33%	33%

Fuente: Elaboración propia

* Movimientos se indican desde arco de Origen a arco de Destino. Ver arcos en Figura B-1

Tabla B-2: Flujos y porcentajes de viraje corregidos en AIMSUN

Hora	9:00 - 9:15	9:15 - 9:30	9:30 - 9:45	9:45 - 10:00	10:00 - 10:15	10:15 - 10:30	10:30 - 10:45	10:45 - 11:00
Origen	Flujos [veh/hr]							
1	4.344	5.668	6.304	6.084	6.012	5.996	3.964	3.896
2	495	678	667	710	708	651	500	469
4	361	764	1.239	1.416	1.349	1.214	941	902
10	1.044	1.720	2.000	2.066	2.070	2.106	2.196	2.010
Movimiento	Porcentajes de viraje							
139/152	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%
139/161	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
144/179	95%	95%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
144/168	5%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
148/163	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%
148/162	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
153/154	84%	83%	82%	83%	81%	86%	88%	88%
153/140	16%	17%	18%	17%	19%	14%	12%	12%
154/158	84%	87%	94%	94%	93%	94%	94%	93%
154/157	16%	13%	6%	6%	7%	6%	6%	7%
156/140	16%	13%	18%	16%	26%	14%	11%	12%
156/154	84%	87%	82%	84%	74%	86%	89%	88%
158/159	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
158/160	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
160/162	72%	65%	42%	45%	43%	36%	42%	41%
160/163	28%	35%	58%	55%	57%	64%	58%	59%
161/196	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%
161/153	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%
164/138	34%	28%	28%	22%	24%	26%	20%	20%
164/136	66%	72%	72%	78%	76%	74%	80%	80%
169/148	50%	70%	60%	61%	53%	52%	46%	50%
169/151	50%	30%	40%	39%	47%	48%	54%	50%
179/157	79%	73%	64%	66%	68%	66%	67%	67%
179/158	21%	27%	36%	34%	32%	34%	33%	33%

Fuente: Elaboración propia

* Movimientos se indican desde arco de Origen a arco de Destino. Ver arcos en Figura B-1

Tabla B-3: Diferencia porcentual entre datos ingresados y corregidos en AIMSUN

Hora	9:00 - 9:15	9:15 - 9:30	9:30 - 9:45	9:45 - 10:00	10:00 - 10:15	10:15 - 10:30	10:30 - 10:45	10:45 - 11:00
Origen	Diferencia porcentual							
1	13%	10%	19%	20%	20%	20%	0%	0%
2	-4%	-7%	-9%	-11%	-11%	-13%	-22%	-27%
4	0%	0%	0%	-17%	0%	-14%	-37%	-31%
10	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Movimiento	Diferencia porcentual							
139/152	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
139/161	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
144/179	0%	0%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
144/168	0%	0%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
148/163	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
148/162	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
153/154	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
153/140	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
154/158	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
154/157	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
156/140	0%	-24%	0%	-6%	44%	0%	0%	0%
156/154	0%	5%	0%	1%	-10%	0%	0%	0%
158/159	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
158/160	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
160/162	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
160/163	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
161/196	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
161/153	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
164/138	13%	8%	33%	38%	41%	73%	33%	25%
164/136	-6%	-3%	-9%	-7%	-8%	-13%	-6%	-5%
169/148	-18%	-7%	-13%	-10%	-9%	-10%	-4%	0%
169/151	28%	20%	29%	22%	12%	14%	4%	0%
179/157	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
179/158	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Fuente: Elaboración propia

* Movimientos se indican desde arco de Origen a arco de Destino. Ver arcos en Figura B-1

ANEXO C: LÍNEAS DE TRANSPORTE PÚBLICO EN AIMSUN

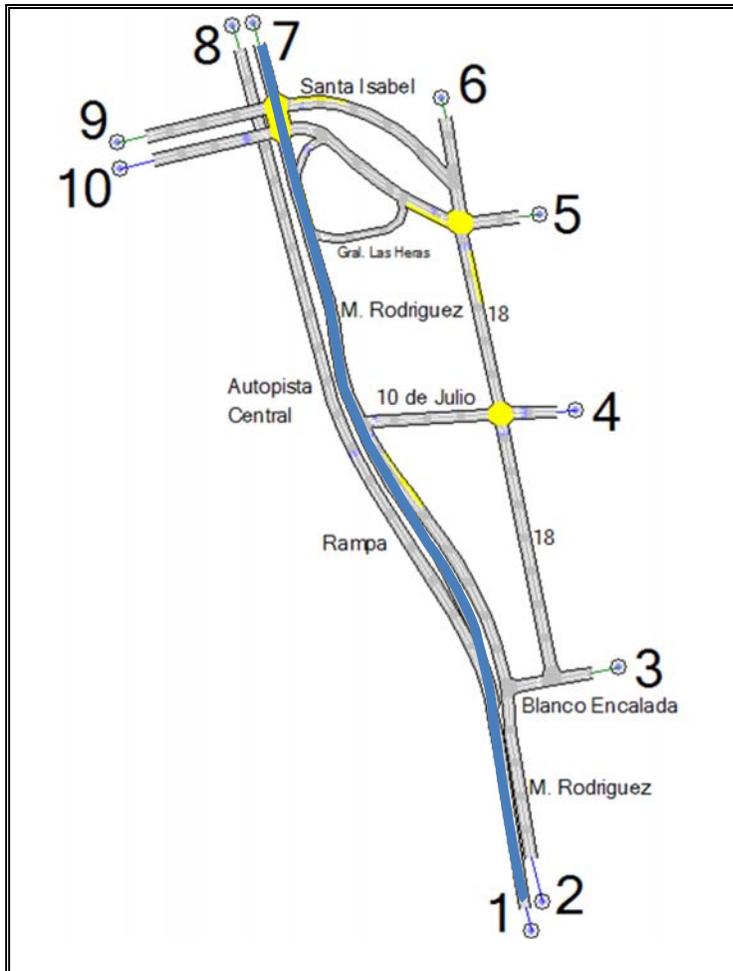
A continuación se presentan los recorridos de las líneas de transporte público en la red de modelación en AIMSUN. Existen 6 recorridos de Transantiago que circulan por la red. Uno de ellos lo hacía en dos sentidos, por lo que fueron considerados como líneas distintas en la modelación, mientras que había otros 2 que hacían el mismo recorrido dentro de la red, por lo que fueron agrupados.

En la Tabla C-1 se presentan las frecuencias medidas para cada línea, mientras que en las próximas páginas se presentan los recorridos de las líneas en la red.

Tabla C-1: Líneas de transporte público y frecuencias

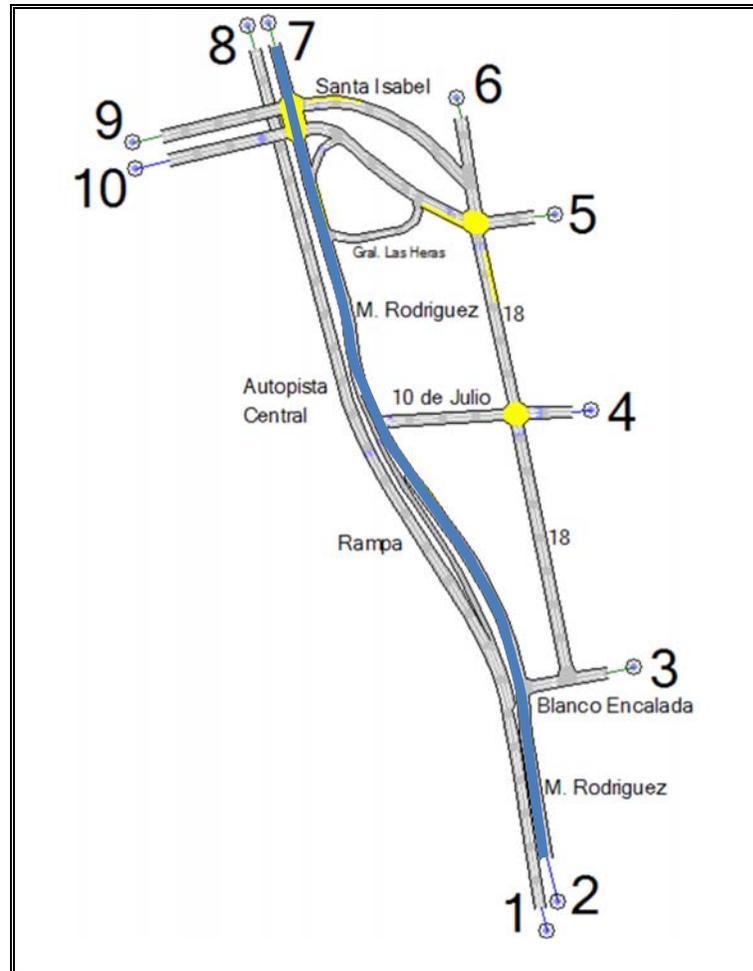
Línea/Recorrido		Frecuencia (buses/hr)	Intervalo (min:seg)
201e		56	1:04
302		27	2:13
H17	Poniente-Oriente	28	2:08
	Oriente-Poniente	28	2:08
D03		19	3:09
113		17	3:31
115			

Fuente: Elaboración propia



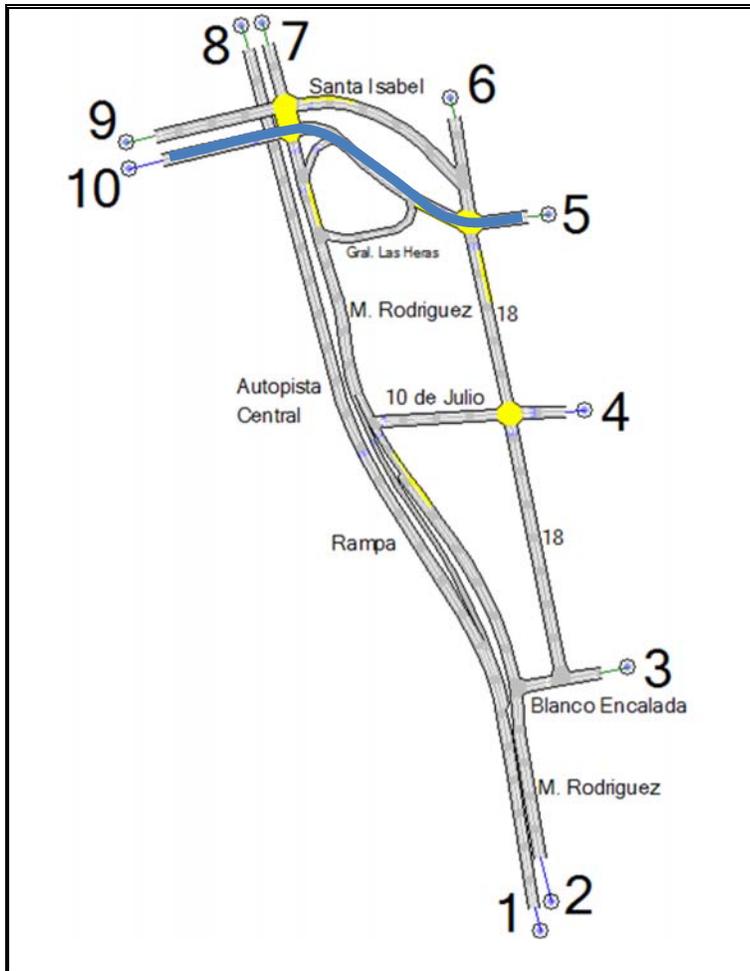
Fuente: Elaboración propia

Figura C-1: Línea de Transporte Público: 201e



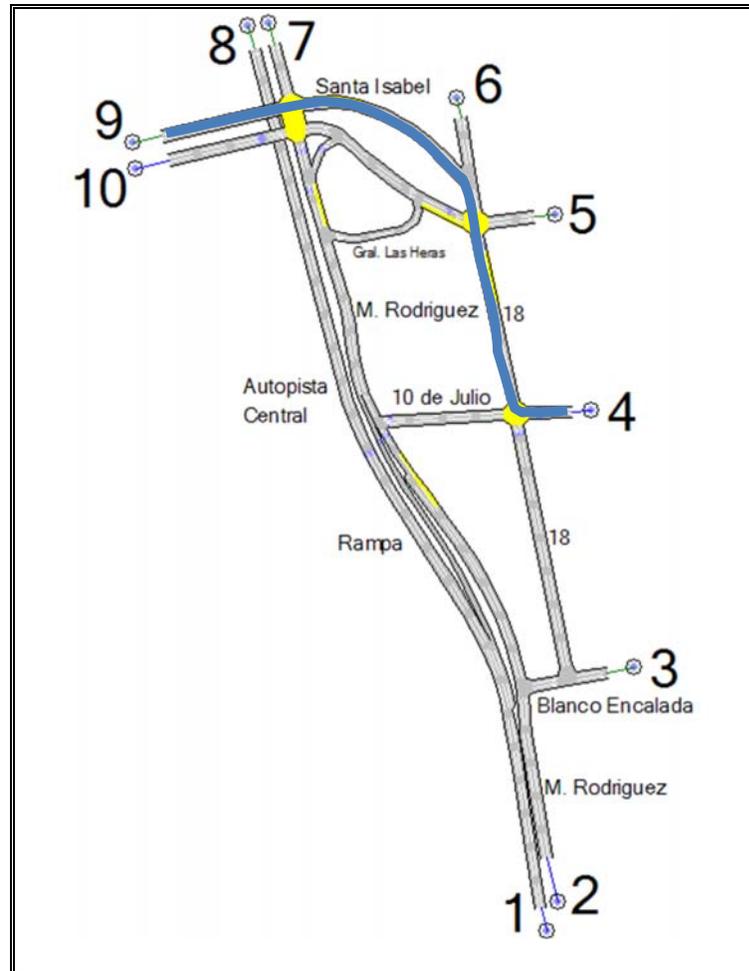
Fuente: Elaboración propia

Figura C-2: Línea de Transporte Público: 302



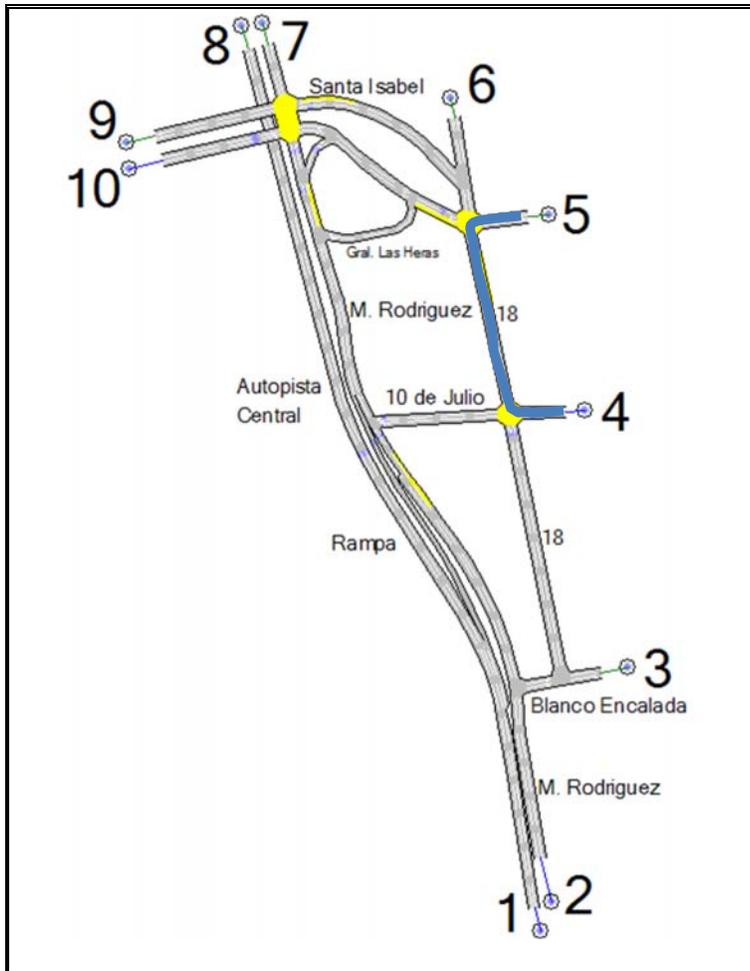
Fuente: Elaboración propia

Figura C-3: Línea de Transporte Público: H17 Poniente-Oriente



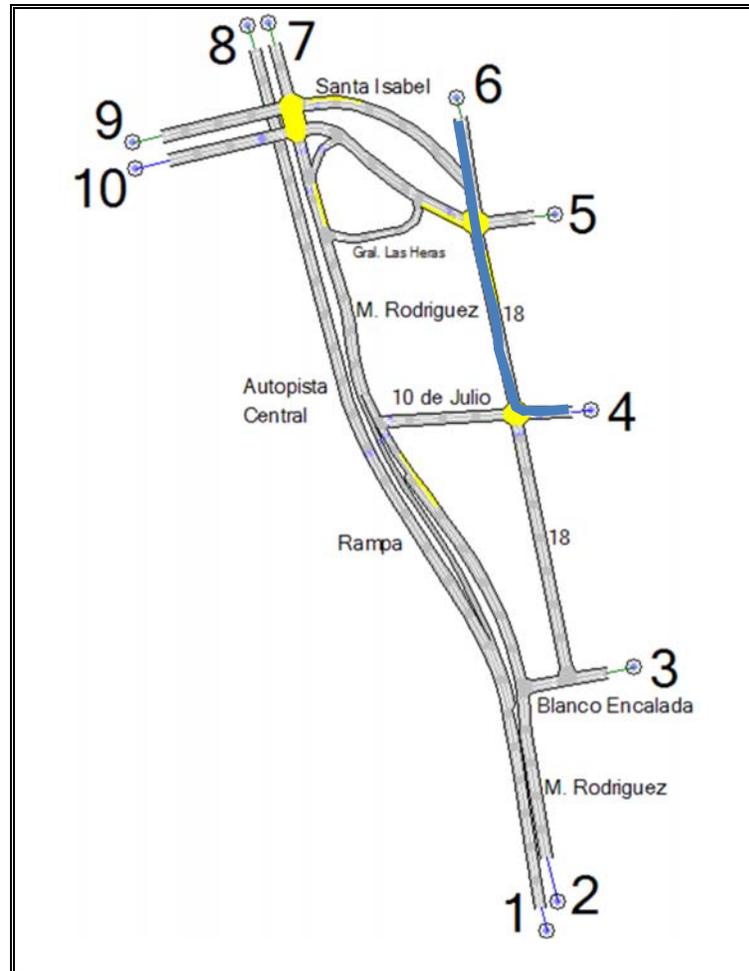
Fuente: Elaboración propia

Figura C-4: Línea de Transporte Público: H17 Oriente-Poniente



Fuente: Elaboración propia

Figura C-5: Línea de Transporte Público: D03



Fuente: Elaboración propia

Figura C-6: Línea de Transporte Público: 113 y 115

ANEXO D: PROCESO DE CALIBRACIÓN AIMSUN

A continuación se presenta el proceso de calibración de AIMSUN. En primer lugar, en la Tabla D-1 se describen los puntos que se utilizaron para comparar entre los flujos simulados y medidos en terreno, para los cuales luego se presenta su ubicación en la Figura D-1.

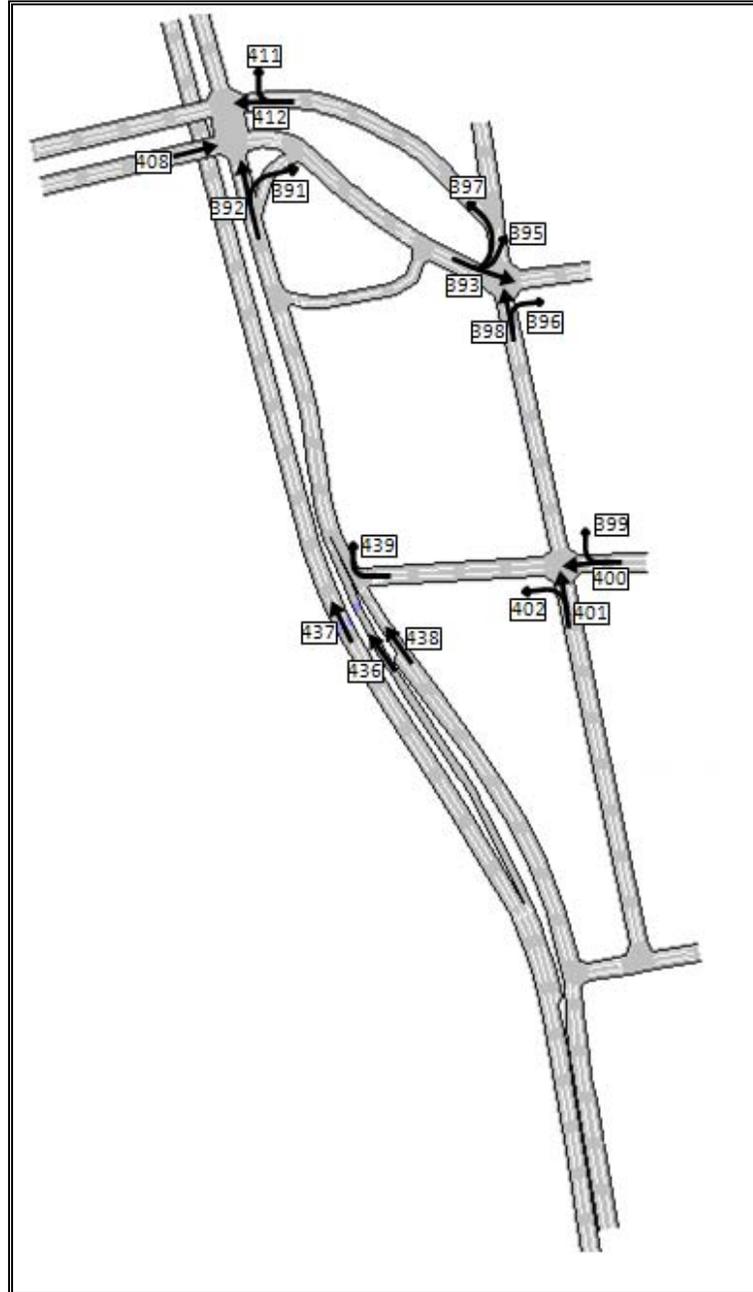
Adicionalmente, en la Tabla D-1 se presentan los criterios de calibración utilizados, que para flujos mayores a 700 veh/hr se consideró que la diferencia porcentual entre el flujo simulado y medido fuera menos de un 15% y para flujos menores a 700 veh/hr, que la diferencia entre flujo simulado y medido sea menor a 100 veh/hr.

Finalmente, en la Tabla D-2 se presentan las diferencias porcentuales o absolutas, según sea el caso, para la asignación a la red antes de la calibración, y en la Tabla D-3 para después de la calibración.

Tabla D-1: Descripción de puntos y criterios de calibración

Intersección	Código	Descripción	Criterio	
Rampa de Salida / Manuel Rodríguez	437	Autopista	Flujo > 700 veh/hr	15%
	436	Rampa de Salida	Flujo > 700 veh/hr	15%
	438	Manuel Rodríguez	Flujo < 700 veh/hr	100 veh/hr
	439	10 de Julio	Flujo < 700 veh/hr	100 veh/hr
Santa Isabel / Manuel Rodríguez	392	Manuel Rodríguez Directo	Flujo > 700 veh/hr	15%
	391	Manuel Rodríguez hacia Santa Isabel	Flujo < 700 veh/hr	100 veh/hr
	408	Santa Isabel (Poniente - Oriente)	Flujo > 700 veh/hr	15%
	412	Santa Isabel (Oriente - Poniente) Directo	Flujo < 700 veh/hr	100 veh/hr
	411	Santa Isabel (Oriente - Poniente) hacia Manuel Rodríguez	Flujo < 700 veh/hr	100 veh/hr
Santa Isabel / Dieciocho	393	Santa Isabel Directo	Flujo > 700 veh/hr	15%
	395-394	Santa Isabel hacia Dieciocho	Flujo < 700 veh/hr	100 veh/hr
	398-397	Dieciocho Directo	Flujo > 700 veh/hr	15%
	396	Dieciocho hacia Santa Isabel (Poniente - Oriente)	Flujo < 700 veh/hr	100 veh/hr
10 de Julio / Dieciocho	401	Dieciocho Directo	Flujo < 700 veh/hr	100 veh/hr
	402	Dieciocho hacia 10 de Julio	Flujo < 700 veh/hr	100 veh/hr
	399	10 de Julio hacia Dieciocho	Flujo > 700 veh/hr	15%
	400	10 de Julio Directo	Flujo < 700 veh/hr	100 veh/hr

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

Figura D-1: Ubicación de puntos de calibración

Tabla D-2: Diferencias porcentuales o absolutas antes de calibración

Hora		437	436	438	439	392	391	408	412	411	393	395-394	398-397	396	401	402	399	400
7:00:00	7:15:00	-4%	0%	-13	-5	0%	-136	-1%	65	18	41%	59	0%	-7	-9	-6	-1%	0
7:15:00	7:30:00	-28%	-34%	-32	-37	-21%	-100	-1%	105	21	11%	4	3%	-27	-24	-7	1%	-31
7:30:00	7:45:00	-39%	-41%	31	-28	-17%	-164	-30%	-23	-64	-5%	-152	-16%	24	-77	-22	-9%	-6
7:45:00	8:00:00	-27%	-27%	82	-94	-4%	-142	-31%	99	74	-8%	-148	-22%	-5	-133	-27	-15%	-67
8:00:00	8:15:00	-33%	-26%	-115	20	6%	-259	-29%	-29	-33	-2%	-100	-23%	-45	-83	-17	-22%	37
8:15:00	8:30:00	-34%	-19%	-161	75	4%	-171	-30%	13	4	-2%	-156	-24%	-40	-115	-19	-20%	93
8:30:00	8:45:00	2%	13%	-66	28	42%	-145	-37%	58	37	-15%	-151	-16%	-26	-131	-16	-9%	44
8:45:00	9:00:00	11%	2%	-138	92	42%	-201	-30%	88	112	-4%	-83	-5%	-18	-105	-11	0%	103
7:00:00	9:00:00	-21%	-19%	-52	6	0%	-165	-26%	47	21	0%	-91	-16%	-18	-85	-16	-11%	21
																	Error agregado	-16%

Fuente: Elaboración propia

Tabla D-3: Diferencias porcentuales o absolutas después de calibración

Hora		437	436	438	439	392	391	408	412	411	393	395-394	398-397	396	401	402	399	400
7:00:00	7:15:00	7%	-6%	16	7	3%	-12	2%	84	19	13%	81	2%	-8	-7	-3	1%	10
7:15:00	7:30:00	-14%	-7%	-29	-35	-12%	-76	-1%	88	33	9%	36	0%	-25	-25	-9	-2%	-25
7:30:00	7:45:00	-15%	-7%	13	-61	-13%	-144	-14%	3	-60	1%	-109	-14%	31	-89	-22	-7%	-40
7:45:00	8:00:00	-14%	-9%	38	-49	7%	-121	-16%	79	72	0%	-77	-16%	-12	-128	-26	-12%	-23
8:00:00	8:15:00	-8%	-6%	-77	57	7%	-135	-19%	24	12	4%	-70	-7%	-37	-93	-19	-5%	77
8:15:00	8:30:00	-11%	-14%	6	16	-5%	-117	-20%	25	-12	7%	-141	-15%	-35	-111	-12	-14%	28
8:30:00	8:45:00	6%	12%	55	-49	11%	-100	-22%	2	1	-10%	-120	-19%	-42	-117	-13	-12%	-36
8:45:00	9:00:00	15%	12%	-39	-17	-2%	-76	-14%	22	-26	12%	-92	-19%	-36	-102	-11	-16%	-6
7:00:00	9:00:00	-6%	-5%	-3	-17	-2%	-98	-14%	41	5	4%	-62	-14%	-21	-84	-14	-10%	-2
																	Error agregado	-7%

Fuente: Elaboración propia

ANEXO E: MATRICES ESTIMADAS EN AIMSUN

A continuación se presentan las matrices estimadas en AIMSUN a partir de los flujos ingresados inicialmente, los cuales se presentan en el Anexo B. Los Orígenes y Destinos se pueden ver en la Figura B-1 del mismo Anexo.

Tabla E-1: Matriz estimada, período 7:00 – 7:15

O/D	3	5	6	7	8	9	Totales
1	0	114	26	230	863	21	1.254
2	3	37	9	100	0	28	177
4	0	27	44	41	0	50	162
10	0	259	28	13	0	0	300
Totales	3	437	107	384	863	99	1.893

Fuente: Elaboración propia

Tabla E-2: Matriz estimada, período 7:15 – 7:30

O/D	3	5	6	7	8	9	Totales
1	0	70	27	244	1057	25	1.423
2	4	40	15	162	0	31	252
4	0	32	72	73	0	86	263
10	0	397	61	40	0	0	498
Totales	4	539	175	519	1057	142	2.436

Fuente: Elaboración propia

Tabla E-3: Matriz estimada, período 7:30 – 7:45

O/D	3	5	6	7	8	9	Totales
1	0	51	25	185	876	21	1.158
2	5	33	13	134	0	32	217
4	0	39	106	132	0	87	364
10	0	304	71	45	0	0	420
Totales	5	427	215	496	876	140	2.159

Fuente: Elaboración propia

Tabla E-4: Matriz estimada, período 7:45 – 8:00

O/D	3	5	6	7	8	9	Totales
1	0	46	21	140	848	14	1.069
2	3	41	12	146	0	32	234
4	0	41	135	145	0	98	419
10	0	292	69	36	0	0	397
Totales	3	420	237	467	848	144	2.119

Fuente: Elaboración propia

Tabla E-5: Matriz estimada, período 8:00 – 8:15

O/D	3	5	6	7	8	9	Totales
1	0	48	19	126	790	13	996
2	3	40	16	121	0	28	208
4	0	45	124	138	0	85	392
10	0	295	62	36	0	0	393
Totales	3	428	221	421	790	126	1.989

Fuente: Elaboración propia

Tabla E-6: Matriz estimada, período 8:15 – 8:30

O/D	3	5	6	7	8	9	Totales
1	0	50	21	132	849	13	1.065
2	1	47	16	124	0	26	214
4	0	41	121	138	0	82	382
10	0	330	71	38	0	0	439
Totales	1	468	229	432	849	121	2.100

Fuente: Elaboración propia

Tabla E-7: Matriz estimada, período 8:30 – 8:45

O/D	3	5	6	7	8	9	Totales
1	0	44	21	111	906	11	1.093
2	2	44	12	133	0	26	217
4	0	42	114	125	0	79	360
10	0	327	68	40	0	0	435
Totales	2	457	215	409	906	116	2.105

Fuente: Elaboración propia

Tabla E-8: Matriz estimada, período 8:45 – 9:00

O/D	3	5	6	7	8	9	Totales
1	0	57	22	149	1073	12	1.313
2	2	42	11	114	0	24	193
4	0	32	91	114	0	76	313
10	0	318	62	42	0	0	422
Totales	2	449	186	419	1073	112	2.241

Fuente: Elaboración propia