



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE DISTINTOS TIPOS DE PRIORIDAD AL
TRANSPORTE PÚBLICO Y DEL ANCHO DE VÍA A TRAVÉS DE MODELOS
LINEALES DE TIEMPO DE VIAJE UTILIZANDO DATOS DEL SISTEMA DE
TRANSPORTE PÚBLICO DE SANTIAGO**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERIA, MENCIÓN TRANSPORTE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

CAMILA ISABEL SCHNEIDER APUD

PROFESORES GUÍA:
MARCELA MUNIZAGA MUÑOZ
JAIME GIBSON ALDUNATE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ANTONIO GSCHWENDER KRAUSE
ALEJANDRO TIRACHINI HERNÁNDEZ
JUAN CARLOS HERRERA MALDONADO

SANTIAGO DE CHILE
JULIO 2013

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil y grado de Magíster en
Ciencias de la Ingeniería
Mención Transporte
POR: Camila Isabel Schneider Apud
FECHA: Julio 2013
PROFESORES GUÍA: Jaime Gibson Aldunate
Marcela Munizaga Muñoz

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE DISTINTOS TIPOS DE PRIORIDAD AL
TRANSPORTE PÚBLICO Y DEL ANCHO DE VÍA A TRAVÉS DE MODELOS LINEALES
DE TIEMPO DE VIAJE UTILIZANDO DATOS DEL SISTEMA DE TRANSPORTE
PÚBLICO DE SANTIAGO**

Se modela tiempo de viaje linealmente, obtenido como el recíproco de la velocidad comercial calculada por Cortés et al. (2011) a partir de pulsos GPS emitidos por los buses del Transporte Público de Santiago.

Para esto, se utilizan subidas y bajadas de pasajeros, detenciones en paraderos y demora en intersecciones. Las subidas y bajadas son recolectadas automáticamente mediante el sistema de pago de la tarjeta Bip! y luego procesadas como plantean Munizaga y Palma (2012). Las detenciones se infieren de lo anterior, considerando que el bus se detuvo si hay subida y/o bajada en el paradero. La demora en intersecciones se modela novedosamente como demora uniforme potencial y una reducción por coordinación, que requiere sólo de la programación del semáforo, y se incluyen variables mudas de congestión donde corresponde. Luego, toda la información es de fácil obtención y a bajo costo.

Además, se incluye una variable de tipo de prioridad al transporte público y el ancho de vía.

El caso particular es el eje de Santa Rosa, Santiago, entre Av. Américo Vespucio y Copiapó, en dirección Sur-Norte. El interés en este tramo radica en que hay un segmento de dos pistas, sin prioridad para los buses, luego opera un corredor segregado y luego opera una vía exclusiva entre 7.30 y 10 hrs y entre 17 y 21 hrs y tráfico mixto de tres pistas el resto del día.

La primera conclusión es que efectivamente se puede obtener una distribución adecuada del tiempo de viaje a partir de datos GPS y Bip! incluso en casos en que hay distintas condiciones de operación de los buses y tramos con muy distintos niveles de congestión en intersecciones y actividad en paraderos. Para lo anterior, es sumamente relevante la modelación de la demora en intersecciones semaforizadas, que se comprueba que funciona adecuadamente.

Por otro lado, el corredor tiene velocidad de 30,3 km/h, cercana a la del Metro de Santiago, confirmando su efectividad como tipo de prioridad a mucha menor inversión. En cambio, la vía exclusiva no opera como tal en lo absoluto, probablemente por falta de fiscalización. Se establece que un corredor segregado produce grandes ahorros en el tiempo de viaje si se compara con tráfico mixto: del orden de 1 min/km por sentido de circulación para velocidades cercanas a 20 km/h que aumentan notoriamente si hay congestión en intersecciones. Se generan funciones para estimar la magnitud de los potenciales ahorros al poner corredor donde actualmente hay tráfico mixto de 2 y 3 pistas.

Agradecimientos

A mi familia y amigos por haberme apoyado siempre con cariño y paciencia en este proceso que, a ratos, parecía interminable.

A todos mis profesores por su guía y enseñanzas.

A la profe Marcela por su tiempo, comprensión y apoyo en los momentos difíciles. Gracias por ese espacio de contención y por darme el impulso para seguir.

Y en especial, al Profe Jaime por las largas horas de trabajo y dedicación, desde lo académico hasta las más profundas conversaciones y enseñanzas sobre la vida. Del tiempo compartido, me llevo un aprendizaje que me acompañará siempre y una forma de ver la vida realmente valorable. Gracias por ser realmente un maestro.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
2. Revisión bibliográfica	4
2.1. Metodología base para cálculo de tiempos medios de viaje	4
2.2. Modelos de Tiempo de Viaje y Velocidad Comercial	6
2.2.1. Modelos Lineales de Tiempo de Viaje	6
2.2.2. Modelos Exponenciales	8
2.3. Trabajos teóricos	10
3. Generación y análisis de datos	13
3.1. Descripción y definiciones del caso particular: eje Santa Rosa	13
3.2. Generación de datos para los buses	22
3.2.1. Flujo de buses	23
3.2.2. Subidas y bajadas	25
3.2.3. Detenciones en paraderos	27
3.2.4. Tiempo medio de viaje	29
4. Modelación	34
4.1. Modelación del tiempo de cruce	34
4.2. Modelación de la demora en paraderos	36
4.3. Modelación de demora en intersecciones semaforizadas	38
4.3.1. Características importantes para la modelación de intersecciones semaforizadas	38
4.3.2. Modelación	39
4.3.3. Demora excedente	44
5. Estimación del modelo y análisis de resultados	47
5.1. Modelo para el corredor segregado	47
5.1.1. Estimación de modelos alternativos	47
5.1.2. Calidad del ajuste	50
5.2. Modelo para los 7 tramos	52
5.2.1. Estimación del modelo	52
5.2.2. Calidad del ajuste	60
5.3. Análisis de resultados del modelo	63
5.3.1. Análisis de parámetros	63
5.3.2. Análisis de componentes	66
5.3.3. Impactos según tipo de vía	69

6. Conclusiones y recomendaciones	76
6.1. Conclusiones y recomendaciones metodológicas	76
6.2. Conclusiones y recomendaciones prácticas	77
8. Bibliografía	79
Anexos	82
Anexos	82
A. Modelos alternativos de tiempo de viaje	83
A.1. Modelos corredor con variable de flujo	83
A.2. Modelos 7 tramos, variables extra <i>FRC</i>	85
A.3. Modelo 7 tramos, prueba de variables no significativas en primera instancia	88
A.4. Test de significancia conjunta de variables	89

Índice de figuras

2.1. Proyección de pulsos GPS sobre rutas	5
2.2. Proceso de interpolación en base a pulsos GPS	5
3.1. Perfil del corredor	14
3.2. Esquema del eje	15
3.3. Tramos 1 y 2	16
3.4. Tramos 3 y 4	17
3.5. Tramos 5 y 6	18
3.6. Tramo 7	19
3.7. Flujo de buses por tramo-período	24
3.8. Subidas por tramo-período (pax/bus-km)	26
3.9. Bajadas por tramo-período [pax/(bus-km)]	27
3.10. Número medio de detenciones por tramo-período (det/bus-km)	28
4.1. Componentes de la demora media	40
5.1. Tiempos medios observados versus estimados (s/km)	62
5.2. Tiempos de viaje observado (s/km) v/s Ahorros (s/km) para tráfico mixto de 2 pistas	72
5.3. Tiempos de viaje observado (s/km) v/s Ahorros (s/km) para tráfico mixto de 3 pistas	72

Índice de tablas

2.1. Resumen modelos lineales de tiempo de viaje	8
3.1. Definición de tramos Santa Rosa	20
3.2. Prioridad por tramo	20
3.3. Paraderos asignados e intersecciones semaforizadas por tramo	20
3.4. Intersecciones semaforizadas en red	21
3.5. Tiempos de ciclo y verde (s)	22
3.6. Flujo (bus/h) por tramo-período-día	24
3.7. Proporción de buses articulados	24
3.8. Subidas (pax/bus-km) por tramo-período-día	26
3.9. Bajadas (pax/bus-km) por tramo-período-día	27
3.10. Detenciones por tramo (det/bus-km)	28
3.11. Filtros a nivel de bus	30
3.12. Velocidades en escala de colores	31
3.13. Tiempo medio de viaje por tramo-período (s/km)	32
4.1. Variables mudas de congestión por tramo-período	45
4.2. Dummies de demora excedente destacadas	45
5.1. Modelos corredor segregado 1 y 2	48
5.2. Modelo PBA	49
5.3. Modelos PBA 2 y 3	50
5.4. Modelos 7 tramos	53
5.5. Modelos 7 tramos, variables extra <i>FRC</i>	56
5.6. Modelos 7 tramos con <i>PBA</i>	57
5.7. Modelos 7 tramos, variables extra <i>PBA</i>	59
5.8. Comparación de parámetros obtenidos para el corredor segregado	61
5.9. Errores medios totales y porcentuales	61
5.10. Tiempos medios estimados versus observados por período (s/km)	62
5.11. Valores de parámetro asociado a <i>DUMD</i> y su límite inferior	63
5.12. Variables mudas de congestión por tramo-período	64
5.13. Distribución del tiempo medio de viaje por período (s/km)	66
5.14. Distribución de la demora media en intersecciones por período (s/int)	67
5.15. Porcentaje de demora excedente sobre demora total en intersecciones semaforizadas	68
5.16. Porcentaje de ahorro por coordinación sobre demora uniforme potencial en intersecciones semaforizadas	68
5.17. Distribución de la demora media en paraderos por período	69
5.18. Factor de corrección para demora uniforme potencial	71

5.19. Datos para validación de procedimiento de corrección	71
5.20. Modelos de ahorro tráfico mixto 2 y 3 pistas	73
5.21. Ahorro estimado para distintos tiempos medios observados	73
5.22. Modelos de ahorro tráfico mixto 2 y 3 pistas, sin corregir variables	74
A.1. Modelo q_{BCS}	83
A.2. Modelos 7 tramos, variables extra FRC	85
A.3. Modelos 7 tramos	88
A.4. Test F para modelos restringidos	89

Capítulo 1

Introducción

El presente estudio consiste en el desarrollo de un modelo que busca determinar los factores de los cuales depende la velocidad comercial de buses, en qué magnitud depende de cada uno de ellos y cómo pueden ser modificados, en beneficio tanto de los operadores como de los usuarios.

La velocidad comercial de un bus se define como la velocidad promedio de éste en cierto tramo, incluyendo todas sus detenciones. Este atributo es esencial dentro de un sistema de transporte público, debido a su directa relación con los costos del sistema (importante para el operador) y la calidad del servicio ofrecido (importante para el usuario).

Una medida que está directamente relacionada con la velocidad comercial es la implementación de distintos tipos de prioridad al transporte público. Actualmente no hay metodología ni criterios generales establecidos para decidir si se construye o no infraestructura de prioridad al transporte público ni tampoco hay evidencia empírica que cuantifique qué tanto mejor (relación costo/mejora) es un tipo de prioridad con respecto a otro, lo que se hace es un análisis de rentabilidad social caso a caso.

En trabajos anteriores se ha abordado el tema de la velocidad comercial desde varios puntos de vista: análisis cuantitativo de variables relevantes sin modelar (Levinson, 1983; Dueker et. al, 2004), modelos exponenciales de velocidad comercial (Gibson et al., 1989), modelos lineales de tiempo de viaje (Abkowitz y Engelstein, 1982 entre otros) y trabajos teóricos como simulación (Valencia y Fernández, 2012) o análisis cualitativo (Fernández, 1999). En esta investigación se sigue la línea de Abkowitz y Engelstein (1982) pues se modela linealmente el tiempo de viaje, que es el recíproco de la velocidad comercial. Además, efectivamente su dependencia es lineal en las variables de las cuales depende, lo que no es directo en el caso de la velocidad. La novedad es que se incluye la variable tipo de prioridad directamente en el modelo, con el objetivo de identificar su influencia directa sobre el tiempo de viaje y facilitar las decisiones de implementación e inversión en infraestructura de prioridad.

El caso particular analizado en esta investigación es el eje de Santa Rosa, Santiago, en el tramo comprendido entre Av. Américo Vespucio y Copiapó, en dirección Sur-Norte. El interés en este tramo radica en que hay un primer segmento de 2,5 km de longitud y dos pistas, en el cual no hay ningún tipo de prioridad para los buses. Luego hay un segmento de 4,6 km en que opera un corredor segregado. El segmento final, de 2,4 km de longitud, está definido como vía exclusiva para los buses entre 7.30 y 10 hrs y entre 17 y 21 hrs. El resto del día no hay prioridad, tal como en el primer segmento, pero dispone de tres pistas de circulación. Es decir, hay distintos esquemas de prioridad y también variación del número de pistas en la condición de tráfico mixto. Identificar los impactos de estas diferencias de

prioridad al transporte público sobre el tiempo de viaje de los buses es el principal propósito de esta tesis.

Por otro lado, para construir un modelo, es necesario contar con la información necesaria y metodología viable para recolectar esa información. Además, si se quieren modelos econométricos confiables, idealmente la información debe ser empírica, de alta calidad y en cantidad suficiente. En muchos de los trabajos realizados anteriormente, la información se obtiene a través de métodos manuales. En general, estos resultan costosos (en términos de dinero y tiempo) en relación a la cantidad de información obtenida. Hoy en día se cuenta con el uso de tecnologías de recolección automática de datos, tales como GPS, contadores automáticos de pasajeros y tarjetas de pago inteligente, entre otros. Con un manejo adecuado de la gran cantidad de datos que estos sistemas proveen, es posible superar las limitaciones antes mencionadas a muy bajo costo. Estas ya están siendo utilizadas para comprender mejor el fenómeno físico del tiempo de viaje de buses.

En esta investigación se trabaja con datos provenientes del Sistema de Transporte Público de Santiago (Transantiago). Transantiago integra la totalidad de buses urbanos de la ciudad y la red de Metro de más de 100 kilómetros, todo con un único medio de pago electrónico. Su estructura, hasta ahora (está cambiando), se basa en recorridos locales y troncales conformados por siete unidades de operación. El objetivo principal de los recorridos locales es servir como alimentadores de los servicios troncales. Los recorridos troncales corresponden a los servicios que realizan largos viajes cruzando diversas zonas de la ciudad. Dentro de los servicios troncales se encuentra el Metro de Santiago y sus cinco líneas operativas en la actualidad. La tarifa tiene una estructura integrada entre buses y Metro, donde se utiliza una tarjeta inteligente de pago conocida como tarjeta Bip!. El sistema cuenta con aproximadamente 6.000 buses y 368 servicios, lo que equivale a más de 700 recorridos considerando ambos sentidos. Además en la gran mayoría de los buses hay instalados equipos GPS que emiten pulsos cada 30 segundos, lo que genera del orden de 80 millones de registros semanales. Los datos provenientes de los equipos GPS son la información base utilizada para esta investigación junto con la metodología propuesta por Cortés et. al. (2011), que permite estimar velocidad comercial o tiempo medio de viaje con gran precisión a partir de los pulsos GPS emitidos desde cada bus, para el servicio, sentido, período y tramo que se desee. Al disponer de información que abarca toda la ciudad y para más de un corte temporal, es posible realizar gran variedad de análisis a bajo costo, lo cual es infactible si la recolección de datos fuera manual. Comparar tiempo de viaje antes/después de un cambio en infraestructura, entre dos rutas distintas, entre dos servicios distintos, entre el período de la mañana y el de la tarde son sólo algunas de las posibilidades que esta base de datos permite. Otra forma utilizada en la literatura para obtener gran cantidad de información a bajo costo es mediante simulaciones; la base de datos input de esta investigación, dispone de los beneficios de una simulación en términos de cantidad de datos pero en este caso los datos obtenidos son empíricos, por lo que realmente reflejan lo que está ocurriendo en la calle.

Por otro lado, a partir del conteo de pasajeros que suben a los buses mediante la tarjeta Bip!, se han desarrollado procedimientos para estimar las bajadas de pasajeros, lo cual a la vez permite inferir las detenciones de los buses (Munizaga y Palma, 2012). De este modo, se cuenta con datos similares (similares porque en este caso las bajadas son estimadas y no medidas como en el caso de recolección manual) a los que típicamente se obtienen con observadores situados en los buses, pero generados automáticamente. Solo se carece de datos sobre detenciones en intersecciones pues la señal de los GPS se registra cada 30 segundos, lapso insuficiente para detectar con precisión tales detenciones.

Es necesario tener en cuenta que la generación de datos sobre transferencia de pasajeros y deten-

ciones en paraderos está sujeta a procedimientos de estimación cuya validez para el efecto de modelar tiempo de viaje no ha sido probada. Además, la información está sujeta a fallas por la existencia de evasión significativa en el pago del pasaje. Luego, primero se prueba que es posible lograr una distribución apropiada del tiempo medio de viaje entre las componentes mencionadas, mediante modelos lineales estimados con estos datos.

Logrado el objetivo de obtener una distribución adecuada del tiempo de viaje a partir de la información disponible (recolectada automáticamente y sujeta a procedimientos de estimación), se aborda con esta metodología la estimación de los impactos de los esquemas de prioridad y el número de pistas sobre el tiempo de viaje de los buses.

Este enfoque tiene gran proyección pues los datos son generados de forma continua y en toda la ciudad. Por lo tanto, puede aplicarse a ejes en que haya otros tipos de prioridad (por ejemplo pistas sólo bus) o métodos de gestión de los paraderos como zonas pagas. Así se puede contar con una base empírica sólida para diseñar y evaluar mejoras al sistema de transporte público de superficie.

Un desafío especial es encarar la ausencia de datos sobre el flujo de automóviles, que influye decisivamente en la demora en intersecciones y el tiempo de cruce de los tramos de tráfico mixto y, si no se respeta, de vía exclusiva. Esto se aborda típicamente distinguiendo períodos pero eso limitaría el alcance de la comparación entre segmentos sujetos a influencia del flujo de autos y los que no lo están, que es muy relevante para esta tesis.

Capítulo 2

Revisión bibliográfica

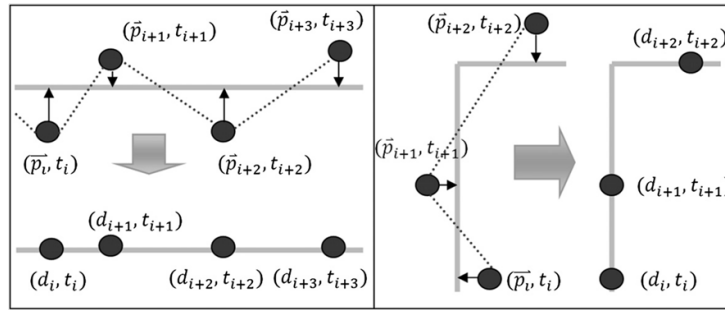
Durante los últimos años se ha estudiado la velocidad comercial, con distintos enfoques, ya que es uno de los atributos más importantes de un sistema de transporte público. En este capítulo se presenta primero una metodología base para estimar velocidad comercial de buses a partir de puntos GPS, luego se describen los distintos enfoques para modelar velocidad comercial o tiempo. Dentro de estos enfoques destacan modelos lineales de tiempo de viaje, distintas formas funcionales para modelos econométricos de velocidad, trabajos cualitativos, simulación y modelos de optimización de oferta.

2.1. Metodología base para cálculo de tiempos medios de viaje

En la ciudad de Santiago hay más de 6000 buses cuyos GPS emiten pulsos cada 30 segundos indicando posición del bus (latitud, longitud) y hora del día a la cual se emitió el pulso. Cortés et al. (2011) proponen utilizar esta información para estimar la velocidad de los buses. Los pulsos GPS son el input principal de la metodología propuesta, pero necesitan de cierto trabajo previo antes de poder ser utilizados para estimar velocidad comercial.

Los pulsos GPS se deben asociar a la ruta que está sirviendo el bus, ya que es la distancia de avance en ruta lo que es relevante para el cálculo de la velocidad comercial. Por lo tanto el primer trabajo que se realiza sobre ellos consiste en llevar estos pulsos a la ruta de cada bus. El procedimiento consiste en cruzar la información de pulsos GPS con la información de ruta de cada servicio, proyectar los pulsos GPS sobre las rutas teóricas y rectificar la ruta de cada bus. La gran ventaja de aplicar este método es que ahora el avance en la ruta se puede mirar en una dimensión. En la figura 2.1 se ilustra el procedimiento:

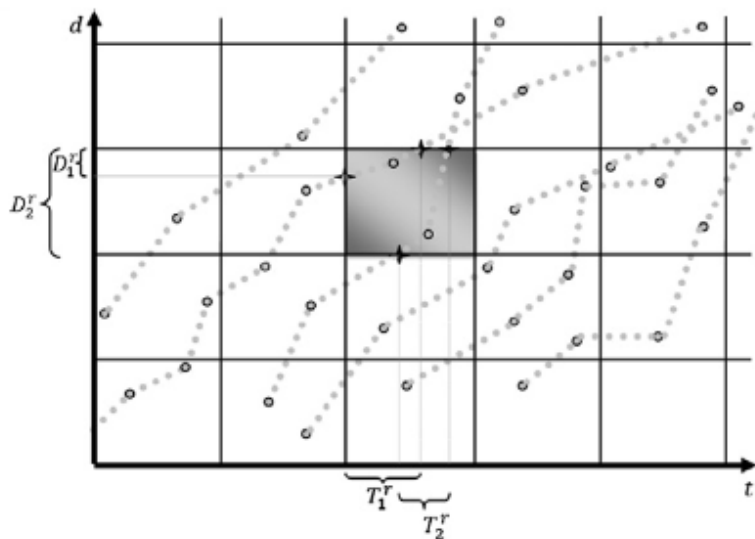
Figura 2.1: Proyección de pulsos GPS sobre rutas



Fuente: Cortés et al. (2011)

Posteriormente, Cortés et al. proponen monitorear el avance de los buses en una grilla espacio-tiempo como la ilustrada en la figura 2.2, donde d es distancia y t es tiempo. La grilla será de ancho (T) y alto (D) a convenir. Las líneas punteadas corresponden a trayectorias de buses. Para todas las trayectorias, se hace una interpolación para identificar el punto de la trayectoria en que el bus entró o salió del período de análisis. Para calcular la velocidad comercial se toma un elemento de la grilla, y se estima la velocidad como la suma de todas las distancias dividido en la suma de todos los tiempos de las trayectorias que caen dentro del elemento particular. Esta representa el promedio de la velocidad de todos los buses que pasaron por ese tramo de ruta en ese período.

Figura 2.2: Proceso de interpolación en base a pulsos GPS



Fuente: Cortés et al. (2011)

Esta metodología se puede utilizar para calcular velocidad de un servicio en su ruta o de varios servicios en un mismo eje o para el nivel de agregación que se necesite. De la misma forma, es posible obtener los tiempos de recorrido para los niveles de agregación anteriores. Tiene la virtud de producir un estimador preciso de la velocidad o tiempo medio empleado por todos los buses en el tramo-período

correspondiente.

Paralelamente se han desarrollado investigaciones que permiten obtener otros resultados también a partir de la información de pulsos GPS y registros automáticos de la tarjeta Bip!. Dentro de estas destacan matrices origen-destino y perfiles de carga.

La metodología para estimar matrices origen-destino a partir de estos datos la presentan Munizaga y Palma (2012). Esta se aplica para una semana de datos, obteniendo información detallada de hora y posición de subida y de bajada para el 80 % de las 36 millones de transacciones de subida. La estimación de bajada se hace bajo el supuesto de que un pasajero se bajó en un lugar cercano donde realiza su próxima transacción, de la cual sí se dispone información. En el caso de que se trate de la última transacción del día, se asume que la bajada ocurrió cerca de la primera subida de la mañana o bien de la primera del día siguiente. Los resultados están disponibles para cualquier nivel de desagregación deseado de espacio-tiempo pues se dispone de información de subida y bajada por servicio-paradero-período. La asignación a paradero de cada transacción se hace cruzando la información de subidas y bajadas con la de GPS de los buses. Con cierto procesamiento e incorporando factores de expansión para contabilizar viajes no observados (debido a que no se les puso estimar bajada) se construyen matrices origen-destino desagregadas a nivel de paradero.

La metodología para construir perfiles de carga la presentan Gschwender et al. (2012). Los perfiles de carga se obtienen a partir de la misma información recolectada automáticamente (Bip! y GPS). Además se exploran distintas opciones de visualización, incluyendo perfiles tradicionales que muestran la demanda agregada de un servicio. Con este desarrollo previo, obtienen el número de pasajeros que sube y baja en cada paradero, multiplicado por los factores de expansión correspondientes. Al sumar en el caso de las subidas y restar en el caso de las bajadas, se obtiene el perfil de carga para un cierto servicio. Además presentan una forma de visualizar la demanda de pasajeros georeferenciada para distintos períodos del día.

2.2. Modelos de Tiempo de Viaje y Velocidad Comercial

2.2.1. Modelos Lineales de Tiempo de Viaje

La forma tradicional de conocer la velocidad comercial es a través de regresiones lineales del tiempo de viaje en bus. Estos tienen la ventaja de que los parámetros asociados a las variables independientes son, en general, de fácil interpretación. También se han calibrado modelos exponenciales que trabajan directamente con la velocidad como variable dependiente, los cuales se presentan en la sección 2.2.2.

Levinson (1983) fue de los primeros en analizar este tema estudiando un conjunto de datos recolectados en terreno para distintas ciudades de Estados Unidos con el fin de caracterizar las diferencias en tiempo de viaje en bus. Los atributos que analizó fueron el número de paradas por milla, si la ruta circula en el centro o en las afueras de la ciudad, tiempos de aceleración y desaceleración y tiempo de servicio en detenciones. Algo similar hacen Dueker et al. (2004) pero en su trabajo la información utilizada proviene de sistemas automáticos de recolección de información: ubicación de buses y conductores de pasajeros.

Al mismo tiempo Abkowitz y Engelstein (1983) detectaron a través de una regresión lineal de tiempo de viaje para buses de Cincinnati, Ohio, que los factores más relevantes en este son el largo

de la ruta, las subidas y bajadas del bus y el número de intersecciones semaforizadas a las que se enfrenta. En menor medida influyen las restricciones de estacionamiento en la ruta, el período del día y el sentido del viaje. Por otro lado, El-Geneidy et al. (2006) modelan tiempo de viaje del transporte público en Portland, Oregon, con el objetivo de detectar cambios en la actividad de pasajeros y el desempeño operativo del sistema luego de la implementación de un proyecto de consolidación de paradas de bus, encontrando que no hay efecto significativo del cambio de paradas sobre la actividad de pasajeros, pero si un aumento en los tiempos de viaje. Strathman et al. (2002) utiliza este tipo de modelos para evaluar la real variación en los tiempos de viaje de un sistema de buses en relación a un servicio programado y además observa la influencia de los distintos operadores sobre el tiempo de viaje. A su vez Têtreault y El-Geneidy (2010) estiman la disminución del tiempo de viaje por implementación de servicios expresos y otros como Strathman et al. (1999), El-Geneidy et al. (2008) los utilizan para examinar las variables que se relacionan con la confianza en el servicio y la adherencia al horario programado. Tirachini (2013) utiliza un modelo de este tipo para estimar los beneficios de cambiar la tecnología de pago en buses de transporte público y compara la medida anterior con la implementación de pistas sólo bus.

Además de los factores clave identificados inicialmente, otras variables que se han detectado como relevantes son el atraso en la partida (Strathman et al., 1999; El-Geneidy et al., 2008; Têtreault y El-Geneidy, 2010), el intervalo programado (Strathman et al., 1999), la experiencia del conductor (El-Geneidy et al., 2008), efectos de los distintos operadores (Strathman et al., 2002), el tipo de ruta (troncal o alimentador, Strathman et al., 2002) y condiciones climáticas (presencia de lluvia o nieve, El-Geneidy, et al., 2006). También se han incluido variables relacionadas con autos como una forma de incorporar la congestión, como el tiempo de viaje en auto (McKnight et al, 2003) y el flujo de autos (Mazloumi et al., 2011). En la Tabla 2.1 se presenta un resumen con las distintas investigaciones, especificando el tipo de información utilizada, variables novedosas y objetivo.

Cada uno de estos trabajos utiliza modelos de tiempo de viaje con distintos objetivos, pero no se trata el tema particular de incluir como variable la prioridad al transporte público. Dueker et al. (2004) concluye que es mejor disminuir paradas y cambiar sistema de pago que darle prioridad al transporte público en base a su estudio, que corresponde a un análisis de información recolectada para ciudades en particular, no a un modelo. Tirachini (2013) estima modelos y concluye que el resultado en cuanto a los beneficios de aplicarla, ya sea pistas solo bus o un sistema más rápido de pago de tarifa, dependen del nivel de la demanda. Para realizar la comparación, estima valores de tiempo de servicio para distintas tecnologías de pago, aproxima valor de tiempo de viaje con pista sólo bus a las condiciones de baja congestión que se dan entre las 4:00 y las 7:00 AM y así compara las alternativas, por lo tanto el efecto de una pista sólo bus se analiza sólo de forma teórica y no proviene de terreno. En ambos casos sólo se da una directriz de la influencia de la prioridad al transporte público y otras variables, como el sistema de pago, sobre la velocidad comercial, pero no hay detalle de qué tipo de prioridad implementar para un caso en particular o una comparación entre ellas.

Tabla 2.1: Resumen modelos lineales de tiempo de viaje

Autor	Tipo de info.	Datos utilizados	Objetivo	Variables novedosas
Abkowitz y Engelstein (1983)	recolectados en terreno con AVM (automated vehicle monitoring equipment)	2 rutas , 10 días laborales, 10 tramos, 4 periodos	identificar factores que influyen sobre el tiempo de viaje	proporción del arco donde estacionar esta permitido
Strathman et al. (1999)	AVL (Automatic Vehice Locator) y APC (Automatic Passenger Counter)	8 rutas, 10 días laborales, 3.152 observaciones	analizar cambios en la confianza de los servicios luego de la implementación de un nuevo sistema de despacho de buses	dummy para observaciones posteriores a la implementación, atraso en la partida, intervalo programado
Strathman et al. (2002)	AVL y APC	15 rutas, días laborales, incluyendo radiales, alimentadores, troncales y expresos, 110.743 observaciones	comparación entre variación de tiempo de viaje y ajuste a horario programado, efecto operador	dummy relacionada al operador, tipo de ruta
El-Geneidy et al. (2006)	AVL y APC	1 ruta, días laborales, 200 observaciones pareadas (pre y post implementación)	cambios en actividad de pasajeros post implementación de consolidación de paradas de bus	mm de lluvia, mm nieve
El-Geneidy et al. (2008)	AVL y APC	1 ruta, días laborales, 150.000 observaciones	analizar desempeño de la ruta en particular	coeficiente de variación de la experiencia del conductor en años, carga de pasajeros, atraso en la partida
Tetrault y El-Geneidy (2010)	AVL y APC	1 ruta, 6620 observaciones	analizar implementación de expresos	mm de lluvia, mm de nieve, atraso en la partida
Tirachini (2013)	encuestas de tiempo de viaje a bordo de los buses	23 rutas, 366 encuestas	estimación de tiempos de viaje y beneficios de cambiar tecnología de pago	tiempo extra de viaje (entre paradas) por minuto de atraso en la partida

2.2.2. Modelos Exponenciales

Otra manera de modelar la velocidad comercial es a través de especificaciones exponenciales. Cohen (1984) y Gibson et al (1989) encontraron una fuerte correlación entre la velocidad y la frecuencia de detenciones en forma de exponencial negativa:

$$V_c = V_0 * e^{-\alpha * f_d} \quad (2.1)$$

donde:

V_C : velocidad comercial promedio (km/h)

f_d : frecuencia de detenciones por cualquier causa (paradas/km)

V_0, α : parametros de calibración

En este modelo V_0 puede interpretarse como la velocidad que alcanza un bus entre paradas y α como el efecto marginal producido por una parada extra.

También se han propuesto relaciones más complejas como las de Valenzuela y Baeza (1991) y Fernández (1996) en que se incorporan, además de la frecuencia de detenciones, el tiempo que dura cada detención. La ecuación 2.2 es un ejemplo de este tipo de especificaciones.

$$V_C = V_0 * e^{-(\alpha * f_d + \beta * t_d)} \quad (2.2)$$

donde:

V_C : velocidad comercial promedio (km/h)

f_d : frecuencia de detenciones por cualquier causa (paradas/km)

t_d : tiempo que dura cada detención (s/det)

V_0, α, β : parametros de calibración

Con este modelo Fernández (1996) hace una evaluación ex-post del corredor segregado de Avenida Grecia.

Fernández y Valenzuela (2003) proponen especificaciones aun más complejas, con el objetivo de recoger otros efectos sobre la velocidad comercial. En este caso los datos utilizados corresponden a una base generada a partir de vehículos instrumentados circulando por algunas rutas de la ciudad de Santiago, donde se encuentra distintos tipos de prioridad al transporte público: tráfico mixto, pistas sólo bus y vías segregadas, pero en su mayoría los datos corresponden a pista sólo bus. Los efectos adicionales incorporados son el efecto del sentido de viaje, efecto de hora punta y distinción para vehículos con caja de cambio automática. La especificación calibrada se presenta en la ecuación 2.3 .

$$V_C = (V_0 + V_0' * \delta_s + V_0'' * \delta_p) * e^{-[(\alpha + \alpha' * \delta_{fd}) * f_d + (\beta + \beta' * \delta_{td}) * t_d]} \quad (2.3)$$

donde:

V_C : velocidad comercial promedio (km/h)

f_d : frecuencia de detenciones por cualquier causa (paradas/km)

t_d : tiempo que dura cada detención (s/det)

δ_s : variable muda activa para sentido oriente-poniente

δ_p : variable muda activa para período punta mañana (7:00 a 9:00)

δ_{fd}, δ_{td} : variables mudas activas para vehículos con caja de cambios automática

V_0, α, β : parametros de calibración

Además se propone una especificación donde se agrega una variable muda para cuando hay pista sólo bus, y se separan los tipos de detenciones en detenciones en paraderos y detenciones en intersecciones, enfatizando la importancia de agregar estas variables. La variable muda para tipo de prioridad

resulta no significativa y la separación de las variables frecuencia y tiempo de detención en paraderos e intersecciones mejora el ajuste del modelo.

En general, las especificaciones exponenciales presentan un buen ajuste del fenómeno que quieren modelar, pero no hay que olvidar el objetivo de calibrar un modelo: conocer el fenómeno, las variables de las cuales depende y posteriormente usarlo ante un escenario futuro. En este sentido es que se hace necesario que las variables incluidas en el modelo sean de fácil interpretación y proyección al futuro. Este no es el caso de la variable frecuencia de detenciones, cuya obtención no es directa. Algo similar ocurre con las variables tiempo de detención, que deben ser, a su vez, modeladas a partir de otras variables o medidas en terreno.

Todos los modelos anteriores fueron calibrados con mediciones realizadas manualmente a través de vehículos instrumentales, en puntos específicos de la ciudad y con recursos limitados. Esto hace que estén restringidos por la cantidad de información utilizada para calibrar, ya que en términos de tiempo y dinero es un método de alto costo. Esto limita también los resultados obtenidos y la confianza de los modelos para ser utilizados en otros casos. Por otro lado, sólo hay una especificación teórica que incluye algún tipo de prioridad al transporte público, lo cual no permite identificar la relevancia de este factor en la velocidad comercial ni tomar decisiones de implementación al respecto.

2.3. Trabajos teóricos

La prioridad al transporte público y la forma de evaluar su implementación también se ha estudiado desde un punto de vista teórico: cualitativamente (Fernández, 1999), con modelos de optimización de oferta (Tirachini y Hensher, 2011 y Basso y Silva, 2014) y con simulación.

Fernández (1999) destaca el hecho de que hay poca claridad sobre qué medidas de prioridad al transporte público aplicar para distintos casos y hace un análisis cualitativo de cada medida desde el punto de vista del tráfico. Discute distintas opciones, selección de medidas, referencias y recomendaciones de la investigación chilena y extranjera, concluyendo que la práctica nacional en este tema debe ser actualizada.

Con respecto a los modelos microeconómicos de optimización de oferta, estos típicamente buscan encontrar valores óptimos de frecuencia de servicio, capacidad de los vehículos, número de líneas y distancia entre paraderos. Tirachini y Hensher (2011) hacen una extensión de los modelos existentes incluyendo otros dos factores relevantes en el proceso de toma de decisiones: elección óptima de sistema de pago e inversión en infraestructura de prioridad para buses. Éste último factor es el relevante para esta investigación. El desarrollo lo realizan en un único corredor de buses, segregado de otros modos de transporte. En estudios anteriores la velocidad de recorrido de buses se considera una variable exógena, dependiente de las condiciones físicas de circulación y los límites de velocidad. Sin embargo, esta puede ser una variable de decisión si se considera que una inversión en infraestructura de prioridad tiene un efecto positivo en la velocidad de recorrido de los buses. Usan una simple relación lineal entre costo de infraestructura por kilómetro y velocidad comercial, definida empíricamente comparando datos de distintos sistemas BRT (Bus Rapid Transit). Finalmente concluyen que para lograr la velocidad comercial deseada es necesario aumentar la inversión en infraestructura, lo que a la vez reduce el tiempo de viaje entre paradas, por lo tanto una velocidad comercial que considere ambos factores resulta la solución óptima. Por otro lado, Basso y Silva (2014) comparan

la eficiencia y sustituibilidad de tres políticas de manejo de congestión: tarificación por congestión, subsidio al transporte público e inversión en pistas sólo bus. El modelo utilizado se caracteriza por la heterogeneidad del usuario, efectos cruzados de congestión entre el transporte privado y el público, elasticidad de la demanda total e inter-temporal y se simula con datos para Londres, Reino Unido y Santiago, Chile. Encuentran que hay una gran sustituibilidad entre las distintas políticas, en particular, la contribución marginal de aumentar el subsidio al transporte público, si las otras políticas se implementan primero, disminuye rápidamente. Además, la inversión en pistas sólo bus sería una forma atractiva de incrementar la frecuencia y disminuir la tarifa sin tener que inyectar fondos públicos.

También en la misma línea se ha intentado incluir modelación más detallada de transporte público en modelos de microsimulación de tráfico clásicos (Aimsum, Vissim, Paramics) ya que, normalmente, estos lo consideran como un vehículo privado más grande, que se detiene por un tiempo fijo en paraderos. La base para estas mejoras las plantea Silva (2000) a nivel conceptual, donde identifica que debe mejorarse el comportamiento del bus detenido, el bus anterior debe tener capacidad de adelantar y que el comportamiento de los autos adyacentes está influido por el comportamiento de los buses o autos con capacidad de adelantar. En base a lo anterior es que Fernández et al. (2010) y Cortés et al. (2010) observan la importancia de considerar el transporte público en los microsimuladores y dan recomendaciones de cómo hacerlo. Desarrollan una herramienta denominada MisTransit que permite que los vehículos tengan características propias (capacidad, número de puertas), se considera a los pasajeros como objetos y que se integren modelos explícitos de transferencia de pasajeros que interactúan con otros vehículos y la infraestructura existente. Además, los pasajeros tienen origen y destino, hora de llegada al sistema y tiempo de subida y bajada. Por último se incluye un modelo de tiempo de detención para los buses que considera el tiempo de subida de los usuarios y el número de puertas que tiene el bus. MisTransit funciona en forma simultánea con una simulación de Paramics, donde ambas se retroalimentan. Paramics controla el movimiento del bus sobre la red mientras que MisTransit recibe y provee información del comportamiento de buses en paraderos.

Por otro lado, Valencia y Fernández (2012) indican que es necesario delinear un enfoque alternativo para modelar el transporte público de superficie a nivel de corredor, distinto a los estudios microeconómicos y matemáticos, que no toman en cuenta las interacciones entre las distintas variables al diseñar. En esa línea desarrolló un modelo que procesa la circulación de los vehículos de transporte público en su paso consecutivo por tramos de vía, paraderos e intersecciones de un corredor. Este entrega índices de rendimiento que permiten evaluar estrategias de operación y diseño físico de corredores de transporte público, a través de variables como la velocidad comercial, demoras y colas. Para lograr este análisis el modelo requiere de mucha información de entrada, como son la velocidad comercial del transporte público, tasas de aceleración y desaceleración, frecuencia, carga de buses, demanda de pasajeros, entre otros. Todos estos datos se obtienen teóricamente (con otros modelos) o en base a supuestos, lo que posiblemente aleja el análisis de lo que ocurre empíricamente.

Los trabajos presentados en los párrafos anteriores apuntan en la misma dirección, es decir, insisten en que es necesario hacer mejoras al sistema de transporte público y encontrar metodologías que se adapten a tomar mejores decisiones de implementación de prioridad al transporte público. Fernández (1999) sólo da recomendaciones cualitativas, lo que no es suficiente a la hora de tomar una decisión de implementación. Por otro lado, Valencia y Fernández (2012) realizan un modelo bastante más detallado, al igual que Fernández et al. (2010) y Cortés et al. (2010), avanzando bastante hacia la dirección de tomar la decisión óptima de implementación, pero aun así sigue siendo un trabajo de origen teórico, calibrado con información medida en terreno y por lo tanto limitada. Tirachini y

Hensher (2011) hacen un gran aporte en el sentido de incluir variables como el sistema de pago o la inversión en infraestructura en el proceso de toma de decisiones para implementación de un sistema de transporte público y Basso y Silva (2014) realizan comparación entre distintas formas de manejar congestión, dentro de las cuales destaca la implementación de pistas sólo bus.

Capítulo 3

Generación y análisis de datos

En este capítulo se presentan los datos utilizados para modelar y la metodología para obtenerlos, tanto de la variable dependiente (tiempo medio de viaje) como de las variables independientes (flujo de buses, subidas, bajadas, detenciones, demoras en paraderos e intersecciones semaforizadas), que fueron identificadas en la literatura como variables relevantes. El enfoque de modelación consiste en construir un modelo lineal clásico del tiempo medio de viaje en segundos por kilómetro (s/km), obteniendo los tiempos de viaje con la metodología explicada en la sección 2.1. Como se muestra en la misma sección, cada observación de tiempo corresponde a la media del tiempo de viaje a nivel de corredor para un tramo-período, es decir, de todos los buses que pasaron por el tramo durante el período. Esto implica que las variables independientes también se trabajan al mismo nivel de agregación: valores medios para todos los buses del tramo-período.

En la primera sección se describe el caso particular de esta investigación que corresponde a un segmento del eje de Av. Santa Rosa, Santiago. Posteriormente, realizadas las definiciones necesarias para el eje, se presenta una metodología particular para el caso, que permite la obtención de los tiempos a modelar y de las variables independientes ya mencionadas. Los datos corresponden a los 5 días laborales de la semana del 11 al 15 de Abril de 2011. Estos días se consideran de comportamiento normal, ya que no se registran singularidades como marchas o desvíos programados en las calles ni ningún otro fenómeno que pudiera alterar el comportamiento de buses.

3.1. Descripción y definiciones del caso particular: eje Santa Rosa

Como ya se adelantó, en esta investigación se trabajará con el eje Av. Santa Rosa ubicado en la comuna de Santiago. En esta sección se describe el eje y se definen los tramos y períodos para los cuales se quiere modelar el tiempo medio de viaje, requisito para aplicar la metodología.

El eje se considera entre Av. Américo Vespucio y Copiapó, lo que corresponde a 9,53 km de largo, en sentido Sur-Norte, es decir, hacia el centro de la ciudad por lo cual el flujo es más alto en la punta de la mañana.

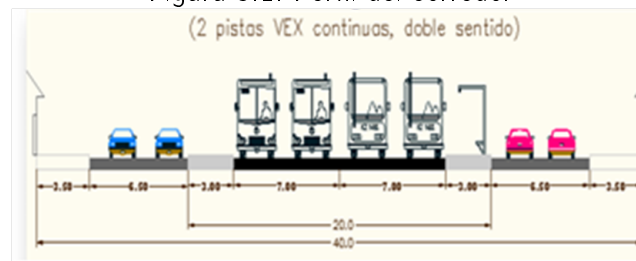
A lo largo del eje se encuentran 3 tipos distintos de tratamiento al transporte público y un cambio de perfil transversal en tráfico mixto (2 y 3 pistas), vía exclusiva y corredor segregado. El funcionamiento de cada tipo de prioridad es el siguiente:

Tráfico Mixto: este régimen corresponde a segregación cero, es decir, no hay prioridad al transporte público y este comparte toda la infraestructura con el transporte privado. En el caso de Santa Rosa, este tipo de prioridad se encuentra entre Av. Américo Vespucio y Lo Ovalle, sector con 2 pistas, y entre Carlos Silva Vildósola y Copiapó, sector con 3 pistas, en horario donde no funciona como vía exclusiva (de 10.00 a 17.00 hrs).

Vía Exclusiva: corresponde a un sector particular que en ciertos períodos, por ley, sólo puede ser utilizada por el transporte público. El tramo que funciona como vía exclusiva es el mismo que funciona como tráfico mixto de tres pistas, sólo que en horario punta, es decir, entre las 07:30 y las 10:00 horas y entre las 17:00 y las 21:00 horas. Cabe destacar que según lo observado en terreno hay escasa o nula fiscalización de la vía exclusiva.

Corredor Segregado: este caso corresponde a segregación longitudinal casi completa del transporte público, habiendo interacción con automóviles sólo en las intersecciones. La segregación es física, mediante tachones, medianas o algún otro elemento que cumpla el objetivo. En Santa Rosa el corredor segregado corresponde a un perfil tipo 1, es decir, dos pistas continuas en doble sentido, el cual se presenta en la Figura 3.1. Se ubica entre Lo Ovalle y Carlos Silva Vildósola.

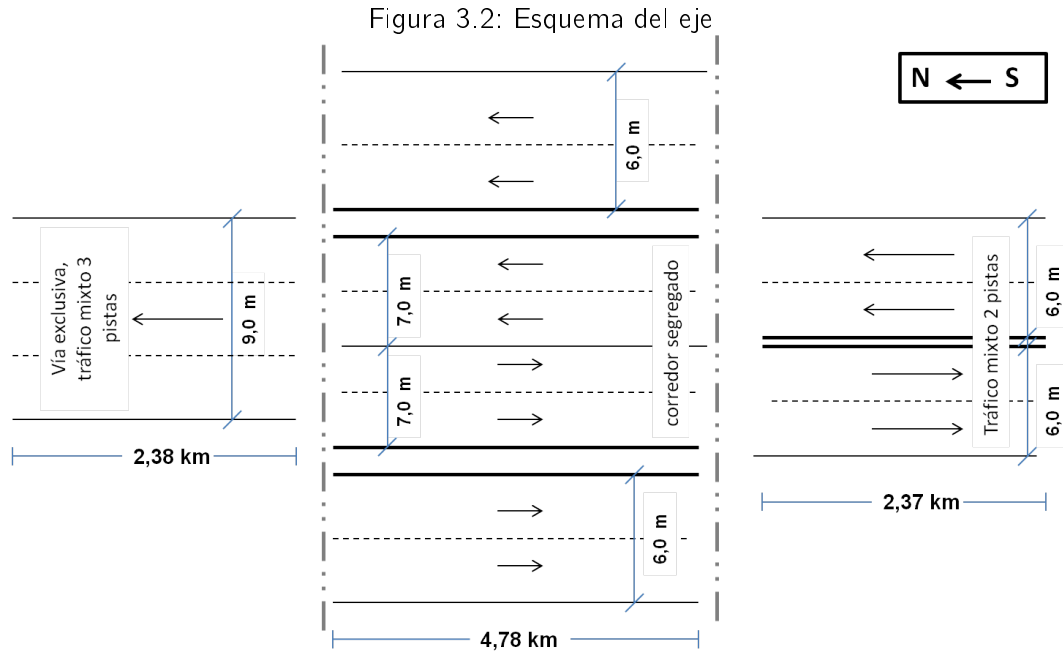
Figura 3.1: Perfil del corredor



Fuente: Transantiago

En la Figura 3.2 se presenta un esquema del eje, con el perfil para los distintos tipos de prioridad y ancho de vía.

Los servicios que se consideran son los servicios troncales 203R, 205R, 206R, 207R, 209R, 212R y 227R. Todos los servicios considerados recorren todo el eje, con excepción del 212R, que recorre desde Av. Américo Vespucio hasta Salesianos, y el 227R, que esta presente desde lo Ovalle hasta Victoria. Estos corresponden a todos los troncales que circulan por el eje. Los servicios locales (D07R, H01R, E04I, E02R, E01R) no se consideran para calcular el tiempo de viaje debido a que estos circulan por pequeños tramos del eje, comparten paraderos con el resto de los troncales y su flujo es pequeño con respecto al resto de los servicios. Por lo anterior, su efecto sobre el tiempo medio de viaje se considera irrelevante con respecto al de los troncales y se omite su existencia para los fines de esta investigación.



Con respecto a los paraderos, dentro del tramo considerado se encuentran 23 de ellos. El eje funciona con un sistema de paradas divididas, donde un grupo (203R, 206R, 212R) se detiene en un paradero y otro grupo (205R, 207R, 209R, 227R) en el siguiente. No hay funcionamiento de zonas pagas en el sector considerado.

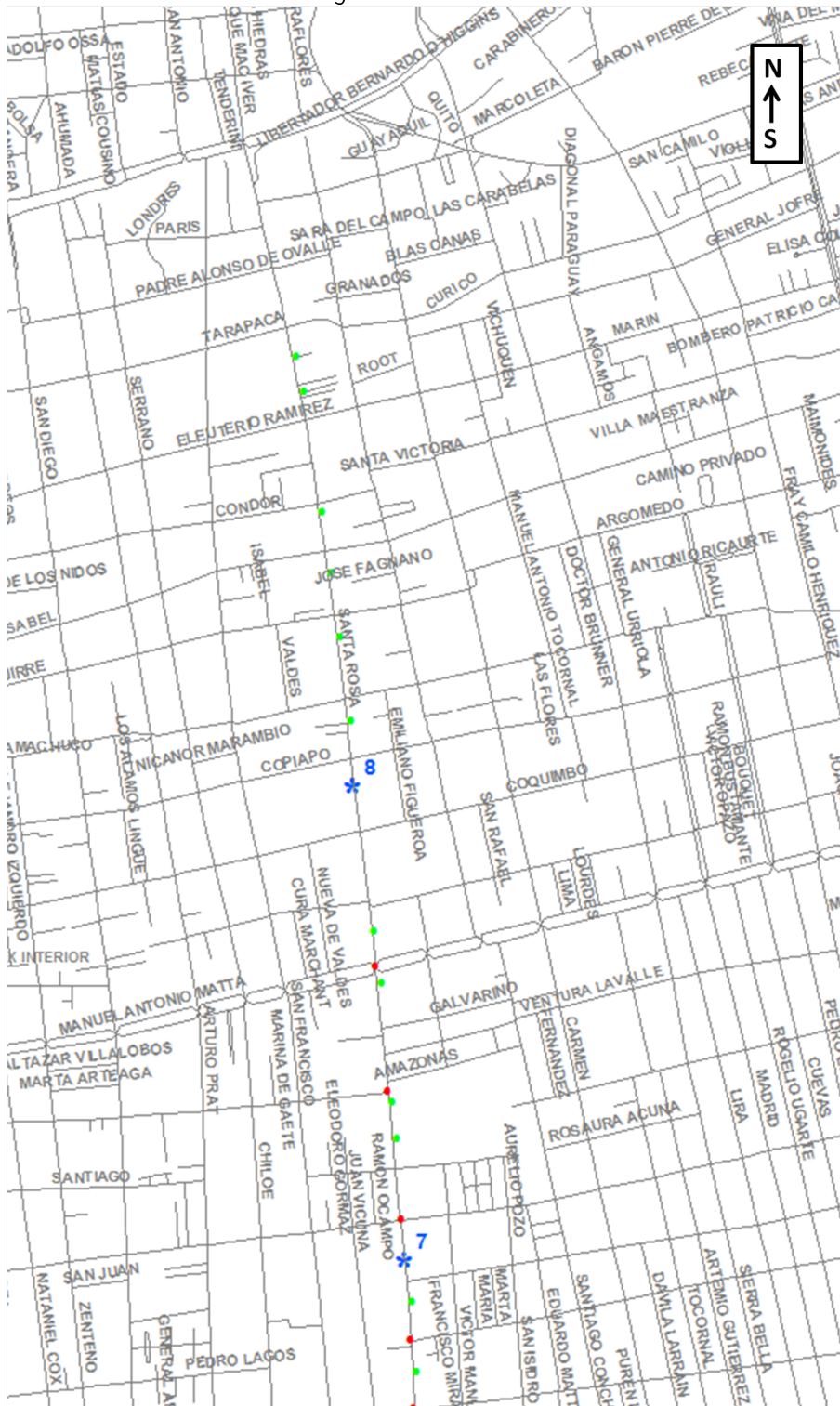
En cuanto a las intersecciones, dentro del eje considerado, Santa Rosa tiene prioridad en todas las intersecciones que no son semaforizadas. O sea, sólo puede haber demora para los buses en estas últimas, de las cuales hay un total de 33. Casi todas ellas forman parte de redes con coordinación. Una de las redes va desde Av. Américo Vespucio hasta Mayo (última del sector de tráfico mixto con dos pistas), otra comprende todo el corredor segregado, desde Lo Ovalle hasta Carlos Silva Vildósola y una tercera cubre desde Placer hasta el Hospital Paula Jaraquemada.

Atendiendo a sus características diferenciadas, el eje se divide en tramos según los siguientes criterios de distinción:

- tipo de prioridad: los tramos terminan pasada la última intersección semaforizada de cada tipo.
- homogeneidad de servicios troncales: tramo termina cuando algún servicio deja el eje o comienza cuando algún servicio entra al eje.
- longitud entre 1 y 2 km.

Así resultan 7 tramos que se muestran en las siguientes Figuras (3.3, 3.4, 3.5, 3.6), junto con los paraderos y las intersecciones semaforizadas.

Figura 3.6: Tramo 7



Los dos primeros tramos corresponden a tráfico mixto con dos pistas, los tres siguientes al corredor segregado y los dos últimos a la combinación vía exclusiva - tráfico mixto con tres pistas. Las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3 sintetizan las características de cada tramo. El número de paraderos asignados es el mismo para todos los servicios dado que todo tramo tiene número par de paraderos y cada servicio se detiene en la mitad por el sistema de paradas divididas, excepto en el tramo 3 donde el servicio 212R tiene sólo dos paraderos asignados. Hay que añadir que en los tramos 1 y 7 existen intersecciones congestionadas en varios períodos del día, no así en los tramos 2 y 6, en que sólo hay alguna congestión durante un breve período de la punta mañana.

Tabla 3.1: Definición de tramos Santa Rosa

Tramo	Desde	Hasta	Longitud (km)
1	Américo Vespucio	El Parrón	0,97
2	El Parrón	Lo Ovalle	1,41
3	Lo Ovalle	Departamental	1,18
4	Departamental	Salesianos	1,63
5	Salesianos	Carlos Silva Vildósola	1,97
6	Carlos Silva Vildósola	Victoria	1,39
7	Victoria	Copiapó	0,99

Tabla 3.2: Prioridad por tramo

Tramo	Prioridad	Pistas	Horario
1	Tráfico mixto	2 pistas	todo el día
2	Tráfico mixto	2 pistas	todo el día
3	Corredor Segregado	2 pistas continuas	todo el día
4	Corredor Segregado	2 pistas continuas	todo el día
5	Corredor Segregado	2 pistas continuas	todo el día
6	Vía exclusiva	3 pistas	7.30-10.00 y 17.00-21.00
	Tráfico Mixto	3 pistas	10.00-17.00
7	Vía exclusiva	3 pistas	7.30-10.00 y 17.00-21.00
	Tráfico Mixto	3 pistas	10.00-17.00

Tabla 3.3: Paraderos asignados e intersecciones semaforizadas por tramo

Tramo	Paraderos asignados	Par. asignados/km	Int. Sem.	Int. Sem./km
1	2	2,06	3	3,1
2	3	2,13	5	3,6
3	3	2,54	3	2,5
4	4	2,45	6	3,7
5	5	2,54	7	3,6
6	4	2,88	6	4,3
7	2	2,02	3	3,0

El rango de tiempo que se considera para el análisis es entre las 07.30 y las 21.00 hrs., dividido en períodos de media hora, lo que da un total de 27 períodos a analizar. Esta periodización se hace con el fin de recoger la variabilidad entre períodos y además es tal que permite el análisis de los períodos relevantes para los distintos tipos de prioridad, en particular, de la vía exclusiva que funciona dentro de ese rango.

Como información adicional que podría ayudar a explicar los tiempos de viaje, se hizo una visita a terreno para observar el funcionamiento de las intersecciones semaforizadas y además se solicitó a la UOCT (Unidad Operativa de Control de Tránsito) información sobre la programación de los semáforos en el eje de estudio (tiempos de ciclo y verde para los distintos períodos del día y coordinación de los semáforos).

Con respecto a la programación de semáforos, estos funcionan con un sistema de planes horarios, donde el tiempo de verde y ciclo se calculan en función de los factores de carga de cada intersección. Además, la coordinación se realiza a través de un sistema de redes, donde los semáforos pertenecientes a una misma red tendrán coordinación entre ellos. Cada red está sujeta a distinto número de planes de distinta duración y hora de inicio. En la Tabla 3.4 se presenta el detalle del número de semáforos coordinados por tramo.

Tabla 3.4: Intersecciones semaforizadas en red

Tramo	Int. semaforizadas	Int. semaforizadas en red
1	3	3
2	5	5 ¹
3	3	2
4	6	6
5	7	7
6	6	5
7	3	2

¹: son 4 entre 7.30 y 10.00 hrs

Para calcular los valores de tiempo de verde y ciclo representativos de los tramo-período que se utilizan para la investigación, se promedian los valores de todas las intersecciones semaforizadas del tramo para el plan correspondiente al período, con el fin de obtener un valor representativo del tramo para cada caso. En el caso en que dentro de un período haya más de un plan (hay planes que comienzan en la mitad de un período) se hace un promedio ponderado de los valores de los dos planes que actúan dentro del mismo período.

Hay algunas situaciones especiales a tener en cuenta. En el tramo 2, hay una intersección que se saca de la red durante la punta de la mañana pues se le asigna un tiempo de ciclo mayor debido a sus requerimientos. Además, hay tres intersecciones muy cercanas entre sí que, existiendo coordinación entre ellas, deben implicar demoras muy inferiores a las que se producirían si existieran a distancias similares a las del resto del eje.

Por otra parte, de las 6 intersecciones que hay en el tramo 6, dos corresponden a semáforos semi-actuados y uno de ellos es, además, peatonal, lo que también podría implicar demoras menores o casi

inexistentes para los buses.

Además, en el tramo 7 si bien las dos primeras intersecciones están coordinadas, una de ellas opera en doble ciclo en algunos períodos. Por otro lado, la no coordinada (Av. Matta) es justamente la más restrictiva y en que hay congestión con frecuencia. En este caso, se producen demoras mayores que en el resto del eje.

En la Tabla 3.5 se presentan algunos valores para períodos agregados de tiempo.

Tabla 3.5: Tiempos de ciclo y verde (s)

período	07.30-10.00		10.00-14.00		14.00-17.00		17.00-19.00		19.00-21.00	
tramo	V	C	V	C	V	C	V	C	V	C
1	49,8	83,8	45,8	77,5	46,0	78,3	53,5	87,5	60,7	95,0
2	46,3	88,4	38,5	78,4	38,4	78,3	45,7	87,5	52,2	95,0
3	61,7	110,0	55,3	100,0	39,2	80,0	61,0	110,0	61,0	110,0
4	65,3	110,0	59,0	100,0	43,4	80,0	69,3	110,0	69,3	110,0
5	64,5	110,0	57,8	100,0	43,1	80,0	55,7	110,0	55,7	110,0
6	57,3	100,0	31,0	52,9	37,3	58,8	26,5	49,0	26,5	49,0
7	47,7	106,7	40,8	77,5	41,7	75,3	44,0	89,0	43,3	86,1

3.2. Generación de datos para los buses

Una vez presentada la metodología de tiempos medios de viaje en forma general (sección 2.1), y hechas las definiciones de tramo y período para el caso de Santa Rosa (sección 3.1), se procede a explicar el programa desarrollado para esta investigación, que es un caso particular de la metodología base, enfocado al modelo que se quiere construir.

El programa desarrollado en este trabajo entrega tiempo de viaje en bus utilizando como entrada la misma información que la metodología general de Cortés et al. (2011) (pulsos GPS). Además usa la base de datos de transacciones, que corresponde a los registros Bip! de subidas en cada bus y la base de datos de bajadas, que corresponde a una estimación en base a Munizaga y Palma (2012). El detalle del tratamiento de subidas y bajadas se explica en la sección 3.2.2. El programa además recibe un archivo de parámetros donde se detallan los períodos y tramos (T, D) en los cuales se va a calcular el tiempo medio de viaje y los servicios que se van a considerar para calcular, establecidos en la sección anterior. En el mismo archivo se especifica una ruta base, de algún servicio que recorra todo el eje, y sobre ésta se proyectan los pulsos GPS de todos los servicios considerados. Si la distancia de la proyección del punto GPS a la ruta base es mayor a 100 metros, ese pulso GPS se elimina de las observaciones. Esto se hace con el fin de descartar pulsos erróneos y dejar fuera distancias recorridas que se alejan de la ruta base. Para esta agregación de tramo-período, el programa entrega distancia y tiempo a nivel de bus, y subidas y bajadas, a nivel de paradero-bus. Esta información, con cierto procesamiento, permite obtener además el número de detenciones y el flujo de buses para cada tramo-período.

Los pulsos GPS y transacciones Bip! que se utilizan corresponden a los días laborales de la segunda semana de Abril 2011 (5 días). Esto implica alrededor de un millón de pulsos de los distintos servicios

que circulan por el lugar.

Con las definiciones anteriores se corre el programa desarrollado y éste entrega los resultados ya mencionados: tiempo empleado y distancia recorrida para cada bus considerado, subidas y bajadas para cada bus por paradero, para cada uno de los cinco días. Esto permite posteriormente agrupar por servicio, a nivel de corredor o simplemente analizar valores de tiempo, subidas y bajadas a nivel de bus. Recordar que, para el caso de esta investigación, se modelará el tiempo medio de viaje en s/km, que corresponde a un tiempo representativo de todos los servicios que circulan por el tramo. En las siguientes secciones se explica en detalle cada variable.

3.2.1. Flujo de buses

El flujo de buses de un tramo-período, en general, corresponde al número de buses presentes en ese tramo-período en particular, es decir, los buses que por ahí pasaron, multiplicado por 2, ya que estamos tratando con períodos de media hora. Para el caso de esta investigación, el número de buses se utiliza para dividir las variables de pasajeros que suben y bajan y las detenciones para obtenerlas a nivel de bus, por lo que no es directo utilizar este número como tal para ese objetivo, pues algunos buses recorren solo parte del tramo en los períodos asignados. Esto implica que puede que no pasen por todos los paraderos, que es donde efectivamente ocurre el movimiento de pasajeros y las detenciones. Es por esto que el número de buses se calcula como sigue: se dispone de la información de todos los buses que pasaron por los paraderos para cada período, agrupados por servicio. Estos se promedian por paradero, para obtener un valor representativo del número de buses por servicio que pasó por el tramo período. Finalmente se suman estos valores y se obtiene el número de buses representativo del tramo-período. Esto permite incorporar además cierta ponderación por distancia recorrida, ya que si un bus aparece en menos del total de paraderos del tramo, su ponderación será menor. También es posible obtener el porcentaje de buses articulados y rígidos en el flujo para cada tramo-período ya que esta información está asociada a la patente de cada vehículo, que a su vez se vincula con los pulsos GPS.

En la Tabla 3.6 se presenta un resumen con los valores de flujo por tramo-período donde se puede apreciar que no hay un sesgo particular para un cierto día. En la Tabla 3.7 se presenta un resumen de porcentajes de buses articulados por tramo y períodos agrupados de tiempo. En la Figura 3.7 se aprecia la distribución del flujo durante el día para los 5 días promediados, habiendo comprobado la estabilidad entre ellos. Es posible notar las inyecciones de buses que se producen en horas más cargadas, teniendo un claro máximo en flujo alrededor de las 8.00 hrs.

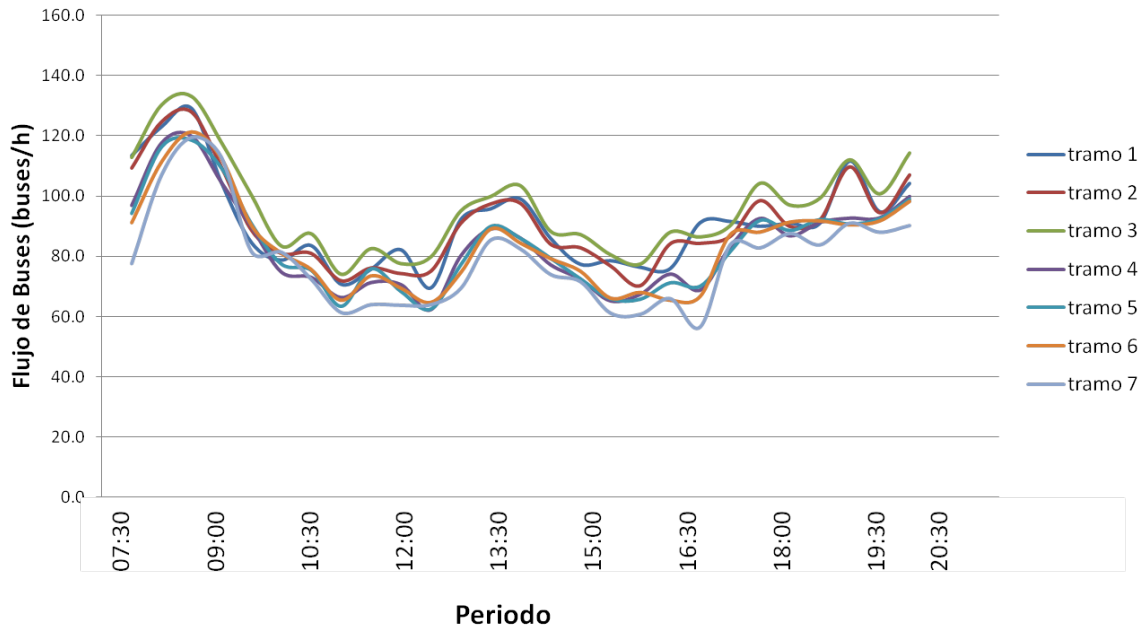
Tabla 3.6: Flujo (bus/h) por tramo-período-día

período	07.30-10.00					10.00-18.00					18.00-21.00				
tramo	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V
1	119	116	116	117	120	85	77	81	86	85	95	99	100	98	95
2	120	117	119	115	119	84	76	80	86	85	97	102	101	98	96
3	124	122	125	122	125	89	80	84	90	89	103	108	107	104	102
4	111	108	110	111	108	76	69	71	77	77	91	94	95	92	90
5	112	109	110	111	107	76	69	71	77	76	91	92	96	94	90
6	109	111	106	111	109	76	69	72	77	76	90	92	94	93	91
7	103	107	101	107	104	73	64	68	73	72	83	90	89	89	86

Tabla 3.7: Proporción de buses articulados

tramo	07.30-10.00	10.00-18.00	18.00-21.00
1	0,55	0,58	0,53
2	0,54	0,58	0,53
3	0,53	0,56	0,50
4	0,54	0,56	0,50
5	0,53	0,56	0,50
6	0,56	0,59	0,53
7	0,56	0,60	0,52

Figura 3.7: Flujo de buses por tramo-período



3.2.2. Subidas y bajadas

Las subidas se obtienen de la base de datos de transacciones Bip!, que son recolectadas automáticamente por el sistema de pago con tarjeta inteligente de Transantiago. Para lograr la asignación de subidas a paraderos, la base de datos de subida se cruza con la información de posicionamiento de buses y la secuencia de paraderos.

Las bajadas utilizadas corresponden a una estimación que presentan Munizaga y Palma (2012). La estimación de bajada o destino se hace bajo el supuesto de que un pasajero se bajó en un lugar cercano a donde realiza su próxima transacción, de la cual sí se dispone de información. En el caso de que se trate de la última transacción del día, se asume que la bajada ocurrió cerca de la primera subida de la mañana o bien de la primera del día siguiente. Con esta metodología se logra estimar bajada a aproximadamente 80 % de las transacciones. Pero, como con este procedimiento no es posible identificar todos los viajes, es necesario construir factores de expansión para contabilizar las bajadas no observadas. Hay tres de estos casos que requieren distinto tratamiento: (i) viajes asociados con una transacción bip! donde se conoce el origen pero el destino no pudo ser estimado, (ii) viajes detectados a través de una transacción bip! para la cual no se puede estimar ni origen ni destino y (iii) viajes no detectados a través de transacciones bip! (evasión). Para el primer caso se asume que la distribución de viajes con destino no conocido es la misma que la de los viajes de los cuales sí se conoce su destino y tienen el mismo origen. Luego, se construyen factores de expansión asociados a los viajes para un origen o período de tiempo en particular que dan cuenta de todos los viajes con bajada desconocida. La formulación se presenta en la ecuación 3.1. Para el segundo caso, se construye un factor de expansión general, similar al anterior, pero incluyendo solo la desagregación de tiempo, como se muestra en la ecuación 3.2.

$$f_{it} = \frac{\sum_j viajes_{ijt}}{\sum_{j \neq null} viajes_{ijt}} \quad (3.1)$$

$$f_{it} = \frac{\sum_{ij} viajes_{ijt}}{\sum_{i,j \neq null} viajes_{ijt} * f_{ijt}} \quad (3.2)$$

Donde i es el origen del viaje, j es el destino de acuerdo a la zonificación de la zona estudiada (en este casos 800 zonas ESTRAUS) y t es el período de tiempo.

Podría aplicarse un tratamiento similar al tercer caso (evasión, un 27 % promedio de acuerdo a Transantiago para los paraderos seleccionados en los períodos de estudio), pero no se dispone de información adicional de calidad suficiente para hacerlo pues la evasión no es homogénea. En consecuencia, se tienen subidas y bajadas estimadas para el total de pasajeros que no evade el pago de la tarifa.

Para fines de la modelación interesa el número medio de subidas y bajadas por bus, ya que se relaciona con el tiempo medio de viaje de un bus en s/km. Éste número se obtiene dividiendo el total generado por el programa para cada tramo-período por la cantidad de buses correspondiente, calculado en la sección 3.2.1. Para hacer consistente la demanda de pasajeros entre los distintos tramos, se normaliza dividiendo por la longitud de estos. Así, la demanda queda expresada en pax/bus-km.

En las Tablas 3.8 y 3.9 se presentan valores resumen de las variables por períodos agregados, para los cinco días de la semana, permitiendo apreciar que no hay sesgo en días determinados. En las Figuras 3.8 y 3.9 se muestran valores promedio del movimiento de pasajeros de todos los días para el nivel de agregación definido. Nótese que la demanda de pasajeros es relativamente baja, excepto en el tramo 7, y que el máximo se da en la punta mañana debido a que el sentido considerado es hacia el centro de la ciudad.

Tabla 3.8: Subidas (pax/bus-km) por tramo-período-día

período	07.30-09.00					17.30-19.00					09.00-17.30 y 19.00-21.00				
tramo	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V
1	2,9	2,8	3,1	3,0	3,1	1,3	1,2	1,2	1,2	1,6	1,5	1,6	1,4	1,4	1,5
2	2,4	2,6	2,9	2,6	2,3	1,2	1,3	1,4	1,4	1,4	1,1	1,1	1,0	1,1	1,2
3	1,7	1,7	2,0	1,8	1,6	0,7	0,9	0,8	0,6	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7	0,8
4	3,0	3,3	3,3	3,1	3,0	1,8	1,4	1,6	1,7	1,9	1,3	1,3	1,2	1,4	1,5
5	1,2	1,4	1,4	1,3	1,4	1,4	1,1	1,2	1,2	1,2	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8
6	3,1	3,2	3,4	3,0	3,3	3,5	3,0	3,4	3,4	3,1	1,9	1,9	1,9	1,9	2,2
7	5,3	6,3	6,6	6,1	4,9	4,8	4,9	4,7	5,1	4,8	4,4	4,1	3,9	4,1	4,0

Figura 3.8: Subidas por tramo-período (pax/bus-km)

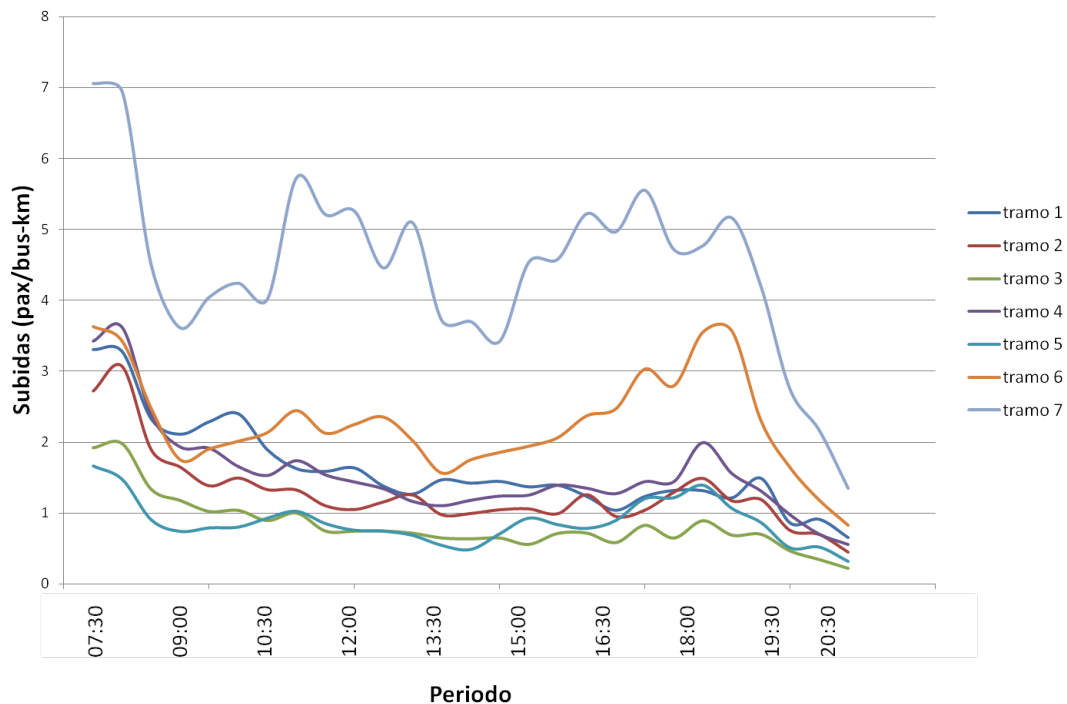
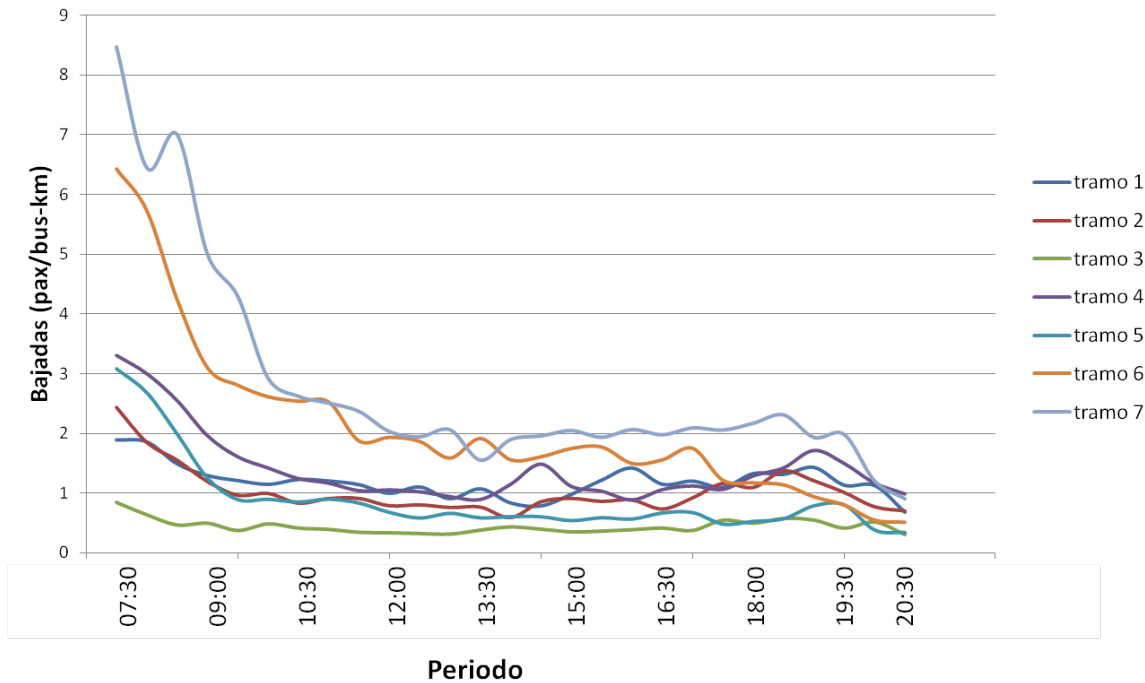


Tabla 3.9: Bajadas (pax/bus-km) por tramo-período-día

período	07.30-09.00					09.00-12.00					12.00-21.00				
tramo	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V
1	1,7	1,7	1,9	1,8	1,7	1,2	1,2	1,1	1,2	1,3	1,1	1,0	1,2	1,1	1,2
2	1,7	2,1	2,0	2,0	1,9	1,0	1,0	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
3	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
4	2,8	2,8	3,0	3,1	3,1	1,4	1,4	1,4	1,5	1,4	1,1	1,1	1,1	1,2	1,3
5	2,4	2,6	2,7	2,7	2,5	0,9	1,0	0,9	0,8	1,0	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7
6	5,1	5,7	5,7	5,4	5,5	2,3	2,7	2,5	2,4	2,9	1,4	1,3	1,2	1,4	1,7
7	7,1	7,5	7,5	7,0	7,3	3,2	3,3	3,2	3,4	3,3	1,9	1,8	1,8	1,9	2,0

Figura 3.9: Bajadas por tramo-período [pax/(bus-km)]



3.2.3. Detenciones en paraderos

Para el número de detenciones por bus se asume que el bus se detiene si hay subidas y/o bajadas asignadas a él por el programa para un cierto paradero-tramo-período. A estos datos se les aplica una corrección si hay subidas y/o bajadas en el mismo paradero para dos períodos consecutivos, asignándolas al período más cargado con el fin de no sobreestimar las detenciones. Luego, se suman estas detenciones por tramo-período y se obtiene el total de detenciones para cada tramo-período.

Al igual que para las subidas y bajadas interesan las detenciones por bus. Se obtiene dividiendo el total por tramo-período mencionado en el párrafo anterior, por la cantidad de buses correspondiente, que es la mitad del flujo calculado en la sección 3.2.1. Para hacer consistentes las detenciones entre

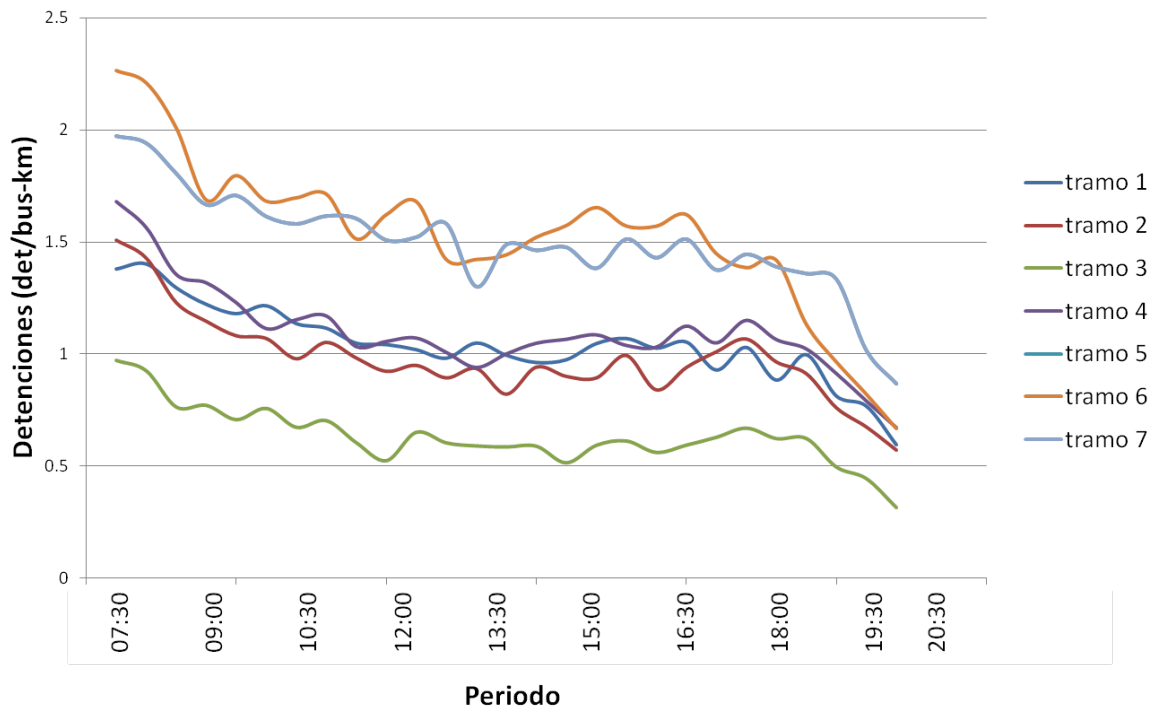
los distintos tramos, se normaliza dividiendo por la longitud de éstos. Así, las detenciones quedan expresadas en det/bus-km.

En la Tabla 3.10 se presenta el número medio de detenciones por tramo y sus máximos y mínimos. En la Figura 3.10 su representación por tramo-período. Al mirar estos valores con respecto al número medio de paraderos asignados por tramo (Tabla 3.3) es posible notar que hay un alto número de buses que no se detiene en estos paraderos. De hecho, salvo en el tramo 7, en promedio la probabilidad de detenerse en un paradero asignado es inferior al 50% y más baja que eso en el corredor segregado. Por otro lado, el número medio de detenciones varía menos que los pasajeros transferidos, es decir, hay distintas tasas de transferencia, especialmente en el tramo 7.

Tabla 3.10: Detenciones por tramo (det/bus-km)

Tramo	Promedio	Máximo	Mínimo
1	1,0	1,5	0,5
2	1,0	1,6	0,5
3	0,6	1,1	0,2
4	1,1	1,8	0,6
5	0,9	1,7	0,4
6	1,5	2,3	0,5
7	1,5	2,0	0,8

Figura 3.10: Número medio de detenciones por tramo-período (det/bus-km)



3.2.4. Tiempo medio de viaje

El programa descrito entrega 44.595 observaciones de tiempo y distancia (cada una corresponde a un bus) para los 7 tramos, 27 períodos y cinco días de la semana considerados en este estudio. Esto es, un promedio de 47 observaciones para cada día-tramo-período. Una parte de estas observaciones corresponde a buses que recorren sólo una pequeña fracción del tramo en ese período y otros que presentan distancia recorrida claramente superior al largo del tramo, por lo que los valores de tiempo y velocidad respectivamente están sujetos a error. Esto último puede producirse por singularidades en el procedimiento de proyección a la ruta de los pulsos GPS.

Para obtener valores representativos de lo que ocurre en la realidad, se opta por descartar todas las observaciones con distancias recorridas superiores al 120 % de la longitud del tramo habiendo comprobado que los valores de tiempo por tramo período no sufren gran variación. Esto corresponde a 878 observaciones (2 % de los datos), dejando la base en un total de 43.717 observaciones. Luego se realiza un análisis de observaciones de velocidad por bus distinguiendo entre períodos con y sin demora excedente, para detectar las velocidades sospechosamente bajas. Es necesario diferenciar entre períodos con y sin demora excedente pues claramente el corte para una velocidad baja no va a ser el mismo en ambos casos. Posteriormente, se analizan las velocidades sospechosamente altas, realizando una búsqueda manual de outliers relativos para cada tramo-período. Dadas las características del eje en estudio, se consideran con demora excedente los períodos consecutivos donde el tiempo de viaje promedio acumulado sea superior a 190 s/km para los tramos 1, 2 y 6 y mayor que 220 s/km para el tramo 7, pues hay movimientos de pasajeros notoriamente más altos que en el resto de los tramos.

Para eliminar velocidades bajas que probablemente están sujetas a error, se realiza el siguiente procedimiento: donde no hay demora excedente (37.052 observaciones) se eliminan todas las observaciones con velocidad menor o igual a 3 km/h (0,1 % de los datos), pues todas ellas aparecen como outliers relativos de los tramo-período a los cuales pertenecen y además recorren distancia menor a 500 m, lo que también indica que probablemente están sujetas a error. En base a los mismos criterios, se eliminan posteriormente todas las velocidades menores o iguales a 12 km/h que además recorran distancias menores a 250 m (0,6 % de los datos). Finalmente, para los períodos sin demora excedente se elimina el 0,7 % de los datos, quedando en un total de 36.775. Con los mismos criterios, se hace el procedimiento para los períodos con demora excedente (6.665 observaciones). En este caso también se eliminan las observaciones con velocidades menores o iguales a 3 km/h (0,4 % de los datos) y las observaciones con velocidad menor o igual que 6 km/h y que además recorran distancia menor a 500 m (0,8 % de los datos) por las mismas razones antes mencionadas. En total, se eliminan 357 observaciones, correspondiente a un 0,8 % de los datos, dejando la base de datos en 43.361 observaciones.

Para las velocidades altas, se hace una revisión detallada de cada tramo-período, identificando dentro de estos los outliers relativos. Se eliminan las observaciones de velocidad que se escapan notoriamente del resto, y además se considera el factor de la distancia recorrida, es decir, si la distancia recorrida es menor a 500 m y la observación de velocidad es notoriamente mayor al resto del mismo tramo-período, esa observación se considera errónea y se elimina. A partir de este filtro se eliminan 152 observaciones, correspondientes al 0,4 % de los datos.

Considerando los tres filtros aplicados, se elimina un 3 % de los datos, quedando la base en un total de 43.209 observaciones. En la Tabla 3.11 se presenta el resumen del procedimiento realizado.

Tabla 3.11: Filtros a nivel de bus

motivo	# Observaciones	Porcentaje
distancia mayor que 120 % del largo del tramo	878	2,0 %
velocidad anormalmente baja	356	0,8 %
velocidad anormalmente alta	152	0,3 %
Conservados	43.209	97,9 %

Con estas observaciones se procede a calcular el tiempo medio representativo de cada tramo-período como se describe al principio de esta sección (sección 3.2): suma de todos los tiempos recorridos por los buses dividido por la suma de todas las distancias, transformado de tal forma que el valor queda en s/km. Para ejemplificar las diferencias de tiempo que hay entre los distintos tramos y períodos, se calcula la velocidad respectiva en (km/hr) y se muestran en escala de colores en la Figura 4.2 (Cortés et. al, 2011). En la Tabla 3.13 se observan los valores de tiempo por tramo-período, promediados los 5 días. Se observan notables diferencias entre tramos y existencia de períodos en que claramente hay congestión significativa, particularmente en los tramos 1 y 7.

Tabla 3.12: Velocidades en escala de colores

Condición	V[Km/h]	Color
Muy mala	≤ 15	Rojo
Mala	>15 a ≤ 19	Naranja
Regular	>19 a ≤ 20	Amarillo
Aceptable	>20 to ≤ 25	Verde Claro
Buena	>25 to ≤ 30	Verde Oscuro
Excelente	>30	Azul

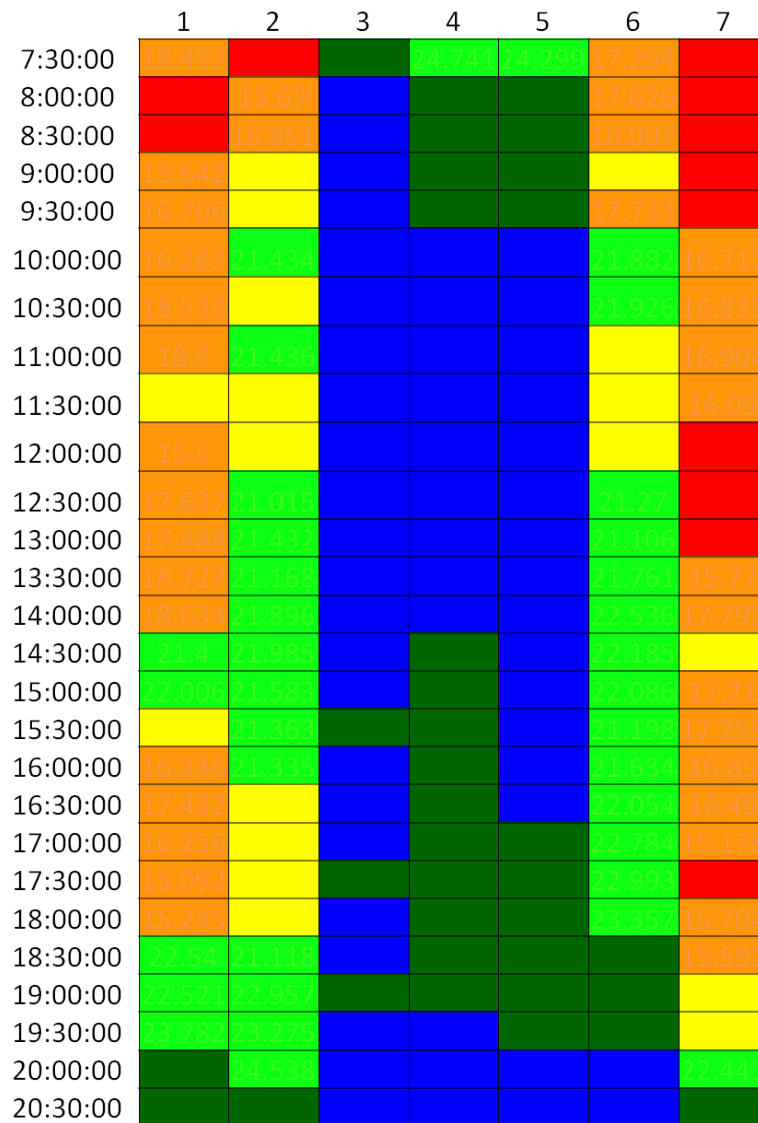


Tabla 3.13: Tiempo medio de viaje por tramo-período (s/km)

	1	2	3	4	5	6	7	general
7:30:00	194,6	247,3	122,8	145,5	148,2	208,2	336,6	200,5
8:00:00	243,4	229,4	119,3	136,5	143,2	204,2	442,4	216,9
8:30:00	271,8	190,9	113,8	132,9	132,5	199,9	359,8	200,2
9:00:00	230,1	175,4	107,5	128,1	123,5	187,0	282,8	176,3
9:30:00	215,5	176,3	110,9	128,3	122,9	203,0	254,5	173,1
10:00:00	221,1	168,0	113,0	116,6	115,2	164,5	215,3	159,1
10:30:00	194,2	176,4	112,5	118,2	112,9	164,2	213,8	156,0
11:00:00	190,5	167,9	118,3	117,2	115,8	171,7	213,0	156,3
11:30:00	186,4	173,6	108,1	112,8	115,9	173,0	223,7	156,2
12:00:00	232,3	172,2	100,4	116,6	114,9	175,0	260,1	167,4
12:30:00	204,1	171,3	103,5	115,4	109,7	169,3	272,5	163,7
13:00:00	201,2	168,0	103,2	113,3	112,2	170,6	267,6	162,3
13:30:00	192,2	170,1	99,8	110,5	110,4	165,4	228,3	153,8
14:00:00	193,2	164,4	101,0	116,1	109,6	159,7	202,4	149,5
14:30:00	168,2	163,7	109,1	125,6	116,2	162,3	184,2	147,1
15:00:00	163,6	166,8	112,9	126,6	118,2	163,0	209,2	151,5
15:30:00	184,9	168,5	120,3	129,3	116,2	169,8	208,6	156,8
16:00:00	221,6	168,7	119,0	126,8	115,0	166,4	213,6	161,6
16:30:00	206,5	175,2	110,6	125,4	118,5	163,2	218,3	159,7
17:00:00	221,5	176,3	116,2	123,2	132,1	158,0	237,2	166,3
17:30:00	238,5	178,7	120,7	125,2	132,8	156,6	253,9	172,3
18:00:00	236,1	172,0	119,6	126,1	131,6	154,1	229,2	167,0
18:30:00	159,7	170,5	119,7	122,6	126,3	139,0	230,9	152,7
19:00:00	159,9	156,8	120,6	121,0	127,3	133,6	187,6	143,8
19:30:00	151,4	154,7	117,0	115,9	122,3	126,7	175,2	137,6
20:00:00	136,4	146,7	114,8	114,9	119,5	118,3	160,4	130,1
20:30:00	131,6	133,5	109,1	108,2	115,7	108,5	138,2	120,7
Total	198,2	173,5	112,7	122,2	121,4	164,3	237,8	161,4

De los datos de tiempo se obtienen importantes conclusiones sobre la influencia del tipo de prioridad en la tiempo de viaje. En el corredor segregado se observan tiempos claramente más bajos que en el resto de los tramos con un promedio de 119 s/km para todos los tramo-períodos. Sus tiempos más altos se encuentran en la punta mañana, donde alcanza un promedio de 127 s/km. Con respecto a la vía exclusiva se observa que en la práctica no funciona como tal, pues en todo su período de aplicación tiene tiempos muy superiores al corredor pese a tener 3 pistas. Incluso en la mañana hay, en uno de sus tramos, el tiempo más alto de todo el segmento (442 s/km en el tramo 7 a las 8 hrs.). Luego, si se mira por tramo, el tramo 7 tiene los mayores tiempos de todos, y el tramo 6 es bastante similar al 2.

Luego, se descarta la existencia de una vía exclusiva para los períodos antes definidos y los tramos 6 y 7 serán considerados como tramos de tráfico mixto con tres pistas para fines de la modelación. En

consecuencia, la diferencia con tramos 1 y 2 será porque en tramos 6 y 7 hay tres pistas en vez de dos.

En el CD anexo se encuentran los valores de las variables antes definidas desagregadas por día, tramo y período. Las variables de tiempo, flujo de buses, subidas y bajadas y detenciones se encuentran en el archivo variables.xlsx. El detalle de los planes de semáforos se encuentra en el archivo planessemaforos.xlsx.

Capítulo 4

Modelación

Sobre la base de los antecedentes revisados, se plantea modelar de forma lineal el tiempo medio de viaje en s/km dividido en sus tres componentes: tiempo de crucero, demora en intersecciones y demora en paraderos. La ecuación que lo describe es la 4.1.

$$TMV_{ijk} = TC_{ijk} + DP_{ijk} + DI_{ijk} \quad (4.1)$$

Donde:

TMV_{ijk} : tiempo medio de viaje de un bus en un tramo i , período j , día k (s/km)

TC_{ijk} : tiempo medio unitario en movimiento a velocidad de crucero en tramo i , período j , día k (s/km)

DP_{ijk} : demora media unitaria por paradero en un tramo i , período j , día k (s/km)

DI_{ijk} : demora media unitaria por intersecciones semaforizadas en un tramo i , período j , día k (s/km)

Al estar trabajando con tiempo medio de viaje de bus en s/km de varios buses por tramo-período, las variables explicativas deben ser manejadas e interpretadas al mismo nivel de agregación y en unidades consecuentes. En las siguientes secciones se presenta el detalle de la modelación de cada componente, teniendo en cuenta el análisis realizado para los tiempos de viaje (3.13).

4.1. Modelación del tiempo de crucero

El tiempo de crucero corresponde al tiempo de viaje en movimiento del bus, dejando fuera los efectos de las detenciones, tanto en paraderos como en intersecciones semaforizadas. Este tiempo puede estar influido por el flujo de buses y otros automóviles con los que haya interacción, por el tipo de vehículo (rígido o articulado) y por las características geométricas y de infraestructura del eje.

Con respecto al flujo, sólo se conoce el flujo de buses, no el de automóviles. Por lo anterior, sólo puede modelarse la relación tiempo-flujo en el corredor segregado. Entonces, en tramos de tráfico mixto (1, 2, 6 y 7) solo puede establecerse una diferencia a través de variables mudas donde haya buenas razones para suponer variaciones significativas del flujo de autos.

Examinando los datos de tiempo, se buscan disminuciones significativas del tiempo medio de viaje atribuibles a menor flujo de automóviles. En los tramos 1 y 2 (tráfico mixto de 2 pistas), se aprecia lo anterior entre 18.30 y 21 hrs. En tráfico mixto de tres pistas, se observa en los tramos 6 y 7 entre

19 y 21 hrs. y además en el tramo 6 entre 17 y 19 hrs. Por otro lado, si bien hay diferencias entre tramos 1 y 2 y entre 6 y 7, hay razones para suponer que ellas se deben principalmente a demoras en intersecciones y paraderos antes que a diferencias en el flujo de autos.

El tipo de vehículo, rígido o articulado puede tener influencia sobre el tiempo de cruceo dadas las diferencias de tamaño y movilidad entre ambos.

Con respecto a la influencia de la geometría e infraestructura sobre el tiempo de cruceo, se distinguen solo dos tipos de prioridad (corredor segregado y tráfico mixto) y la diferencia de pistas entre tramos de tráfico mixto. La vía exclusiva queda fuera por las razones explicadas en el capítulo anterior (Sección 3.2.4). Los tramos 3, 4 y 5 pertenecen al corredor segregado y en ellos hay tiempos claramente más bajos, que se explican por la influencia de la infraestructura sobre el tiempo de cruceo. Por otro lado, se aprecia que el tramo 6 presenta en general tiempos inferiores o similares a los de los tramos 1 y 2 aunque tiene mayor demanda de pasajeros. Esto sugiere que podría haber un efecto perceptible de disponer de una pista más en el tiempo de cruceo, pero la condición que se observa en el tramo 7 arroja dudas al respecto.

Lo anterior conduce a las siguientes conclusiones para la modelación del tiempo de cruceo:

- geometría e infraestructura: variables mudas para cada tipo de prioridad: $DTM3$ para tráfico mixto de tres pistas y DCS para tramos de corredor segregado. No se incluye variable muda para el caso de tráfico mixto de dos pistas pues es el caso base y su tiempo está representado por la constante del modelo. Tampoco se incluye para vía exclusiva por las razones explicadas anteriormente.
- flujo de buses: variable muda para tráfico mixto de dos pistas entre las 18.30 y las 21 hrs ($DFTM2_{18.30a21}$), para tráfico mixto de tres pistas entre las 19 y 21 hrs ($DFTM3_{19a21}$) y para el tramo 6 entre 17 y 19 hrs ($DFT6_{17a19}$). Además se probará en el corredor incluir explícitamente el flujo de buses (q_{BCS}) y el porcentaje de buses articulados (PBA_{CS}) como variables explicativas del tiempo de cruceo. El porcentaje de buses articulados también se probará en el modelo para los 7 tramos, diferenciando su influencia en tramos de corredor segregado y tráfico mixto (PBA_{TM}).

De forma general esto queda como se presenta en la ecuación 4.2.

$$TC_{ij} = t_1 * DCS_i + t_2 * DTM3_i + t_3 * DFTM2_{i,18.30a21} + t_4 * DFTM3_{i,19a21} + t_5 * DFT6_{6,17a19} \quad (4.2)$$

Donde:

TC_{ij} : tiempo medio unitario en movimiento a velocidad de cruce para tramo i , período j (s/km)

t_1 : diferencia de tiempo debido al corredor segregado (s/km)

DCS_i : muda que vale 1 para tramos de corredor segregado (3,4 y 5) y 0 en otro caso

t_2 : Δt debido a tráfico mixto de 3 pistas (tramos 6 y 7) (s/km)

$DTM3_i$: muda que vale 1 para tramos de tráfico mixto de 3 pistas (6 y 7) y 0 en otro caso

t_3 : Δt debido a disminución de flujo de autos para tramos 1 y 2, de 18.30 a 21 hrs (s/km)

$DFTM2_{i,19a21}$: muda que vale 1 para tramos 1 y 2, de 18.30 a 21 hrs y 0 en otro caso

t_4 : Δt debido a disminución de flujo de autos para tramos 6 y 7, de 19 a 21 hrs (s/km)

$DFTM3_{i,19a21}$: muda que vale 1 para tramos de tráfico mixto de tres pistas (6 y 7), de 19 a 21 hrs

t_5 : Δt debido a disminución de flujo de autos para el tramo 6, de 17 a 19 hrs (s/km)

$DFT6_{6,17a19}$: muda que vale 1 para el tramo 6, de 17 a 19 hrs

Las variables de flujo de buses y tipo de bus se probarán en principio en el corredor, y con esa información se decide si se suman al resto de las variables aquí definidas.

4.2. Modelación de la demora en paraderos

Con respecto a la demora en paraderos, esta se subdivide en dos componentes: tiempo detenido transfiriendo pasajeros y tiempo perdido por la detención ya que no se observó que haya congestión en los paraderos.

Esto queda:

$$DP_{ijk} = TPP_{ijk} + TTP_{ijk} \quad (4.3)$$

Donde:

DP_{ijk} : demora media unitaria por paradero en un tramo i , período j , día k (s/km)

TPP_{ijk} : tiempo perdido por el hecho de detenerse en un tramo i , período j , día k (s/km)

TTP_{ijk} : tiempo detenido transfiriendo pasajeros en un tramo i , período j , día k (s/km)

Para recoger la demora en paraderos por el hecho de detenerse (TPP) se utiliza la variable descrita en la sección 3.2.3, número medio de detenciones ($NMDP_L$) en det/bus-km. Su coeficiente representa el tiempo muerto en segundos por aceleración y frenado y principalmente por apertura y cierre de puertas, pero da cuenta también de otros tiempos muertos asociados al fenómeno. En particular, el tiempo de aceleración y frenado, depende de la velocidad de cruce, luego el tiempo perdido por detención puede descomponerse como se muestra en la ecuación 4.4:

$$t_i = \frac{V_{ri}}{\gamma_i} + TM \quad (4.4)$$

Donde:

t_i : tiempo perdido por detención en tramos de tipo i (s)

V_{ri} : velocidad de cruce en tramos de tipo i (m/s)

γ_i : media armónica de las tasas de aceleración y frenado en tramos de tipo i (m/s²)

TM_i : tiempo muerto (s)

Al no poder estimar todos estos parámetros por separado, se estima un sólo parámetro asociado a las detenciones que posteriormente se descompone como se presenta en la ecuación anterior para comprobar consistencia del modelo entre la velocidad de cruceo estimada y el parámetro de detención respectivo. Luego, como el tiempo que tarda el bus en detenerse depende de la velocidad de cruceo, y en el corredor segregado ésta es efectivamente mayor, el efecto se rescata diferenciando la variable $NMDP_L$ para tramos de tráfico mixto ($NMDP_{LTM}$) y para tramos de corredor segregado ($NMDP_{LCS}$). Esta formulación se presenta en la ecuación 4.5.

$$TPP_{ijk} = t_6 * NMDP_{LTMjk} + t_7 * NMDP_{LCSjk} \quad (4.5)$$

Donde:

TPP_{ijk} : tiempo perdido al detenerse para el tramo de tipo i , período j , día k (s/km)

t_6 : tiempo perdido por detención en tramos de tráfico mixto (s)

$NMDP_{LTMjk}$: número medio de detenciones en tramos de tráfico mixto, período j , día k (det/bus-km)

t_7 : tiempo perdido por detención en tramos de corredor segregado (s)

$NMDP_{LCS}$: número medio de detenciones en tramos de corredor segregado, período j , día k (det/bus-km)

Para el tiempo detenido transfiriendo pasajeros (TTP) se cuenta con la información de subidas y bajadas por bus-km para cada tramo descritas en la sección 3.2.2. Usualmente en la literatura, se incluyen las variables de subida y bajada directamente, donde su coeficiente representa el tiempo medio en segundos que toma un pasajero en subir o bajar de un bus respectivamente y cualquier otro efecto asociado al fenómeno de subida y bajada. Al estar trabajando con medias y no disponer de información de puerta crítica, para el caso en cuestión se considera una sola variable de transferencia que es la suma de las subidas y bajadas del bus (MPT_L) en pax/bus-km, donde el coeficiente representa el tiempo medio por pasajero transferido en segundos. Luego, esto se formula como se presenta en la ecuación 4.6.

$$TTP_{ijk} = t_8 MPT_{Lijk} \quad (4.6)$$

Donde:

TTP_{ijk} : tiempo detenido transfiriendo pasajeros (s/km) para tramo i , período j , día k

t_8 : tiempo medio por pasajero transferido (s/pax)

MPT_{Lijk} : número medio de subidas y bajadas para tramo i , período j , día k (pax/bus-km)

Como se dispone de la información del tipo de bus, también es posible diferenciar el movimiento de pasajeros de buses articulados, agregando una variable extra que corresponda al movimiento de pasajeros que ocurre en este tipo de buses. Se espera que haya un menor tiempo de servicio de pasajeros en buses articulados en los casos en que las bajadas sean restrictivas sobre las subidas, pues en este tipo de buses se dispone de 2 puertas para bajar. Esto se prueba para el corredor segregado utilizando la variable sumada de subidas y bajadas $MPT_{LC SBA}$ para los tramos correspondientes. Si el resultado es satisfactorio, se incluirá también en el modelo para los 7 tramos.

4.3. Modelación de demora en intersecciones semaforizadas

4.3.1. Características importantes para la modelación de intersecciones semaforizadas

Usualmente en la literatura, la demora en intersecciones se ha modelado con una sola variable que representa el número de intersecciones semaforizadas. Como se observa en la tabla 3.12, hay tramo-períodos con diferencias (hasta de 300 s/km) que difícilmente pueden ser explicadas por la demora en paraderos o el tiempo de cruce. Incluso en el corredor, donde el tiempo de cruce juega un papel clave, se observan variaciones. Dado esto, es evidente que en todos los tramos hay demoras uniformes debido a las intersecciones semaforizadas y en algunos tramos y períodos hay congestión en estas, que muchas veces determina el tiempo medio de viaje y que difícilmente pueden ser recogidas por una sola variable que represente el número de intersecciones del tramo. Luego, es necesario rescatar el efecto tanto de la demora uniforme potencial (dependiente de la programación de semáforos), como de la demora excedente (por congestión).

Para los tramos 1 y 2, ambos de tráfico mixto de dos pistas, las diferencias (tiempos más altos en el tramo 1 en general) no pueden ser atribuidas al tiempo de cruce pues poseen el mismo tipo de prioridad y geometría. Tampoco a la demanda de pasajeros ni a las detenciones en paraderos, pues presentan valores similares. Esto indica nuevamente una clara influencia de la demora en intersecciones. Si bien ambos forman parte de una misma red de semáforos, hay dos factores diferenciales:

- hay algunas intersecciones en el tramo 1 que presentan congestión en varios períodos
- en el tramo 2, hay 3 intersecciones muy cercanas entre sí que pueden significar beneficio por coordinación de los semáforos, al menos en los períodos en que hay flujo de autos importante

En el tramo 6, hay 6 intersecciones semaforizadas, de las cuales 2 funcionan bajo un régimen semi-actuado, y además una de ellas es peatonal. Modelar este tramo con 6 intersecciones podría llevar a una sobreestimación de la demora uniforme por intersección, ya que probablemente los semáforos actuados y más aun el hecho que haya uno peatonal, presentan demoras uniformes mucho menores para los buses que el resto de las intersecciones del tramo. Es por esto que para modelación, se probará considerar que el tramo 6 tiene sólo 5 intersecciones semaforizadas efectivas.

El caso del tramo 7 es el más complejo. Parece ser el más afectado por el flujo de automóviles que impacta en la demora en intersecciones en varios períodos. Además, de sus 3 semáforos, el más restrictivo (el de Av. Matta) no está coordinado con los otros y hay diferencia en el tiempo de ciclo de los otros dos.

Por otro lado, hay períodos para un mismo tramo donde hay una disminución notable del tiempo de ciclo, lo que implica una disminución de la demora uniforme potencial pero no de la coordinación,

característica que también va a ser necesario recoger a la hora de modelar. Esto ocurre en el corredor segregado, tramos 2, 6 y 7 en distintos períodos.

Al analizar los tiempos de viaje del corredor, hay un período específico en que estos son notablemente menores y no hay grandes diferencias en el resto de sus variables explicativas. Estos períodos coinciden con el inicio y fin de un plan de la programación de los semáforos, por lo que la diferencia de tiempo de viaje podría explicarse por una coordinación particularmente favorable en ese plan para el sentido de tráfico estudiado.

Luego, la demora en intersecciones juega un papel clave en varios aspectos. Por un lado, situaciones de congestión (sobre todo tramo 7 y en menor medida tramo 1); por otro, diferencias en tiempo dentro del corredor segregado y, por último, efectos diferenciales de coordinación debido a casos especiales.

Luego, en las intersecciones semaforizadas se requiere rescatar el efecto de la demora uniforme (presente en todos los tramos y podría haber efectos especiales de tramos con singularidades), algún efecto de la coordinación de semáforos (presente en todos los tramos y efecto especial sobre tramos con singularidades) y la demora excedente producto de la congestión (presente sólo donde hay flujos altos de automóviles).

4.3.2. Modelación

Antes de entrar a la modelación se dará una pequeña explicación del fenómeno de demora que ocurre en una intersección semaforizada aislada.

El funcionamiento de una intersección semaforizada se caracteriza por la existencia cíclica de períodos de rojo, en que la capacidad es nula, y verde, en que la capacidad es igual al flujo de saturación. Por ello, en cada ciclo se forma una cola durante el período de rojo que se descarga completamente en el período de verde, si existe capacidad suficiente. De no ser así, quedarán vehículos en cola para el ciclo siguiente. Las demoras se relacionan directamente con lo anterior.

Luego, en la evolución de la cola y las características de la demora es posible distinguir dos procesos:

1. Uno de carácter cíclico, en el cual se forma cola durante el período de rojo que luego se descarga completamente durante el período de verde, siempre que no haya saturación.
2. Otro que representa la evolución de la cola de un ciclo a otro si es que hay saturación.

La saturación puede producirse por dos razones:

1. Debido a fluctuaciones aleatorias del grado de saturación. En este caso sólo en algunos ciclos se producirá saturación y en otros no.
2. Debido a sobresaturación sistemática. En este caso la cola crecerá ciclo a ciclo.

Debido a estas distinciones se definen componentes aditivas de las demoras:

1. Uniforme: esta componente recoge la variación de la cola y las demoras dentro de un ciclo. La definición de esta componente supone llegadas determinísticas y grado de saturación menor que uno. Esta componente es siempre no nula.

2. Excedente: esta componente recoge la variación de la cola y las demoras producto de:

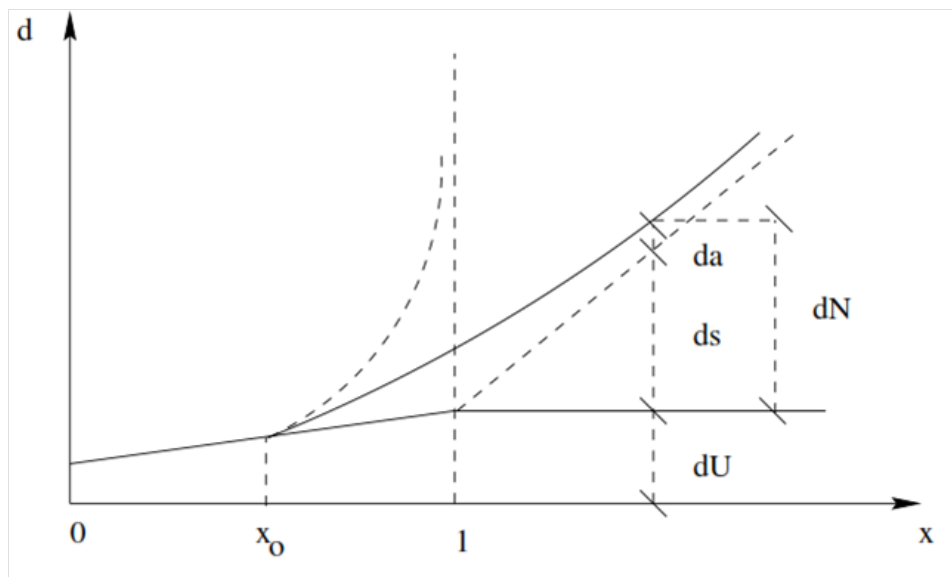
(a) Fluctuaciones aleatorias

(b) Sobresaturación sistemática

Esta componente puede ser nula si el grado de saturación no es alto.

En la figura 4.1 se esquematizan los distintos tipos de demora en función del grado de saturación x . Se ve que hasta x_0 sólo hay demora uniforme, la que crece de manera casi lineal con x . A partir de x_0 aparece una demora por fluctuaciones aleatorias (d_a) que crece rápidamente, haciéndose mayor que dU para x en el entorno de 0,9. Para $x > 1$ aparece la componente por sobresaturación d_s , la que aumenta fuertemente con x , en tanto d_a va disminuyendo y dU se mantiene constante en el valor correspondiente a $x = 1$.

Figura 4.1: Componentes de la demora media



Fuente: Teoría de Flujos Vehiculares, Apuntes de Clase (Gibson, 2001)

La demora uniforme es de carácter estacionario y corresponde a la demora para una intersección semaforizada, por lo que, de ahora en adelante, se habla de demora uniforme aislada (*DUA*). Está dada por

$$DUA = \frac{c * (1 - u)^2}{2 * (1 - y)} \quad (4.7)$$

Donde:

DUA : demora uniforme aislada

c : tiempo de ciclo

u : razón de verde efectivo

y : factor de carga

Esta expresión es el producto de la probabilidad de detenerse en el semáforo $\frac{(1-u)}{(1-y)}$ y la demora media por vehículo detenido $c \frac{(1-u)}{2}$. Éste último término depende sólo de variables de programación del semáforo, que son conocidas. En el primer término, se desconoce el factor de carga en los tramos de tráfico mixto pues no se tiene el flujo de vehículos distintos de los buses. Entonces la Ecuación 4.7 puede reescribirse como:

$$DUA = \alpha * \frac{c * (1 - u)}{2} \quad (4.8)$$

donde α representa la probabilidad de detención uniforme en el semáforo y puede tratarse como un parámetro a ser estimado.

Como $y = u * x$, donde x es el grado de saturación, y DUA alcanza su máximo para $x = 1$, su magnitud varía entre $c * (1 - u)^2$ y $c * (1 - u)$. Entre estos dos extremos varía aproximadamente en forma lineal con el grado de saturación. Por construcción, el parámetro α debe estar en el intervalo $[1 - u; 1]$.

Si se aproxima u por $\frac{v}{c}$, conocida la programación del semáforo puede obtenerse la demora uniforme estimando el parámetro α . En principio, éste puede variar entre tramos y períodos ya que lo hace el factor de carga que le subyace. No obstante, dado que la programación del semáforo también varía a lo largo del día y lo hace en relación a los factores de carga, cabe esperar que haya cierta estabilidad del parámetro al menos a nivel de tramo. Podría haber diferencias en el valor del parámetro entre tramos que tengan factores de carga significativamente distintos y de forma sistemática.

Lo anterior corresponde a la demora uniforme potencial de una intersección semaforizada. Como en cada tramo hay varias intersecciones semaforizadas, en el modelo, la variable $\frac{c(1-\frac{v}{c})}{2}$ se incluye multiplicada por el número de intersecciones del tramo (NIS_i) y se divide por el largo del tramo (L_i) con el fin de normalizar. Corresponde a la demora media por vehículo detenido y su formulación se presenta en la ecuación 4.9.

$$DUVD_{ij} = \left(\frac{c(1 - \frac{v}{c})}{2} \right)_{ij} * \frac{NIS_i}{L_i} \quad (4.9)$$

Donde:

$DUVD_{ij}$: demora uniforme por vehículo detenido para el tramo i , período j

NIS_i : número de intersecciones semaforizadas para el tramo i

L_i : largo del tramo i

Su coeficiente es adimensional y representa la probabilidad de detenciones uniforme. La multiplicación de ambas representa la demora uniforme media en s/intersección del tramo-período.

El parámetro se especifica con valores diferentes para cada tramo, salvo para los tramos del corredor segregado en que hay un valor común pues el grado de saturación en todos ellos es aproximadamente el mismo.

Por otro lado, cuando hay coordinación de los semáforos de un tramo, es posible reducir de manera importante la demora uniforme. Esta reducción depende principalmente de la formación de pelotones de vehículos que avanzan a un ritmo acorde con la progresión de los períodos de verde en semáforos consecutivos. Como en el eje en estudio gran parte de los semáforos existentes están coordinados, se considerará que la Ecuación 4.8 corresponde a la demora uniforme potencial en una intersección y se introducirá un término para recoger la reducción de ella logable mediante coordinación.

En el caso de los buses el comportamiento de pelotón se ve condicionado por la necesidad de detenerse en los paraderos para transferir pasajeros. La duración de estas detenciones es suficiente para perder el ritmo señalado. El fenómeno es complejo de modelar y típicamente se trata mediante simulación. Para incorporarlo a un modelo analítico como el de este estudio, se ha considerado introducir un factor de reducción de la demora uniforme que contiene elementos relevantes para el aprovechamiento de la coordinación. Para construirlo, se parte del hecho que una detención en un paradero hace perder la progresión para el semáforo más próximo (Gibson, Saavedra y Spoerer, 1982). Por otra parte, el potencial de reducción depende de la proporción de semáforos en red del tramo y de la razón de verde de la fase en que pasan los buses. Luego, el potencial de reducción por coordinación se fórmula como un factor de reducción por coordinación multiplicado por un parámetro a estimar (4.10):

$$PRC = \beta * \left(1 - \frac{\min(NMDP_L; NIS_L)}{NIS_L}\right) * \frac{NSR_L}{NIS_L} * \frac{v}{c} \quad (4.10)$$

Donde:

PRC : potencial de reducción por coordinación (s/int)

β : ahorro por coordinación (s/intersección)

$NMDP_L$: número medio de detenciones en paradero del tramo (det/bus-km)

NIS_L : número de intersecciones semaforizadas del tramo (int/km)

NSR : número de intersecciones semaforizadas en red del tramo (int/km)

v/c : razón de verde promedio para los buses en el tramo

Esta formulación tiene la ventaja de ser simple pero no hay bases teóricas ni empíricas para apoyar su especificación precisa. Que se sepa, esta es la primera vez que se usa una expresión de este tipo para estimar demoras uniformes para buses.

En el modelo, esta variable se incluye multiplicada por el número de intersecciones y se divide por el largo del tramo con el fin de normalizar. Corresponde al factor de reducción por coordinación y su formulación se presenta en la ecuación 4.11.

$$FRC_{ijk} = \left(1 - \frac{\min(NMDP_{Lijk}; NIS_{Li})}{NIS_{Li}}\right) * \frac{NSR_{Lij}}{NIS_{Li}} * \left(\frac{v}{c}\right)_{ij} * NIS_{Li} \quad (4.11)$$

Donde:

FRC_{ijk} : factor de reducción por coordinación para tramo i, período j, día k

NIS_{Li} : número de intersecciones semaforizadas del tramo i (int/km)

NSR_{Lij} : número de intersecciones semaforizadas en red del tramo i, período j (int/km)

v/c_{ij} : razón de verde promedio para los buses en el tramo i, período j

Su coeficiente representa el ahorro por coordinación en s/int del tramo-período.

Para este parámetro, se incluye una base para todos los tramos (FRC) y variables extra específicas donde se sabe que hay casos especiales en términos de coordinación como las explicadas al principio del capítulo. Un caso es el del tramo 2, en que hay tres intersecciones muy cercanas y podría haber beneficios por coordinación en períodos donde el flujo de autos es alto ($EFRCT_{2.30a18.30}$). Otro caso son los ciclos notablemente más bajos en ciertos períodos, en cuyo caso la demora uniforme, al depender directamente del ciclo, va a ser menor, aunque la coordinación siga siendo la misma. Por esto, no es correcto descontar el mismo potencial de reducción obtenido para tiempos de ciclo mayores y se hace necesario diferenciar. Las variables que se probarán en el modelo de este caso son $EFRCT_{6.10a21}$, $EFRCT_{7.12a17}$ y $EFRCCS_{14.30a17}$. El otro caso corresponde a beneficios por coordinación en ciertos períodos del corredor identificados por una disminución en sus tiempos de viaje, sin variación en el resto de sus variables explicativas. Esta variable corresponde a $EFRCCS_{10a14.30}$.

En suma, la demora uniforme en un tramo-período-día está dada por:

$$DU_{ijk} = (\alpha_i * DUVD_{ij} + \beta * FRC_{ijk} + \beta_{ij} * EFRC_{ijk}) * \frac{NIS_i}{L_i} \quad (4.12)$$

Donde:

DU_{ijk} : demora uniforme para el tramo i, período j, día k (s/km)

α_i : probabilidad de detención uniforme del tramo i

$DUVD_{ij}$: demora uniforme por vehículo detenido para el tramo 1, período j (s/km)

β : ahorro por coordinación (s/int)

FRC_{ijk} : factor de reducción por coordinación para el tramo i, período j, día k

β_{ij} : Δt por coordinación para el tramo i, período j (s/int)

$EFRC_{ijk}$: factor de reducción por coordinación debido a caso especial en tramo i, período j, día k

NIS_i : número de intersecciones semaforizadas para el tramo i

L_i : largo del tramo i

Se espera que los parámetro α_i estén en el rango $[1 - \frac{v}{c}, 1]$ y que β sea menor que cero. Los β_{ij} pueden ser positivos o negativos según el caso, pero si son negativos deben ser menores a β en módulo.

4.3.3. Demora excedente

La demora aleatoria crece en forma no lineal y empieza a hacerse importante para $x > 0,85$. A partir de $x = 1$ surge la demora por sobresaturación. Estas dos componentes se agrupan en la llamada demora excedente, la cual es dependiente de la duración del período en que se presenta el alto grado de saturación.

La magnitud de la demora excedente es principalmente función de la duración del período y del grado de saturación. Fuera del corredor segregado, esta variable depende del flujo de autos. Como esta variable se desconoce, no es posible dar a la demora excedente un tratamiento análogo al de la demora uniforme.

Los tramos y períodos donde hay alto grado de saturación se pueden deducir de los datos. Son aquellos en que el tiempo de viaje observado de los buses aumenta significativamente por sobre cierto umbral sin que lo haga la transferencia de pasajeros o las detenciones y luego baja de manera significativa y brusca. Para recoger la demora excedente se definen variables mudas para los tramos y períodos correspondientes.

No obstante, es imposible deducir de los datos si se produce demora excedente en intersecciones específicas de cada tramo. Solo cabe asociarla al tramo en su conjunto mediante variables mudas. El supuesto subyacente es que prácticamente todo el tiempo de viaje por encima del umbral es demora excedente.

Para definir los umbrales se analizan los datos. Se determina usar en el período de la punta mañana 200 s/km para los tramos 1 y 6 y 230 s/km en el tramo 7 que tiene un considerable mayor número de pasajeros transferidos en ese período. Para el resto del día, los valores respectivos son 185 s/km y 215 s/km. Se definen variables mudas para tramo-período consecutivos con tiempo promedio de viaje mayor al umbral correspondiente. Se hacen agrupaciones de períodos no consecutivos cuando hay diferencias significativas en el tiempo de viaje con los períodos adyacentes.

En la Tabla 4.1 se describen las variables definidas y en la Tabla 4.2 se muestran gráficamente. Los colores se utilizan sólo para destacar las distintas variables y no tienen que ver con los tiempos asociados.

Estas variables toman el valor 1 en los tramo-períodos pertinentes y 0 en otro caso. Su coeficiente representa la demora excedente estimada en s/km.

Tabla 4.1: Variables mudas de congestión por tramo-período

Variable	Tramo	Período
<i>DET</i> _{1_{8a}9.30}	1	08.00-09.30
<i>DET</i> _{1_{9.30a}10.30}	1	09.30-10.30
<i>DET</i> _{1_{10.30a}11.30y13.30a14.30}	1	10.30-11.30 y 13.30-14.30
<i>DET</i> _{1_{12.30a}13.30}	1	12.30-13.30
<i>DET</i> _{1_{16a}17.30}	1	16.00-17.30
<i>DET</i> _{1_{17.30a}18.30y12.00a12.30}	1	17.30-18.30 y 12.20-12.30
<i>DET</i> _{2_{7.30a}8.30}	2	07.30-08.30
<i>DET</i> _{6_{7.30a}10}	6	07.30-10
<i>DET</i> _{7_{7.30a}8y8.30a9}	7	07.30-08.00 y 08.30-09.00
<i>DET</i> _{7_{8a}8.30}	7	08.00-08.30
<i>DET</i> _{7_{9a}10}	7	09.00-10.00
<i>DET</i> _{7_{11.30a}12y13a13.30}	7	11.30-12.00 y 13.00-13.30
<i>DET</i> _{7_{12a}13.30}	7	12.00-13.30
<i>DET</i> _{7_{17a}19}	7	17.00-19.00

Tabla 4.2: Dummies de demora excedente destacadas

	1	2	3	4	5	6	7	general
7:30:00	194,6	247,3	122,8	145,5	148,2	208,2	336,6	200,5
8:00:00	243,4	229,4	119,3	136,5	143,2	204,2	442,4	216,9
8:30:00	271,8	190,9	113,8	132,9	132,5	199,9	359,8	200,2
9:00:00	230,1	175,4	107,5	128,1	123,5	187,0	282,8	176,3
9:30:00	215,5	176,3	110,9	128,3	122,9	203,0	254,5	173,1
10:00:00	221,1	168,0	113,0	116,6	115,2	164,5	215,3	159,1
10:30:00	194,2	176,4	112,5	118,2	112,9	164,2	213,8	156,0
11:00:00	190,5	167,9	118,3	117,2	115,8	171,7	213,0	156,3
11:30:00	186,4	173,6	108,1	112,8	115,9	173,0	223,7	156,2
12:00:00	232,3	172,2	100,4	116,6	114,9	175,0	260,1	167,4
12:30:00	204,1	171,3	103,5	115,4	109,7	169,3	272,5	163,7
13:00:00	201,2	168,0	103,2	113,3	112,2	170,6	267,6	162,3
13:30:00	192,2	170,1	99,8	110,5	110,4	165,4	228,3	153,8
14:00:00	193,2	164,4	101,0	116,1	109,6	159,7	202,4	149,5
14:30:00	168,2	163,7	109,1	125,6	116,2	162,3	184,2	147,1
15:00:00	163,6	166,8	112,9	126,6	118,2	163,0	209,2	151,5
15:30:00	184,9	168,5	120,3	129,3	116,2	169,8	208,6	156,8
16:00:00	221,6	168,7	119,0	126,8	115,0	166,4	213,6	161,6
16:30:00	206,5	175,2	110,6	125,4	118,5	163,2	218,3	159,7
17:00:00	221,5	176,3	116,2	123,2	132,1	158,0	237,2	166,3
17:30:00	238,5	178,7	120,7	125,2	132,8	156,6	253,9	172,3
18:00:00	236,1	172,0	119,6	126,1	131,6	154,1	229,2	167,0
18:30:00	159,7	170,5	119,7	122,6	126,3	139,0	230,9	152,7
19:00:00	159,9	156,8	120,6	121,0	127,3	133,6	187,6	143,8
19:30:00	151,4	154,7	117,0	115,9	122,3	126,7	175,2	137,6
20:00:00	136,4	146,7	114,8	114,9	119,5	118,3	160,4	130,1
20:30:00	131,6	133,5	109,1	108,2	115,7	108,5	138,2	120,7
Total	198,2	173,5	112,7	122,2	121,4	164,3	237,8	161,4

Luego, la formulación para la demora total en intersecciones es la siguiente:

$$DI_{ijk} = [\alpha_i * DUVD_{ij} + \beta * FRC_{ijk} + \beta_{ij} * EFRC_{ijk}] * \frac{NIS_i}{L_i} + \delta_{ij} * DET_{ij} \quad (4.13)$$

Donde:

DI_{ijk} : demora uniforme para el tramo i, período j, día k (s/km)

α_i : probabilidad de detención uniforme del tramo i

$DUVD_{ij}$: demora uniforme por vehículo detenido para el tramo i, período j (s/km)

β : ahorro por coordinación (s/int)

FRC_{ijk} : factor de reducción por coordinación para el tramo i, período j, día k

β_{ij} : Δt por coordinación para el tramo i, período j (s/int)

$EFRC_{ijk}$: factor de reducción por coordinación debido a caso especial en tramo i, período j, día k

NIS_i : número de intersecciones semaforizadas para el tramo i

L_i : largo del tramo i

δ_{ij} : demora excedente para tramo i, período j (s/km)

DET_{ij} : mudas de congestión para tramo i, período j

Habiendo realizado el análisis por componente del tiempo medio de viaje y las modelaciones correspondientes de variables, se procede a estimar modelos lineales de tiempo. En el próximo capítulo (capítulo 5) se presentan los resultados.

Capítulo 5

Estimación del modelo y análisis de resultados

Para comenzar con la estimación del tiempo de viaje, se modela primero sólo el corredor, es decir los tramos 3, 4 y 5. El hecho de que en esos tramos no haya influencia de otros vehículos ni fenómenos de congestión de ningún tipo permite probar la modelación planteada para la demora en intersecciones y la capacidad de obtener una distribución adecuada del tiempo de viaje entre sus componentes a partir de este tipo de datos.

Las estimaciones se realizan con el programa SPSS.

5.1. Modelo para el corredor segregado

5.1.1. Estimación de modelos alternativos

Las primeras estimaciones que se realizan son para probar el comportamiento de la modelación de la demora en intersecciones semaforizadas. Primero se corre el Modelo 1, donde el efecto de los semáforos se recoge solo con la variable número de intersecciones semaforizadas por km (NIS_L), como es habitual en la literatura. Luego se corre el Modelo 2, con la demora en intersecciones modelada, donde en vez de el número de intersecciones semaforizadas por km (NIS_L), se incluyen las variables presentadas en 4.3.2, $DUVD$ (demora uniforme potencial) y FRC (factor de reducción por coordinación) y los extras para esta variable ya definidos ($EFRCCS_{10a14.30}$ y $EFRCCS_{14.30a17}$). En ambos modelos se incluyen además el número medio de detenciones por bus-km ($NMDP_L$) y el movimiento total de pasajeros (MPT_L), que corresponde a la suma de las subidas y las bajadas por bus-km. Los resultados de la estimación de ambos modelos se presentan en la Tabla 5.1. El valor del estadístico t se presenta junto a cada parámetro correspondiente, entre paréntesis.

Tabla 5.1: Modelos corredor segregado 1 y 2

Variable	Parámetro	Modelo 1	Modelo 2
-	c (s/km)	99,10 (37,60)	79,34 (34,50)
NIS_L	t_1 (s/int)	0,67 (0,67)	-
$DUVD$	t_4	-	0,455 (10,19)
FRC	t_5 (s/int)	-	-8,46 (-6,36)
$EFRCCS_{10a14.30}$	t_6	-	-4,44 (-7,14)
$EFRCCS_{14.30a17}$	t_7	-	4,22 (4,74)
$NMDP_L$	t_2 (s/det)	14,21 (3,75)	20,45 (7,13)
MPT_L	t_3 (s/pax)	2,54 (3,04)	0,32 (0,46)
R-cuadrado ajustado (R^2)		0,448	0,685

Donde:

c : constante (s/km)

NIS_L : número de intersecciones semaforizadas (int/km)

t_1 : demora media en intersecciones (s/int)

$DUVD$: demora media potencial por vehículo detenido (s/km)

t_4 : probabilidad de detención uniforme

FRC : factor de reducción por coordinación (int/km)

t_5 : variación en la demora potencial por coordinación (s/int)

$EFRCCS_{10a14.30}$: muda extra FRC que vale FRC para el corredor segregado, períodos 10 a14.30 y 0 en otro caso (int/km)

t_6 : variación en la demora potencial por coordinación para corredor segregado, períodos 10 a14.30 hrs. (s/int)

$EFRCCS_{14.30a17}$: muda extra de FRC que vale FRC para el corredor segregado, períodos 14.30 a17 y 0 en otro caso (int/km)

t_7 : variación en la demora potencial por coordinación para el corredor segregado, períodos 14.30 a17 (s/int)

$NMDP_L$: número medio de detenciones (det/bus-km)

t_2 : tiempo medio de detención (s/det)

MPT_L : número medio de subidas y bajadas (pax/bus-km)

t_3 : tiempo medio por pasajero transferido (s/pax)

Lo primero que se observa en el Modelo 1 es que la variable para la demora en intersecciones (NIS_L) aparece como pequeña y no significativa. Esto carece de sentido físico ya que se sabe que la demora en intersecciones no puede ser nula. Además, de los análisis realizados sobre los tiempos de viaje, las variaciones en los tiempos del corredor indican que sí hay una demora significativa en intersecciones. Se obtiene un tiempo de cruce que parece demasiado alto para el corredor de casi 100 s/km y la demora en paraderos parece razonable, por lo que es el tiempo de cruce el que estaría recogiendo la demora en intersecciones. Luego, si se comparan ambos resultados, se observa que el efecto de modelar la demora en intersecciones hace que efectivamente aparezca cierto valor para esta, lo que es principalmente compensado por una reducción en el tiempo de cruce. Dentro de la demora en paraderos, aumenta el tiempo perdido por detención y, por consecuencia, disminuye el tiempo de servicio de pasajeros, obteniendo una distribución que no es adecuada, pero, si se multiplican los parámetros obtenidos para ambos modelos por sus variables respectivas, se observa que el tiempo total en paraderos es similar para ambos (17,5 s y 18,4 s respectivamente).

La distribución total obtenida para la demora modelada (Modelo 2) tiene mayor sentido físico que cuando sólo se incluye NIS_L como variable explicativa porque hace que efectivamente aparezca demora en intersecciones y se reduzca el tiempo de cruce. El problema que presenta es la distribución del tiempo en paraderos, ya que el tiempo total en paraderos es razonable. Probablemente esto se explica por la evasión, que no es uniforme, y el uso de medias por período de estas variables. No obstante, el hecho de que introducir esta relación conduzca a valores consistentes de los parámetros asociados a demora en intersecciones sugiere que la formulación de FRC al respecto es apropiada.

Luego, se incluyen las variables de flujo de buses (q_{BCS}) y el porcentaje de buses articulados (PBA_{CS}) y su variable extra en el tiempo de transferencia de pasajeros (MPT_{LCSBA}) al Modelo 2, que es el que mejor se ajusta al fenómeno físico, para detectar su posible influencia sobre el tiempo de viaje.

Incluir la variable de flujo de buses (q_{BCS}) resulta en no significativa y pequeña, por lo tanto no se prueba en el modelo para los 7 tramos. El resultado de este modelo se puede ver en detalle en los Anexos.

Con respecto al flujo de buses articulados y su influencia sobre el tiempo de cruce, los resultados se presentan en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Modelo PBA

Variable	Parámetro	Modelo PBA
-	c (s/km)	80,51 (25,79)
PBA_{CS}	t_{10} (s/bus-km)	-2,20 (-0,56)
$DUVD$	t_4	0,455 (10,17)
FRC	t_5 (s/int)	-8,51 (-6,36)
$EFRC_{CS_{10a14.30}}$	t_6 (s/int)	-4,33 (-6,65)
$EFRC_{CS_{14.30a17}}$	t_7 (s/int)	4,29 (4,76)
$NMDP_L$	t_2 (s/det)	20,50 (7,14)
MPT_L	t_3 (s/pax)	0,32 (0,47)
R-cuadrado ajustado (R^2)		0,684

Donde:

PBA_{CS} : proporción de buses articulados

t_{10} : diferencia de tiempo por flujo de buses (s/bus-km)

Se observa que, incluir la variable PBA_{CS} no entrega un resultado satisfactorio pues ésta aparece como no significativa y además con el signo contrario: si hubiera diferencia en el tiempo de cruce debido a flujo de buses articulados, se espera que éste sea mayor, dadas sus características físicas. Esto podría estar indicando que efectivamente, en alguno de los tiempos, hay una diferencia negativa para los buses articulados, lo que ocurriría dentro del tiempo de servicio de pasajeros, pues, en el caso de que las bajadas sean restrictivas, el hecho de que los buses articulados tengan más de una puerta para bajar, haría que sus tiempos de servicio fueran efectivamente menores. Luego, se prueba incluir la variable MPT_{LCSBA} . No se prueba una diferenciación en $NMDP$ pues, de analizar los tiempos de viaje para rígidos y articulados en promedio, la diferencia entre estos es pequeña, por

lo que se descarta que el efecto de articulados se pueda rescatar además para una diferenciación en esta variable, aunque se sabe que su coeficiente tiene relación con el tiempo de cruce (Ecuación 4.4).

Finalmente se prueba incluir ambas variables (PBA_{CS} y MPT_{LCSBA}) en el modelo. Los resultados se presentan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Modelos PBA 2 y 3

Variable	Parámetro	Modelo PBA 2	Modelo PBA 3
-	c (s/km)	79,31 (34,42)	81,70 (16,18)
PBA_{CS}	t_{10} (s/bus-km)	-	-4,33 (-0,53)
$DUVD$	t_4	0,456 (10,18)	0,453 (10,01)
FRC	t_5 (s/int)	-8,51 (-6,34)	-8,47 (-6,30)
$EFRCCS_{10a14.30}$	t_6 (s/int)	-4,38 (-6,76)	-4,34 (-6,65)
$EFRCCS_{14.30a17}$	t_7 (s/int)	4,26 (4,73)	4,27 (4,74)
$NMDP_L$	t_2 (s/det)	20,46 (7,13)	20,54 (7,14)
MPT_L	t_3 (s/pax)	0,65 (0,55)	-0,27 (-0,13)
MPT_{LCSBA}	t_{11} (s/pax)	-0,60 (-0,34)	1,08 (0,30)
R-cuadrado ajustado (R^2)		0,684	0,684

Donde:

MPT_{LCSBA} : número medio de subidas y bajadas para buses articulados (pax/bus-km)

t_{11} : diferencia de tiempo medio de subida y bajada para buses articulados (s/pax)

Al incluir la diferenciación para buses articulados en el tiempo de servicio de pasajeros, efectivamente se obtiene un valor negativo, y aquí si tiene sentido físico, pero sigue siendo no significativo. Esta variable tiene ciertamente más variabilidad que el tiempo de cruce, y esto podría estar permitiendo que ahí si se pueda rescatar el efecto de los buses articulados. Al incluir ambas diferenciaciones, el resultado no es satisfactorio pues ambas aparecen no significativas y con signo contrario al esperado. Esto podría estar ocurriendo por la poca varianza que hay dentro del corredor segregado y la nula variabilidad dentro del tiempo de cruce, por lo que estas pruebas se realizarán nuevamente para los 7 tramos. Lo interesante es que los parámetros asociados a demora en intersecciones se mantienen para las pruebas realizadas, es decir, el movimiento se produce sólo dentro del tiempo asociado a paraderos, donde se sabe que la distribución no es adecuada por las razones explicadas anteriormente.

5.1.2. Calidad del ajuste

Los valores obtenidos para R^2 no son altos, pero son similares a otros obtenidos para modelos de tiempo de viaje de buses en la literatura (Tetreault y El-Genedy, 2010). Esto se debe a que el rango de tiempo entre observaciones dentro del corredor (hasta 40 s/km) no se alcanza a explicar sólo por las variables explicativas incluidas. Dado que en el corredor segregado no hay congestión ni interacción de los buses con otros automóviles, hay grados de libertad extra que no se consideran en la modelación y podrían influir, como las diferencias entre conductores por ejemplo. Además al usar medias para la transferencia de pasajeros, no se alcanza a ajustar bien para la varianza dentro de la variable.

La significancia estadística de los parámetros vinculados a demoras en intersecciones semaforizadas en el Modelo 2 es alta, de modo que el enfoque adoptado funciona bien, al menos en ausencia de congestión.

En este modelo, la constante representa el tiempo de cruce de buses en el corredor segregado. El valor de 79,34 s/km obtenido para el Modelo 2 corresponde a una velocidad de cruce de 45,4 km/h, prácticamente igual a la obtenida por Tirachini (2013) para buses en período de flujo casi nulo, con datos para buses individuales medidos con observadores sobre ellos.

Con respecto a la demora uniforme potencial de semáforos, cabe destacar que el grado de saturación en el corredor es bajísimo, menor al 10 %, por lo cual el parámetro debe ser cercano a $(1 - \frac{v}{c})$, como se explica en la sección 4.3.2. El promedio de esta variable para el corredor en conjunto de todos los tramo-períodos es de 0,440, de modo que el valor obtenido para esta variable (0,455) es muy satisfactorio.

Para el factor de reducción por coordinación (*FRC*) no hay referencias pues nunca antes ha sido utilizado en modelos de este tipo. Para obtener una idea del significado concreto de su valor, en promedio representa una reducción del 30 % del potencial de demora uniforme en el corredor entre 7.30 y 10 hrs. y entre 17 y 21 hrs. Entre 10 y 14.30 hrs aumenta a un 51 % y disminuye a un 24 % entre 14.30 y 17. Esto parece razonable atendiendo a que en todos los tramos hay en promedio una detención en paradero cada cuatro intersecciones semaforizadas, casos en que se anula la reducción, y a que no hay coordinación entre el tramo 2 y el tramo 3. Este porcentaje es mayor donde efectivamente hay una disminución importante del tiempo de ciclo y ciertamente va a ser menor donde se intuye que hay una falta de coordinación por probable ajuste del sentido contrario.

Con respecto al tiempo perdido en paraderos, no se puede hacer un análisis por componente pues la distribución entre tiempo perdido por detención y tiempo de servicio de pasajeros no es la adecuada. Pero, si se calcula el tiempo total perdido en paraderos multiplicando por las variables de detención y pasajeros correspondientes, se obtiene en promedio un valor de 18,45 s. A partir de este tiempo es posible realizar el siguiente análisis basado en la ecuación 4.4:

El tiempo de cruce obtenido es equivalente a 12,6 m/s de velocidad. Si se supone una media armónica de las tasa de aceleración y frenado de $1,1 \text{ m/s}^2$ (rango normal de 1 a $1,2 \text{ m/s}^2$) y un tiempo muerto de 5 s (Tirachini, 2013) se obtiene un parámetro para $NMDP_L$ de 16,45 s. Luego, se multiplica este valor por el promedio de la variable de detenciones y se obtienen 14,32 s. Descontando este tiempo del total calculado en el párrafo anterior, quedan 4,13 s de tiempo de servicio de pasajeros. Este valor es el resultado de multiplicar el valor de la variable promedio de movimiento de pasajeros por el parámetro correspondiente, que se desconoce. Luego, al dividir los 4,13 s por el valor promedio de MPT_L se obtiene 2,05 s como valor aproximado del parámetro correspondiente, que esta dentro del rango obtenido por Fernández (2011) para tiempo de subida y bajada de pasajeros para buses del Transantiago (2,13 s por pasajero que sube y 1,43 s por pasajero que baja).

En suma, los coeficientes del modelo concuerdan muy bien con los reportados en la literatura o, en el caso de la demora en intersecciones, con las condiciones de operación existentes, aún cuando la distribución dentro del tiempo detenido en paraderos no sea la adecuada. Es decir, el modelo propuesto es capaz de reproducir confiablemente la distribución del tiempo medio de viaje de los buses en el corredor segregado, con la salvedad mencionada.

5.2. Modelo para los 7 tramos

5.2.1. Estimación del modelo

Antes de empezar a modelar, se procede a eliminar valores anómalos realizando un análisis por tramo-período para los distintos días. De este procedimiento resultan 14 eliminados, correspondientes a un 1,5 % de la muestra.

Habiendo comprobado que la modelación realizada funciona bien al menos en el corredor, donde no hay congestión, se procede a probar la modelación para el caso de los siete tramos previamente definidos. En este modelo, además de las variables presentadas para el corredor, se agregan las variables mudas de tiempo de cruce (distintos tipos de prioridad y ancho de vía), las variables extra para *FRC* y las variables mudas de congestión definidas en la sección 4.3.3. Como se presentó en el capítulo de modelación, la variable *DUVD* se diferencia por tramo y para el corredor segregado. La variable asociada a las detenciones ($NMDP_L$) se diferencia para el corredor pues se sabe que depende de la velocidad de recorrido, y el corredor segregado tiene velocidad de recorrido mayor. La constante en este modelo representa el tiempo de cruce para los tramos 1 y 2, que corresponden a tráfico mixto de dos pistas.

El primer modelo que se estima incluye todas las variables antes mencionadas con excepción de las extra *FRC* para los tramos 2, 6 y 7. Se mantienen las del corredor pues ya se comprobó que su comportamiento es adecuado al menos cuando éste se modela solo.

Todos los parámetros obtenidos tienen el signo correcto, excepto los parámetros asociados a la variable *DTM3* y a la variable muda $DCT_{6_{07.30a}08.30}$ que son muy pequeños y tienen una significancia muy baja.

El modelo se vuelve a estimar excluyendo estas dos variables. El resultado de ambas estimaciones se presenta en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Modelos 7 tramos

Variable	Parámetro	Modelo 1	Modelo 2
-	c (s/km)	131,97 (6,79)	131,39 (18,01)
DCS	t_1 (s/km)	-52,60 (-2,57)	-52,05 (-5,36)
$DTM3$	t_2 (s/km)	-0,50 (-0,05)	-
$DFTM2_{18.30a21}$	t_3 (s/km)	-20,19 (-7,06)	-20,26 (-8,24)
$DFTM3_{19a21}$	t_4 (s/km)	-37,39 (-4,05)	-37,01 (-11,72)
$DFT6_{17a19}$	t_5 (s/km)	-17,41 (-1,74)	-16,92 (-5,40)
$DUVD_{T1}$	t_6	0,721 (1,82)	0,736 (8,54)
$DUVD_{T2}$	t_7	0,494 (1,81)	0,504 (9,27)
$DUVD_{CS}$	t_8	0,485 (5,35)	0,485 (5,36)
$DUVD_{T6}$	t_9	0,452 (1,67)	0,460 (5,13)
$DUVD_{T7}$	t_{10}	0,895 (4,72)	0,901 (10,24)
FRC	t_{11} (s/int)	-9,32 (-3,48)	-9,32 (-3,48)
$EFRCCS_{10a14.30}$	t_{15} (s/int)	-3,87 (-3,18)	-3,88 (-3,19)
$EFRCCS_{14.30a17}$	t_{16} (s/int)	4,97 (2,81)	4,96 (2,81)
$DET1_{8a9.30}$	t_{17} (s/km)	59,11 (14,21)	59,12 (14,49)
$DET1_{9.30a10.30}$	t_{18} (s/km)	36,64 (7,97)	36,63 (8,09)
$DET1_{10.30a11.30y13.30a14.30}$	t_{19} (s/km)	11,77 (3,28)	11,78 (3,29)
$DET1_{12a13.30}$	t_{20} (s/km)	26,69 (5,78)	26,64 (5,90)
$DET1_{16a17.30}$	t_{21} (s/km)	39,39 (9,85)	39,34 (10,10)
$DET1_{17.30a18.30y12a12.30}$	t_{22} (s/km)	49,23 (11,87)	49,18 (12,32)
$DET2_{7.30a8.30}$	t_{23} (s/km)	40,31 (8,08)	40,38 (8,20)
$DET6_{7.30a9}$	t_{24} (s/km)	-0,75 (-0,13)	-
$DETT_{7.30a8y8.30a9}$	t_{25} (s/km)	102,59 (12,69)	103,11 (17,51)
$DETT_{8a8.30}$	t_{26} (s/km)	126,98 (12,47)	127,53 (15,10)
$DETT_{9a10}$	t_{27} (s/km)	18,31 (2,49)	18,67 (3,50)
$DETT_{11.30a12y13a13.30}$	t_{28} (s/km)	9,87 (2,07)	9,85 (2,07)
$DETT_{12a13.30}$	t_{29} (s/km)	42,89 (10,18)	42,93 (10,39)
$DETT_{17a19}$	t_{30} (s/km)	13,51 (1,50)	13,95 (3,71)
$NMDP_{LTM}$	t_{31} (s/det)	14,23 (2,83)	14,17 (2,93)
$NMDP_{LCS}$	t_{32} (s/det)	16,07 (4,39)	16,18 (4,60)
MPT_L	t_{33} (s/pax)	1,48 (2,04)	1,45 (2,14)
R-cuadrado ajustado (R^2)		0,934	0,934

Donde:

c : tiempo medio de cruceo tráfico mixto de dos pistas (tramos 1 y 2) (s/km)

DCS : variable muda que vale 1 para tramos de corredor segregado (3,4 y 5) y 0 en otro caso

t_1 : diferencia de tiempo de cruceo debido al corredor segregado (s/km)

$DTM3$: muda que vale 1 para tramos de tráfico mixto de 3 pistas y 0 en otro caso

t_2 : diferencia de tiempo de cruceo debido a tráfico mixto de 3 pistas (tramos 6 y 7) (s/km)

$DFTM2_{18.30a21}$: muda que vale 1 para tramos 1 y 2 de 18.30 a 21 hrs y 0 en otro caso

t_3 : diferencia de tiempo de cruceo por disminución de flujo de autos para tramos 1 y 2 de 18.30 a 21 hrs (s/km)

$DFTM3_{19a21}$: muda que vale 1 para tramos de tráfico mixto de tres pistas (6 y 7) de 19 a 21 hrs

t_4 : diferencia de tiempo de crucero por disminución de flujo de autos para tramos 6 y 7 de 19 a 21 hrs (s/km)
 $DFT_{6_{17a19}}$: muda que vale 1 para el tramo 6 de 17 a 19 hrs y 0 en otro caso
 t_5 : diferencia de tiempo de crucero por disminución de flujo de autos para el tramo 6 de 17 a 19 hrs (s/km)
 $DUVD_{T1}$: demora media potencial por vehículo detenido para el tramo 1 (s/km)
 t_6 : probabilidad de detenciones uniforme para el tramo 1
 $DUVD_{T2}$: demora media potencial por vehículo detenido para el tramo 2 (s/km)
 t_7 : probabilidad de detenciones uniforme para el tramo 2
 $DUVD_{CS}$: demora media potencial por vehículo detenido para el corredor segregado (s/km)
 t_8 : probabilidad de detenciones uniforme para el corredor segregado
 $DUVD_{T6}$: demora media potencial por vehículo detenido para el tramo 6 (s/km)
 t_9 : probabilidad de detenciones uniforme para el tramo 6
 $DUVD_{T7}$: demora media potencial por vehículo detenido para el tramo 7 (s/km)
 t_{10} : probabilidad de detenciones uniforme para el tramo 7
 FRC : factor de reducción por coordinación (int/km)
 t_{11} : variación en demora potencial por coordinación (s/int)
 $EFRCCS_{10a14.30}$: muda extra de FRC para el corredor segregado de 10 a 14.30 hrs y 0 en otro caso (int/km)
 t_{15} : variación en demora potencial por coordinación para corredor segregado, período de 10 a 14.30 (s/int)
 $EFRCCS_{14.30a17}$: muda extra de FRC para corredor segregado de 14.30 a 17 hrs y 0 en otro caso (int/km)
 t_{16} : variación en demora potencial por coordinación para el corredor segregado de 14.30 a 17 hrs (s/int)
 $DET_{1_{8a9.30}}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 1 de 8 a 9.30 hrs y 0 en otro caso
 t_{17} : demora excedente tramo 1 de 8 a 9.30 hrs (s/km)
 $DET_{1_{9.30a10.30}}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 1 de 9.30 a 10.30 hrs y 0 en otro caso
 t_{18} : demora excedente del tramo 1 de 9.30 a 10.30 hrs (s/km)
 $DET_{1_{10.30a12y13.30a14.30}}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 1 de 10.30 a 12 y 13.30 a 14.30 hrs y 0 en otro caso
 t_{19} : demora excedente del tramo 1 de 16 a 18.30 hrs (s/km)
 $DET_{1_{12.30a13.30}}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 1 de 12.30 a 13.30 hrs y 0 en otro caso
 t_{20} : demora excedente del tramo 1 de 12 a 13.30 hrs (s/km)
 $DET_{1_{16a17.30}}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 1 de 16 a 17.30 hrs y 0 en otro caso
 t_{21} : demora excedente del tramo 1 de 16 a 17.30 hrs (s/km)
 $DET_{1_{17.30a18.30y12a12.30}}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 1 de 17.30 a 18.30 y 12 a 12.30 hrs y 0 en otro caso
 t_{22} : demora excedente del tramo 1 de 17.30 a 18.30 y 12 a 12.30 hrs (s/km)
 $DET_{2_{7.30a8.30}}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 2 en períodos de 07.30 a 08.30 hrs y 0 en otro caso
 t_{23} : demora excedente del tramo 2 en períodos de 7.30 a 8.30 hrs (s/km)
 $DET_{6_{7.30a9}}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 6 en períodos de 7.30 a 9 hrs y 0 en otro caso
 t_{24} : demora excedente del tramo 6 en períodos de 7.30 a 9 hrs (s/km)
 $DET_{7_{7.30a8y8.30a9}}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 7 en períodos de 7.30 a 8 y 8.30 a 9 hrs y 0 en otro caso
 t_{25} : demora excedente del tramo 7 en períodos de 7.30 a 8 y 8.30 a 9 hrs (s/km)
 $DET_{7_{8a8.30}}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 7 de 8 a 8.30 hrs y 0 en otro caso
 t_{26} : demora excedente del tramo 7 de 8 a 8.30 hrs (s/km)
 $DET_{7_{9a10}}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 7 de 9 a 10 hrs y 0 en otro caso
 t_{27} : demora excedente del tramo 7 de 9 a 10 hrs (s/km)
 $DET_{7_{11.30a12y13a13.30}}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 7 de 11.30 a 12 y 13 a 13.30 hrs y 0 en otro caso

t_{28} : demora excedente del tramo 7 de 11.30 a 12 y 13 a 13.30 hrs (s/km)
 $DET_{7_{12a13.30}}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 7 de 12 a 13.30 y 0 en otro caso
 t_{29} : demora excedente del tramo 7 de 12 a 13.30 hrs (s/km)
 $DET_{7_{17a19}}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 7 de 17 a 19 hrs y 0 en otro caso
 t_{30} : demora excedente del tramo 7 de 17 a 19 hrs (s/km)
 $NMDP_{LTM}$: número medio de detenciones en tramos de tráfico mixto (det/bus-km)
 t_{31} : tiempo perdido por detención en tramos de tráfico mixto (s)
 $NMDP_{LCS}$: número medio de detenciones en tramos de corredor segregado (det/bus-km)
 t_{32} : tiempo perdido por detención en tramos de corredor segregado (s)
 MPT_L : número medio de subidas y bajadas (pax/bus-km)
 t_{33} : tiempo medio por pasajero transferido (s/pax)

Es importante notar que para estos primeros modelos de los 7 tramos ya se obtiene una distribución adecuada dentro del tiempo asociado a paraderos, con parámetros razonables tanto para las detenciones como para la transferencia de pasajeros, lo cual no ocurría para los modelos del corredor segregado.

Al sacar las variables $DTM3$ y $DCT_{6_{07.30a08.30}}$, resulta un modelo con todas las variables con el signo correcto y alta significancia. Esto indica que no hay efecto perceptible en el tiempo de cruce de buses si se dispone de una pista extra en tráfico mixto. Con respecto a la variable muda para el tramo 6, el tiempo medio de viaje de ésta es cercano al umbral definido para variables mudas de congestión, lo que sugiere que la elección del umbral es la correcta.

Luego, se incorporan las variables extra de FRC para los tramos 2, 6 y 7 definidas en el capítulo de modelación ($EFRCT_{2_{7.30a18.30}}$, $EFRCT_{6_{10a21}}$, $EFRCT_{7_{12a17}}$).

Al agregar las tres variables al mismo tiempo, se obtienen valores de los parámetros que no tienen sentido físico, tanto para las variables agregadas como para las variables iniciales. Incluso pierden significancia variables que antes sí la tenían.

Luego, se prueba incluir distintas combinaciones de estas variables para identificar lo que realmente está ocurriendo. Al no considerar la variable extra para el tramo 7, se recupera el sentido físico y la significancia de todos los parámetros del modelo, quedando como significativo y con signo correcto el parámetro asociado a la variable extra para el tramo 2 y como no significativo y pequeño el parámetro asociado a la variable para el tramo 6. Si se excluye sólo la variable extra para el tramo 6, se pierde la consistencia entre valores de velocidad de cruce y parámetros asociados a detenciones y, además, se pierde la distribución del tiempo perdido en paraderos. El parámetro asociado a la variable extra del tramo 2 aparece con valor razonable y buena significancia y el parámetro asociado a la variable extra del tramo 7 aparece con un valor demasiado alto, aunque significativo. Si no se incluye la variable extra para el tramo 2, nuevamente se pierde el sentido físico y la significancia de variables que antes sí la tenían, además de la distribución adecuada de las demoras asociadas a los distintos fenómenos. Los parámetros asociados a las variables extra del tramo 6 y del tramo 7, aparecen con valores demasiado altos aunque significativos.

Lo anterior conlleva a quedarse con la primera prueba realizada, donde sólo se incluyen las variables extra para el tramo 2 y para el tramo 6. Al aparecer esta última como no significativa y pequeña, se excluye del modelo y se vuelve a estimar. Ambos resultados se presentan en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Modelos 7 tramos, variables extra *FRC*

Variable	Parámetro	Modelo 3	Modelo 4
-	c (s/km)	134,59 (10,67)	132,64 (18,20)
<i>DCS</i>	t_1 (s/km)	-55,15 (-3,93)	-53,23 (-5,49)
<i>DFTM</i> _{218.30a21}	t_3 (s/km)	-27,50 (-7,15)	-27,63 (-7,30)
<i>DFTM</i> _{319a21}	t_4 (s/km)	-37,65 (-10,54)	-38,00 (-12,00)
<i>DFT</i> _{617a19}	t_5 (s/km)	-17,00 (-5,40)	-17,01 (-5,44)
<i>DUVD</i> _{T1}	t_6	0,767 (3,22)	0,809 (8,93)
<i>DUVD</i> _{T2}	t_7	0,610 (3,58)	0,639 (8,44)
<i>DUVD</i> _{CS}	t_8	0,480 (5,30)	0,481 (5,33)
<i>DUVD</i> _{T6}	t_9	0,456 (2,74)	0,482 (5,37)
<i>DUVD</i> _{T7}	t_{10}	0,884 (4,14)	0,921 (10,46)
<i>FRC</i>	t_{11} (s/int)	-9,16 (-3,42)	-9,20 (-3,45)
<i>EFRCT</i> _{27.30a18.30}	t_{12} (s/int)	-8,55 (-2,56)	-8,54 (-2,56)
<i>EFRCCS</i> _{10a14.30}	t_{15} (s/int)	-3,95 (-3,25)	-3,93 (-3,24)
<i>EFRCCS</i> _{14.30a17}	t_{16} (s/int)	4,87 (2,76)	4,89 (2,78)
<i>EFRCT</i> _{610a21}	t_{13} (s/int)	-0,84 (-0,19)	-
<i>DET</i> _{18a9.30}	t_{17} (s/km)	55,92 (13,01)	55,83 (13,08)
<i>DET</i> _{19.30a10.30}	t_{18} (s/km)	33,26 (7,01)	33,16 (7,04)
<i>DET</i> _{110.30a11.30y13.30a14}	t_{19} (s/km)	8,26 (2,16)	8,28 (2,16)
<i>DET</i> _{112a13.30}	t_{20} (s/km)	22,92 (4,81)	22,82 (4,82)
<i>DET</i> _{116a17.30}	t_{21} (s/km)	35,69 (8,55)	35,61 (8,59)
<i>DET</i> _{117.30a18.30y12a12.30}	t_{22} (s/km)	45,46 (10,59)	45,35 (10,66)
<i>DET</i> _{27.30a8.30}	t_{23} (s/km)	38,83 (7,80)	38,74 (7,82)
<i>DET</i> _{77.30a8y8.30a9}	t_{25} (s/km)	104,64 (11,54)	103,33 (17,60)
<i>DET</i> _{78a8.30}	t_{26} (s/km)	129,21 (11,84)	128,00 (15,19)
<i>DET</i> _{79a10}	t_{27} (s/km)	19,54 (2,30)	18,28 (3,43)
<i>DET</i> _{711.30a12y13a13.30}	t_{28} (s/km)	9,67 (2,04)	9,65 (2,04)
<i>DET</i> _{712a13.30}	t_{29} (s/km)	42,78 (10,13)	42,96 (10,43)
<i>DET</i> _{717a19}	t_{30} (s/km)	14,04 (3,10)	13,56 (3,61)
<i>NMDP</i> _{LTM}	t_{31} (s/det)	13,02 (2,66)	12,90 (2,66)
<i>NMDP</i> _{LCS}	t_{32} (s/det)	16,47 (4,68)	16,42 (4,68)
<i>MPT</i> _L	t_{33} (s/pax)	1,37 (2,02)	1,39 (2,06)
R-cuadrado ajustado (R^2)		0,934	0,934

Donde:

*EFRCT*_{27.30a18.30} : muda extra de *FRC* para tramo 2 de 7.30 a 18.30 hrs y 0 en otro caso (int/km)

t_{12} : variación en la demora potencial por coordinación para el tramo 2 de 7.30 a 18.30 (s/int)

*EFRCT*_{610a21} : muda extra de *FRC* para el tramo 6 de 10 a 21 hrs y 0 en otro caso (int/km)

t_{13} : variación en la demora potencial por coordinación para el tramo 6 de 10 a 21 hrs (s/int)

Los resultados del resto de las pruebas realizadas se pueden encontrar en la sección de Anexos.

Finalmente, se vuelven a incluir las variables $DTM3$ y $DCT6_{07.30a08.30}$, que aparecieron no significativas en primera instancia, comprobando que lo siguen siendo. El resultado de este modelo se encuentra en la sección de Anexos.

En consecuencia, hasta este momento, el mejor modelo es el 4.

Luego, se prueba incluir la variable PBA en el modelo para intentar rescatar el efecto de buses articulados sobre el tiempo de crucero. El resultado se muestra en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6: Modelos 7 tramos con PBA

Variable	Parámetro	Modelo 1 PBA
-	c (s/km)	140,24 (17,31)
PBA	t_{34} (s/km)	-11,22 (-2,13)
DCS	t_1 (s/km)	-54,73 (-5,64)
$DFTM2_{18.30a21}$	t_3 (s/km)	-27,76 (-7,35)
$DFTM3_{19a21}$	t_4 (s/km)	-38,61 (-12,14)
$DFT6_{17a19}$	t_5 (s/km)	-17,69 (-5,64)
$DUVD_{T1}$	t_6	0,786 (8,63)
$DUVD_{T2}$	t_7	0,623 (8,19)
$DUVD_{CS}$	t_8	0,478 (5,31)
$DUVD_{T6}$	t_9	0,463 (5,15)
$DUVD_{T7}$	t_{10}	0,902 (10,20)
FRC	t_{11} (s/int)	-9,42 (-3,53)
$EFRCT2_{7.30a18.30}$	t_{12} (s/int)	-8,29 (-2,49)
$EFRCCS_{10a14.30}$	t_{15} (s/int)	-3,37 (-2,72)
$EFRCCS_{14.30a17}$	t_{16} (s/int)	5,25 (3,00)
$DET1_{8a9.30}$	t_{17} (s/km)	55,32 (12,97)
$DET1_{9.30a10.30}$	t_{18} (s/km)	33,67 (7,15)
$DET1_{10.30a11.30y13.30a14}$	t_{19} (s/km)	9,02 (2,35)
$DET1_{12a13.30}$	t_{20} (s/km)	23,01 (4,86)
$DET1_{16a17.30}$	t_{21} (s/km)	36,16 (8,72)
$DET1_{17.30a18.30y12a12.30}$	t_{22} (s/km)	45,19 (10,65)
$DET2_{7.30a8.30}$	t_{23} (s/km)	38,54 (7,80)
$DET7_{7.30a8y8.30a9}$	t_{25} (s/km)	102,88 (17,55)
$DET7_{8a8.30}$	t_{26} (s/km)	127,53 (15,17)
$DET7_{9a10}$	t_{27} (s/km)	18,24 (3,43)
$DET7_{11.30a12y13a13.30}$	t_{28} (s/km)	10,49 (2,21)
$DET7_{12a13.30}$	t_{29} (s/km)	42,66 (10,37)
$DET7_{17a19}$	t_{30} (s/km)	13,10 (3,49)
$NMDP_{LTM}$	t_{31} (s/det)	12,62 (2,61)
$NMDP_{LCS}$	t_{32} (s/det)	16,28 (4,65)
MPT_L	t_{33} (s/pax)	1,50 (2,22)
R-cuadrado ajustado (R^2)		0,935

Donde:

PBA : proporción de buses articulados en tráfico mixto

t_{34} : diferencia de tiempo de cruce por flujo de buses articulados (s/bus-km)

El parámetro asociado a la variable PBA resulta negativo y significativo, indicando que habría un efecto de disminución de tiempo de buses articulados, pero de ser así, estaría en la transferencia de pasajeros, al igual que en el corredor segregado.

Luego, la variable PBA se diferencia para tramos de tráfico mixto y tramos de corredor segregado (PBA_{TM} y PBA_{CS}) y se incluye la variable MPT_{LPBA} para rescatar su efecto en el tiempo de transferencia de pasajeros. El resultado se muestran en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7: Modelos 7 tramos, variables extra *PBA*

Variable	Parámetro	Modelo 2 <i>PBA</i>
-	c (s/km)	117,57 (12,27)
PBA_{TM}	t_{35} (s/km)	32,03 (2,88)
DCS	t_1 (s/km)	-48,10 (-4,20)
PBA_{CS}	t_{36} (s/km)	19,80 (2,22)
$DFTM2_{18.30a21}$	t_3 (s/km)	-26,64 (-7,16)
$DFTM3_{19a21}$	t_4 (s/km)	-37,70 (-12,00)
$DFT6_{17a19}$	t_5 (s/km)	-18,67 (-6,04)
$DUVD_{T1}$	t_6	0,733 (8,12)
$DUVD_{T2}$	t_7	0,588 (7,83)
$DUVD_{CS}$	t_8	0,491 (5,55)
$DUVD_{T6}$	t_9	0,398 (4,46)
$DUVD_{T7}$	t_{10}	0,831 (9,47)
FRC	t_{11} (s/int)	-9,31 (-3,55)
$EFRCT2_{7.30a18.30}$	t_{12} (s/int)	-8,34 (-2,54)
$EFRCCS_{10a14.30}$	t_{15} (s/int)	-3,54 (-2,83)
$EFRCCS_{14.30a17}$	t_{16} (s/int)	5,29 (3,04)
$DET1_{8a9.30}$	t_{17} (s/km)	54,75 (13,05)
$DET1_{9.30a10.30}$	t_{18} (s/km)	32,99 (7,11)
$DET1_{10.30a11.30y13.30a14}$	t_{19} (s/km)	8,31 (2,20)
$DET1_{12a13.30}$	t_{20} (s/km)	23,72 (4,65)
$DET1_{16a17.30}$	t_{21} (s/km)	36,06 (8,83)
$DET1_{17.30a18.30y12a12.30}$	t_{22} (s/km)	46,06 (11,03)
$DET2_{7.30a8.30}$	t_{23} (s/km)	37,41 (7,70)
$DET7_{7.30a8y8.30a9}$	t_{25} (s/km)	101,75 (17,64)
$DET7_{8a8.30}$	t_{26} (s/km)	128,75 (15,57)
$DET7_{9a10}$	t_{27} (s/km)	16,97 (3,25)
$DET7_{11.30a12y13a13.30}$	t_{28} (s/km)	13,60 (2,89)
$DET7_{12a13.30}$	t_{29} (s/km)	41,54 (10,26)
$DET7_{17a19}$	t_{30} (s/km)	12,91 (3,50)
$NMDP_{LTM}$	t_{31} (s/det)	11,36 (2,39)
$NMDP_{LCS}$	t_{32} (s/det)	11,94 (3,39)
MPT_L	t_{33} (s/pax)	8,69 (6,07)
MPT_{LBA}	t_{38} (s/pax)	-11,38 (-5,62)
R-cuadrado ajustado (R^2)		0,937

Donde:

PBA_{TM} : proporción de buses articulados en tráfico mixto

t_{35} : diferencia de tiempo de cruce por flujo de buses articulados en tráfico mixto (s/bus-km)

PBA_{CS} : proporción de buses articulados en corredor segregado

t_{36} : diferencia de tiempo de cruce por flujo de buses articulados en corredor segregado (s/bus-km)

MPT_{LBA} : número medio de subidas y bajadas para buses articulados (pax/bus-km)

t_{38} : diferencia de tiempo medio por pasajero transferido para buses articulados (s/pax)

El modelo 2 *PBA* es interesante. Si se calculan los tiempos de cruce para tráfico mixto y corredor segregado considerando el efecto de buses articulados se obtienen 135,6 s y 80,1 s respectivamente, prácticamente iguales a los valores obtenidos para el modelo sin las variables de buses articulados. Por otro lado, el tiempo de cruce extra que conllevan los buses articulados corresponde al mismo porcentaje para tráfico mixto que para el corredor segregado (24 % y 25 % respectivamente). El valor obtenido para el tiempo de servicio de pasajeros es de 2,27 s.

Luego, es posible notar que al menos las tendencias son razonables: mayor tiempo de cruce y menor tiempo de servicio de pasajeros para buses articulados. Con respecto al tiempo de cruce hay bastante consistencia con el modelo que no distingue articulados de rígidos. En la demora en paraderos, sin embargo, disminuyen mucho los tiempos perdidos por detención dejando de ser consistentes con el tiempo de cruce, y sube el tiempo de servicio de pasajeros más allá de lo razonable. En la demora en semáforos se mantienen estables las demoras excedentes, baja algo la demora uniforme potencial y sube el ahorro por coordinación. Luego, lo que sube el tiempo de cruce es compensado por lo que sube la demora uniforme en su conjunto.

Finalmente, si bien parece haber diferencias entre articulados y rígidos que tienen sentido, no se captura bien la distribución de la demora en paraderos.

En suma, el modelo que mejor representa el fenómeno es el modelo 4.

5.2.2. Calidad del ajuste

El valor obtenido para R^2 es alto, comparable a los mejores ajustes obtenidos en casos similares incluso con datos obtenidos por observadores que viajan en los buses (Tirachini, 2013). Al incluir todos los tramos, el rango de tiempo a modelar crece considerablemente (hasta 300 s/km de diferencia en algunos casos), a diferencia de lo que se daba en el corredor. Esto y la inclusión de variables específicas en semáforos, congestión y detenciones permiten recoger con precisión la varianza de los datos, lo cual se ve reflejado en el aumento significativo de R^2 .

Al incorporar tal cantidad de variables mudas al modelo, podría pensarse que estas son las que explican toda la variabilidad y no las variables físicas que representan el fenómeno de comportamiento del bus. Con el fin de descartar esto se realiza un *test F* para comprobar la significancia de las variables de tiempo de cruce, intersecciones y paraderos con respecto a las variables mudas de congestión. Los resultados se presentan en los anexos (sección A.4), comprobando que efectivamente la varianza no es sólo explicada por las variables mudas, a un nivel de confianza de 99 %.

Si se comparan los parámetros correspondientes al corredor segregado con los obtenidos al estimar el modelo sólo con el corredor, son muy parecidos, a excepción de la distribución dentro del tiempo asociado a paraderos. Si se calcula la demora total en paraderos como los parámetros obtenidos multiplicados por las variables correspondientes, se obtiene valores muy similares (17,1 s en los 7 tramos y 18,4 s en el corredor), indicando que el problema es de distribución dentro de la componente y no entre distintas componentes del tiempo de viaje.

En la Tabla 5.8 se presentan los valores para el corredor en ambos casos para facilitar su comparación. El tiempo de cruce que se presenta para el corredor en el Modelo 7 tramos corresponde a la

constante obtenida (tiempo de viaje para tramos de tráfico mixto de 2 pistas) menos el ahorro que produce el corredor (parámetro asociada a variable *DCS*).

Tabla 5.8: Comparación de parámetros obtenidos para el corredor segregado

Variable	Parámetro	Modelo 7 tramos	Modelo CS
-	c (s/km)	79,41	79,34
<i>DUVD</i>	t_4	0,481	0,455
<i>FRC</i>	t_5 (s/int)	-9,20	-8,46
<i>EFRCCS</i> _{10a14.30}	t_6	-3,93	-4,44
<i>EFRCCS</i> _{14.30a17}	t_7	4,89	4,22
<i>NMDP</i> _L	t_2 (s/det)	16,42	20,45
<i>MPT</i> _L	t_3 (s/pax)	1,39	0,32

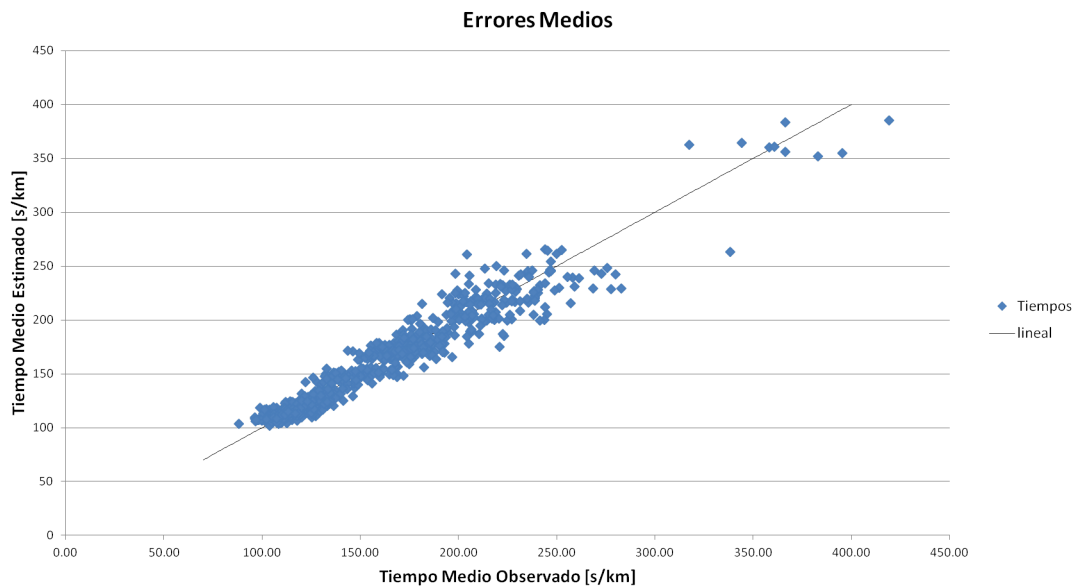
Luego, se puede decir que el modelo es robusto.

Con el objetivo de apreciar mejor la calidad del ajuste se presentan otros indicadores basados en las diferencias entre el tiempo medio observado y el tiempo medio estimado. En la Tabla 5.9 se presentan los errores medios totales y porcentuales y su definición, donde N es el número de observaciones y TM_i y tm_i son los tiempos observados y estimados respectivamente. En la Figura 5.1 se presentan los tiempos medios observados versus los tiempos medios estimados en s/km.

Tabla 5.9: Errores medios totales y porcentuales

Definición	Error
$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N tm_i - TM_i $	8,3 s/km
$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left \frac{tm_i}{TM_i} - 1 \right $	4,9 %

Figura 5.1: Tiempos medios observados versus estimados (s/km)



Aquí es posible ver que el error medio es pequeño (8,3 s/km), lo que se traduce en un 4,9 de error porcentual. Los puntos que se separan del resto corresponden al tramo 7, donde los tiempos medios de viaje son muy superiores.

Luego, en la Tabla 5.10, se presentan valores medios de tiempo observado y predicho y su diferencia para períodos agregados de tiempo.

Tabla 5.10: Tiempos medios estimados versus observados por período (s/km)

TIPO TRAMO		7.30-10.00			10.00-14.00			14.00-17.00			17.00-19.00			19.00-21.00		
		Obs.	Est.	Dif.	Obs.	Est.	Dif.	Obs.	Est.	Dif.	Obs.	Est.	Dif.	Obs.	Est.	Dif.
TM2	1	229,0	228,1	-0,4%	199,8	198,7	-0,5%	189,7	191,6	1,0%	205,2	204,1	-0,6%	144,8	147,7	2,0%
	2	200,0	200,6	0,3%	170,9	171,0	0,0%	167,9	169,0	0,7%	174,4	168,8	-3,2%	147,9	151,0	2,1%
TM3	6	199,0	198,5	-0,3%	169,2	169,4	0,1%	164,1	166,9	1,7%	151,9	151,9	0,0%	121,8	118,0	-3,1%
	7	325,8	325,5	-0,1%	226,2	227,4	0,5%	206,1	202,0	-2,0%	232,7	232,5	-0,1%	165,4	169,1	2,3%
CSeg	3	114,9	119,5	4,0%	107,4	109,7	2,2%	112,1	111,4	-0,7%	119,0	114,9	-3,5%	115,4	111,2	-3,6%
	4	134,3	137,2	2,2%	115,1	116,5	1,2%	125,0	123,8	-0,9%	124,3	122,4	-1,5%	115,0	116,0	0,9%
	5	134,1	131,2	-2,1%	113,4	111,0	-2,1%	115,6	116,9	1,1%	130,7	130,0	-0,5%	121,2	123,4	1,8%

Es posible notar que para algunos tramo-período se sobreestima y para otro se subestima, pero que

no hay tramos ni períodos sistemáticamente sub o sobre estimados. Las diferencias más grandes entre tiempos observados y estimados se encuentran en el corredor, donde sólo se explica la variabilidad con las variables de pasajeros, detenciones y demora uniforme en intersecciones, misma razón por la cual el modelo sólo para el corredor tiene un R^2 menor.

5.3. Análisis de resultados del modelo

Lo primero que cabe destacar es que, de acuerdo al modelo estimado, el hecho de disponer de una pista más en tramos de tráfico mixto, no conlleva ahorro en tiempo de cruce para los buses. Esto tiene sentido pues el comportamiento de los buses, dado que deben detenerse en paraderos, se ve determinado por las dos pistas más cercanas a estos, ocurriendo una segregación natural del resto de los vehículos. El hecho de disponer de dos pistas en vez de una, ciertamente conlleva ahorro, pues permite adelantamiento en paraderos en caso de que el bus no tenga que detenerse, pero la tercera pista no mejora lo anterior. No obstante, esta pista adicional influye positivamente en la demora en intersecciones pues hay mayor capacidad.

5.3.1. Análisis de parámetros

Con respecto al tiempo de cruce, se obtienen 132,64 s/km (27 km/h) para tráfico mixto de 2 y 3 pistas en horario de flujo normal, 105,01 s/km (34,28 km/h) para tráfico mixto de 2 pistas entre 18.30 y 21 hrs, 94,64 s/km (38 km/hr) para tráfico mixto de tres pistas entre 19 y 21 hrs y 115,63 s/km (31,13 km/hr) para el tramo 6 entre 17 y 19 horas. El corredor segregado tiene 79, 41 s/km (45,33 km/h) durante todo el día.

Con respecto a la demora en intersecciones, los parámetros asociados a $DUMD$, que son los que dan cuenta de la demora uniforme potencial, están dentro del rango admitido, es decir, son todos menores que 1 y mayores que $(1 - \frac{V}{C})$. En la tabla 5.11 se presentan los valores de los parámetros y del límite inferior $(1 - \frac{V}{C})$.

Tabla 5.11: Valores de parámetro asociado a $DUMD$ y su límite inferior

Tramo	Parámetro	$(1 - \frac{V}{C})$
1	0,809	0,401
2	0,639	0,492
CS	0,481	0,440
6	0,482	0,421
7	0,921	0,491

Los parámetros son consistentes con el grado de saturación de los distintos tramos y el límite inferior respectivo, es decir, el tramo 7 tiene el parámetro más alto, seguido por el tramo 1, luego le siguen el tramo 2, tramo 6 y finalmente el corredor segregado con un valor muy similar al del tramo 6. El grado de saturación está implícito en los parámetros obtenidos, siendo proporcional a la ubicación del parámetro dentro de su rango admitido. Luego, la similitud sólo es aparente, pues si se observa en la Tabla anterior los límites inferiores respectivos, el del tramo 6 es menor (debido a los ciclos

menores), por lo que, en términos de saturación, esta sigue siendo bastante mayor que en el corredor.

Con respecto a la demora excedente en intersecciones, se obtienen valores de magnitud importante, que van de 8 s/km en el mejor de los casos a 128 s/km en el peor. Para analizar estos valores se realiza el siguiente procedimiento: se calcula el tiempo promedio de los períodos involucrados en cada variable muda y, a este valor, se le resta el parámetro correspondiente obtenido con el modelo, que corresponde a la demora excedente, con el fin de identificar cuanto del tiempo total es asignado por el modelo como demora excedente. Los resultados se presentan en la Tabla 5.12.

Tabla 5.12: Variables mudas de congestión por tramo-período

Variable	Tiempo Promedio (s/km)	Parámetro (s/km)	Tiempo restante (s/km)
<i>DET</i> _{18a9.30}	248,5	55,8	192,7
<i>DET</i> _{19.30a10.30}	218,3	33,2	185,1
<i>DET</i> _{110.30a11.30y13.30a14.30}	192,5	8,3	184,2
<i>DET</i> _{112.30a13.30}	202,7	22,8	179,9
<i>DET</i> _{116a17.30}	216,5	35,6	180,9
<i>DET</i> _{117.30a18.30y12.00a12.30}	235,6	45,4	190,2
<i>DET</i> _{27.30a8.30}	238,4	38,7	199,7
<i>DET</i> _{77.30a8y8.30a9}	348,2	103,3	244,9
<i>DET</i> _{78a8.30}	442,4	128,0	314,9
<i>DET</i> _{79a10}	268,6	18,3	250,3
<i>DET</i> _{711.30a12y13a13.30}	226,0	9,7	216,3
<i>DET</i> _{712a13.30}	266,8	43,0	223,8
<i>DET</i> _{717a19}	237,8	13,6	224,2

Los valores obtenidos de tiempo restante son un indicador del valor de tiempo a partir del cual habría demora excedente. De lo anterior, es posible notar que los umbrales elegidos en la sección 4.3.3 para los tiempos en los cuales hay demora excedente son correctos, ya que el tiempo restante es siempre mayor o al menos muy cercano al valor definido como umbral.

En lo que respecta a coordinación, el parámetro de la reducción por coordinación casi conserva el valor obtenido sólo para el corredor. El hecho que sea igual para la variedad de condiciones que se dan en el conjunto del eje se basa en que *FRC* tiene variabilidad por tramo y período (ecuación 4.10), tanto por *NMDP_L* como por $\frac{V}{C}$, que estarían recogiendo la variabilidad de manera razonable permitiendo al parámetro permanecer estable. Con respecto a las variables extra para *FRC* del corredor segregado, estas son prácticamente iguales a las obtenidas para el corredor solo, donde se explica que sus valores son satisfactorios. Para el caso de la variable extra de *FRC* en el tramo 2, ésta tiene signo negativo, reflejando que las tres intersecciones muy cercanas implican beneficios adicionales por coordinación, salvo cuando el flujo de autos es muy bajo.

Al considerar tramos de tráfico mixto con 2 o 3 pistas, es claro que hay diferencias importantes incluso entre tramos con el mismo número de pistas. Ellas dependen del nivel del flujo de autos y de la existencia de coordinación entre los semáforos del tramo.

Como se aprecia en los datos, el tramo 7, con 3 pistas, tiene los tiempos medios de viaje más

altos de todo el eje considerado. El modelo deja en claro que ello se debe en gran medida a la demora en intersecciones. De hecho, se obtuvieron parámetros comunes (parámetro correspondiente a $DFTM3_{19a21}$) con buena significación para este tramo y el tramo 6, que tienen tiempos medios de viaje mucho menores, en tiempos de cruce y demora en paraderos. En cambio, hay numerosas variables mudas específicas para el tramo 7 relacionadas con la demora en intersecciones. La mayor cantidad de pasajeros y de detenciones en paraderos en este tramo explica una parte reducida de los tiempos medios de viaje en él, dado el valor de los parámetros correspondientes frente a los de demora en intersecciones.

Con respecto al tiempo detenido en paraderos, por construcción, el tiempo de transferencia por pasajero es el mismo en todo el eje, lo que tiene sentido pues no hay variación en las condiciones físicas de transferencia ni hay congestión en los paraderos de ningún tramo de acuerdo a lo observado en terreno y a las bajas tasas de transferencia del eje. El valor obtenido (1,39 s por pasajero transferido) es consistente con la literatura (Fernández, 2011), dando cuenta del efecto positivo que tiene la tarjeta Bip! como sistema de pago. El tiempo perdido por detención es consistente con los tiempos de cruce estimados de acuerdo a la ecuación 4.4. Si bien es cierto que la velocidad de cruce en los tramos fuera del corredor presenta variaciones entre algunos períodos, ellas son relativamente pequeñas o de duración muy limitada como para justificar la creación de variables mudas específicas para capturar con precisión esas diferencias. Su magnitud es del orden de 1 s/det. Fuera del corredor, la velocidad media de cruce en todos los tramos pertinentes es de 7,5 m/s, con lo cual resulta un tiempo muerto de 5 s (Tirachini, 2013) para una media armónica de las tasas de aceleración y frenado de $0,95 \text{ m/s}^2$. En el corredor, la velocidad media de cruce es de 12,6 m/s, con lo cual resulta un tiempo muerto de 5 s para una tasa de aceleración y frenado de $1,1 \text{ m/s}^2$, ambas dentro del rango normal de este parámetro (de 1 a $1,2 \text{ m/s}^2$).

Con respecto a los beneficios del corredor por componente se puede afirmar lo siguiente:

Tiempo de cruce. El corredor segregado reporta un ahorro de 53 s/km respecto de tráfico mixto de 2 pistas entre 07.30 y 18.30 hrs, y de 25 s/km entre 18.30 y 21 hrs. Respecto de tráfico mixto de 3 pistas, el ahorro es de 36 s/km para el tramo 6 entre 17 y 19 hrs. y de 15 s/km para tramos 6 y 7 entre 19 y 21 hrs. Estas diferencias se deben a una disminución del flujo de autos en esos tramo-períodos. Para tráfico mixto de 3 pistas entre 7.30 y 17 horas, el ahorro es el mismo que para tráfico mixto de 2 pistas entre 7.30 y 18.30, pues no hay diferencia en el tiempo de cruce por disponer de una pista más en horario de tráfico normal.

Demora en paraderos. La única diferenciación significativa recogida en el modelo es en el tiempo perdido por detención, entre el corredor segregado y los demás tramos. Ella es producto de los mayores tiempos de aceleración y frenado por la mayor velocidad de cruce en el corredor. En esta componente, el corredor segregado tiene desventaja frente al tráfico mixto, de 3,5 s/det.

Demora en intersecciones semaforizadas. Resalta que en los tramos y períodos en que hay alta saturación, la demora excedente es muy significativa: alcanza valores comparables a los ahorros en tiempo de cruce. Su asegurada inexistencia en el corredor segregado es entonces un beneficio importante de este esquema de prioridad.

En demora uniforme potencial, el corredor también tiene ventajas ya que la probabilidad de detención uniforme, parámetro que acompaña a la demora por vehículo detenido, es menor. La aparente

igualdad con el tramo 6 no sería tal en la práctica ya que difícilmente podría mantenerse el funcionamiento de 2 de sus intersecciones como semáforos semi-actuados si se instalara un corredor segregado ahí. Luego, sigue habiendo ventajas para el corredor en esta componente. Esta sólo podría ser contrarrestada si la existencia de corredor, por los cambios geométricos y de capacidad disponible para los autos que conlleva, se traduce en una programación de los semáforos que implique mayores valores para $c(1 - \frac{v}{c})$.

5.3.2. Análisis de componentes

El análisis precedente se puede ilustrar mediante la distribución de los tiempos estimados entre sus componentes. Para visualizarlo mejor se distinguen 5 períodos (07.30-10 (punta mañana), 10-14, 14-17, 17-19 (punta tarde¹) y 19-21 hrs) y se presenta la información para los tramos individuales y agrupados según se trate de tráfico mixto con 2 pistas, con 3 pistas y corredor segregado.

En primer lugar se analiza la distribución entre las 3 componentes del tiempo medio de viaje, en s/km. Los números se presentan en la Tabla 5.13.

Tabla 5.13: Distribución del tiempo medio de viaje por período (s/km)

TIPO	TRAMO	TC (s/km)					DI (s/km)					DP (s/km)				
		7.30-10	10-14	14-17	17-19	19-21	7.30-10	10-14	14-17	17-19	19-21	7.30-10	10-14	14-17	17-19	19-21
TM2	1	132,6	132,6	132,6	125,7	105,0	72,9	48,4	42,6	62,3	29,6	22,6	17,7	16,4	16,0	13,1
	2	132,6	132,6	132,6	125,7	105,0	46,5	23,0	22,2	26,9	34,2	21,5	15,4	14,1	16,1	11,7
TM3	6	132,6	132,6	132,6	115,6	94,7	30,3	10,4	9,1	11,0	8,8	35,6	26,4	25,2	25,2	14,6
	7	132,6	132,6	132,6	132,6	94,7	153,3	65,6	41,7	71,5	53,9	39,6	29,2	27,7	28,3	20,5
CS	3	79,4	79,4	79,4	79,4	79,4	23,7	18,1	21,1	23,5	22,9	16,4	12,1	10,9	12,1	8,9
	4	79,4	79,4	79,4	79,4	79,4	27,2	16,1	23,9	21,0	19,6	30,6	21,1	20,5	21,9	17,0
	5	79,4	79,4	79,4	79,4	79,4	26,6	15,5	22,7	34,0	32,7	25,2	16,1	14,8	16,7	11,3
TM2	1-2	132,6	132,6	132,6	125,7	105,0	57,2	33,3	30,5	41,4	32,3	21,9	16,3	15,0	16,1	12,3
TM3	6-7	132,6	132,6	132,6	122,7	94,7	81,4	33,3	22,6	36,2	27,5	37,2	27,6	26,2	26,5	17,0
CS	3-4-5	79,4	79,4	79,4	79,4	79,4	26,1	16,4	22,7	27,0	25,8	24,9	16,8	15,8	17,3	12,7
% TM2	1-2	62,6%	72,8%	74,4%	68,6%	70,2%	27,0%	18,3%	17,1%	22,6%	21,6%	10,3%	9,0%	8,4%	8,8%	8,2%
% TM3	6-7	52,8%	68,5%	73,1%	66,2%	68,0%	32,4%	17,2%	12,5%	19,5%	19,8%	14,8%	14,2%	14,4%	14,3%	12,2%
% CS	3-4-5	60,9%	70,5%	67,4%	64,2%	67,4%	20,0%	14,5%	19,3%	21,8%	21,9%	19,1%	14,9%	13,4%	14,0%	10,7%

Se aprecia que la distribución del tiempo de viaje no solo difiere entre períodos y tipos de tramo sino también lo hace entre tramos del mismo tipo. En los tramos de tráfico mixto congestionados (1 y 7), la demora en intersecciones (*DI*) es claramente mayor que en los otros. En los tramos con mayor demanda de transferencia de pasajeros (6 y 7) la demora en paraderos (*DP*) es más alta aunque el

¹La punta de la tarde es menos marcada pues el sentido estudiado es hacia el centro.

tiempo perdido por detención es menor que en el corredor segregado. A su vez, el tiempo de cruce es diferente según el tipo de prioridad.

En conjunto, el tiempo de cruce es el principal componente. No es de extrañar ya que hay un alto grado de coordinación de los semáforos y la demanda de pasajeros es relativamente baja. Predominan porcentajes en el rango 60-75 %, usuales en la literatura. Pero en los tramos y períodos congestionados su participación se reduce sensiblemente en favor de *DI*.

Para analizar la demora en intersecciones más en detalle se utilizan las Tablas 5.14, 5.15 y 5.16, que entregan la distribución de la demora media en intersecciones, el porcentaje de la demora uniforme sobre la demora total en intersecciones y el porcentaje del potencial de reducción sobre la demora uniforme respectivamente, en s/int.

Tabla 5.14: Distribución de la demora media en intersecciones por período (s/int)

TIPO	TRAMO	DUP (s/int)					Ahorro por coordinación (s/int)					DE (s/int)					DI (s/int)				
		7.30-10	10-14	14-17	17-19	19-21	7.30-10	10-14	14-17	17-19	19-21	7.30-10	10-14	14-17	17-19	19-21	7.30-10	10-14	14-17	17-19	19-21
TM2	1	13,7	13,1	13,1	13,8	13,9	-3,2	-3,5	-3,6	-3,9	-4,4	12,9	6,0	4,3	10,2	0,0	23,4	15,6	13,7	20,1	9,5
	2	13,5	12,8	12,8	13,4	13,6	-4,7	-6,3	-6,5	-5,8	-4,0	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0	13,1	6,5	6,2	7,6	9,6
TM3	6	10,3	5,3	5,2	5,4	5,4	-1,9	-2,4	-2,6	-2,4	-3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,4	2,9	2,5	3,1	2,4
	7	27,2	17,1	15,5	20,7	19,7	-1,1	-1,6	-1,8	-1,6	-1,9	24,5	6,1	0,0	4,5	0,0	50,6	21,6	13,7	23,6	17,8
	3	11,6	10,8	9,8	11,8	11,8	-2,3	-3,6	-1,5	-2,6	-2,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,3	7,1	8,3	9,2	9,0
CS	4	10,7	9,9	8,8	9,8	9,8	-3,3	-5,5	-2,3	-4,1	-4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,4	4,4	6,5	5,7	5,3
	5	10,9	10,1	8,9	13,1	13,1	-3,5	-5,8	-2,5	-3,5	-3,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	4,4	6,4	9,5	9,2
TM2	1-2	13,6	12,9	12,9	13,5	13,7	-4,1	-5,2	-5,3	-5,0	-4,2	7,8	2,4	1,7	4,1	0,0	17,3	10,2	9,3	12,7	9,6
TM3	6-7	17,3	10,2	9,5	11,8	11,4	-1,6	-2,1	-2,3	-2,0	-2,5	10,2	2,5	0,0	1,9	0,0	26,0	10,7	7,2	11,6	8,8
CS	3-4-5	11,0	10,2	9,1	11,6	11,6	-3,1	-5,2	-2,2	-3,5	-3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,9	5,0	6,9	8,2	7,8

DI está típicamente en el rango 15-20 % (Tabla 5.13), excepto cuando hay demora excedente significativa, caso en el cual su participación hasta se duplica. Los valores estimados para *DI* permiten entender por qué su modelación tradicional, con el número de intersecciones semaforizadas por km (NIS_L), no da buen resultado. Ella supone un valor único para la demora media por intersección pero en la Tabla 5.14 puede apreciarse que, según el modelo aquí desarrollado, ella tiene un considerable rango de variación (3 a 51 s/int). En principio el problema podría reducirse incluyendo las variables mudas para demora excedente pero como se vió al modelar solo el corredor, donde no hay esta clase de demora, tampoco se resuelve. En este caso resulta que si bien no hay variaciones sustanciales en su valor absoluto, sí la hay en términos relativos entre tramos y entre períodos de un mismo tramo. De hecho, el parámetro pertinente estimado en el modelo con NIS_L es casi nulo, lo que lo sitúa por debajo de todos los valores estimados con el modelo desarrollado en esta tesis.

En los tramos congestionados, *DI* aumenta considerablemente sobre todo por la aparición de de-

mora excedente. La particular situación del tramo 7, con alto grado de saturación durante gran parte del día y con falta de coordinación, se grafica claramente con el alto valor de la demora uniforme potencial (*DUP*) y la escasa magnitud del ahorro por coordinación (*FRC*). Al observar los valores de la demora excedente (*DE*) en la Tabla, muy pequeños en ciertos casos, debe tenerse presente que ellos resultan de dividir el total de *DE* por el número de intersecciones del tramo. Este procedimiento, útil para fines de descomposición, no refleja el hecho que la demora excedente, a diferencia de la uniforme, no se produce en todas las intersecciones del tramo sino solo en alguna o algunas de ellas. Entonces, su valor en las intersecciones en que existe es bastante mayor. Esto se aprecia mejor en la Tabla que muestra el porcentaje que representa *DE* sobre el total de *DI* (Tabla 5.15).

Tabla 5.15: Porcentaje de demora excedente sobre demora total en intersecciones semaforizadas

Tipo	Tramos	7.30 - 10	10 - 14	14 - 17	17 - 19	19 - 21
TM2	1 - 2	58 %	19 %	13 %	31 %	0 %
TM3	6 - 7	59 %	25 %	0 %	16 %	0 %
CS	3 - 4 - 5	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %

Luego, cuando hay demora excedente, ésta da cuenta de no menos de un 13 % y hasta un 59 % de ese total.

Con respecto al porcentaje que representa el ahorro por coordinación sobre la demora uniforme potencial, es posible notar las diferencias que hay en los tramos y períodos donde hay diferenciación de esta variable. Los números se presentan en la Tabla 5.16.

Tabla 5.16: Porcentaje de ahorro por coordinación sobre demora uniforme potencial en intersecciones semaforizadas

Tipo	Tramos	7.30 - 10	10 - 14	14 - 17	17 - 19	19 - 21
TM2	1 - 2	30 %	40 %	41 %	37 %	30 %
TM3	6 - 7	9 %	20 %	24 %	17 %	22 %
CS	3 - 4 - 5	28 %	51 %	24 %	30 %	33 %

Alcanza su valor máximo (51 %) para el corredor entre 10 y 14 hrs., donde se sabe que hay un beneficio por coordinación extra y disminuye a menos de la mitad entre 14 y 17 hrs, en que hay una disminución importante de tiempo de ciclo. Es bastante parejo en los tramos donde hay coordinación alta (entre un 25 y un 30 %). Lo anterior tiene sentido pues son tramos parecidos en términos de coordinación de semáforos, número de semáforos por km y detenciones. Esto cambia para los tramos 6 y 7 donde, además de no haber coordinación para el tramo 7, hay más detenciones en paraderos y por lo tanto mayor pérdida de coordinación y reducción de *FRC*.

La Tabla 5.17 muestra la distribución para la demora en paraderos en s/km.

Tabla 5.17: Distribución de la demora media en paraderos por período

TIPO	TRAMO	Detención (s/km)					Transferencia (s/km)					TOTAL (s/km)				
		7.30-10	10-14	14-17	17-19	19-21	7.30-10	10-14	14-17	17-19	19-21	7.30-10	10-14	14-17	17-19	19-21
TM2	1	16,7	13,9	13,1	12,5	10,2	5,8	3,8	3,3	3,5	2,9	22,6	17,7	16,4	16,0	13,1
	2	16,4	12,5	11,6	12,8	9,4	5,1	2,8	2,6	3,3	2,3	21,5	15,4	14,1	16,1	11,7
TM3	6	25,7	20,5	20,0	18,9	11,6	9,8	5,9	5,1	6,3	3,0	35,6	26,4	25,2	25,2	14,6
	7	23,5	19,7	18,8	18,3	14,8	16,1	9,4	8,9	10,0	5,7	39,6	29,2	27,7	28,3	20,5
CS	3	13,6	10,5	9,4	10,3	7,7	2,8	1,7	1,4	1,8	1,2	16,4	12,1	10,9	12,1	8,9
	4	23,5	17,5	17,2	18,0	13,9	7,1	3,5	3,3	3,9	3,1	30,6	21,1	20,5	21,9	17,0
	5	20,9	13,9	12,9	14,2	9,7	4,3	2,1	1,9	2,5	1,6	25,2	16,1	14,8	16,7	11,3
TM2	1-2	16,5	13,1	12,2	12,7	9,7	5,4	3,2	2,9	3,4	2,6	21,9	16,3	15,0	16,1	12,3
TM3	6-7	24,8	20,2	19,5	18,7	12,9	12,5	7,3	6,7	7,8	4,2	37,2	27,6	26,2	26,5	17,0
CS	3-4-5	20,0	14,3	13,5	14,5	10,7	4,9	2,5	2,3	2,8	2,0	24,9	16,8	15,8	17,3	12,7
%TM2	1-2	75,4%	80,2%	80,9%	79,0%	79,2%	24,6%	19,8%	19,1%	21,0%	20,8%					
%TM3	6-7	66,6%	73,4%	74,5%	70,4%	75,6%	33,4%	26,6%	25,5%	29,6%	24,4%					
%CS	3-4-5	80,3%	85,2%	85,6%	83,9%	84,2%	19,7%	14,8%	14,4%	16,1%	15,8%					

La demora en paraderos (*DP*) es la que presenta menor variación entre tramos y períodos en valor absoluto. En general, el tiempo perdido por detención constituye dos tercios o más de *DP*. La excepción es el tramo 7, que tiene demanda de pasajeros muy superior al resto, en que ese tiempo se equilibra con la demora por transferencia. Esta distribución de *DP* explicita el positivo efecto del sistema de cobro mediante la tarjeta Bip! en la reducción de los tiempos de transferencia.

Es interesante comprobar que la participación relativa de *DP* en el corredor segregado es muy similar a la de tráfico mixto de 3 pistas, en circunstancias que hay notablemente menos detenciones y transferencia de pasajeros en los paraderos. Esto se explica por la mayor velocidad de crucero y menor demora en intersecciones que son propias del corredor.

Se desprende que, para una buena operación de un corredor, donde hay mayor demanda de pasajeros, es clave controlar las demoras en paraderos.

5.3.3. Impactos según tipo de vía

Como se ha visto, el tiempo medio de viaje de los buses es afectado fuertemente por las características de la vía en que circulan. El objetivo principal de esta tesis es cuantificar estos impactos y dar luces de como tomar una decisión de inversión en infraestructura adecuada.

El análisis de los resultados del modelo para el tiempo medio de viaje permite identificar los impactos en cada componente y determinar cuantificaciones iniciales de su magnitud. Pero hay casos en que un tipo de vía presenta ahorros en una componente y pérdidas en otra y su magnitud puede variar sensiblemente entre períodos. Es deseable tener un indicador más integral. Con este fin, se aplica el modelo estimado para obtener los impactos del conjunto.

En principio, para comparar el corredor segregado con tramos de tráfico mixto de 2 y 3 pistas, se aplicaría el modelo con los parámetros obtenidos para el corredor y los valores de las variables propias de cada tramo de tráfico mixto de 2 y 3 pistas por separado. Luego, es posible calcular el ahorro de tiempo por poner corredor como la diferencia entre el tiempo medio observado del tramo y el tiempo medio estimado suponiendo que hay corredor segregado ahí. Pero, sólo por el hecho de construir un corredor segregado hay características que van a cambiar debido a la nueva infraestructura, como el tiempo de verde y ciclo, que influyen en la demora potencial en intersecciones. Por otro lado, se asume que los semáforos del corredor van a estar coordinados, por lo que el factor de reducción por coordinación también cambiaría.

Por lo anterior, no es directo aplicar el modelo con los parámetros del corredor y las variables propias de cada tramo ya que, al no considerar lo anterior, se estarían sobre-estimando los ahorros que produce el corredor segregado al no cambiar los tiempos de ciclo, y sub-estimando al no considerar mayor coordinación. Entonces, se supone que el resultado de poner un corredor en un cierto tramo con características propias, resultará en variables combinadas de ambos.

Para $c * (1 - \frac{v}{c})$ que representa la demora uniforme potencial en intersecciones, se utiliza un promedio de la variable propia de cada tramo, y la variable del corredor, manteniendo los planes horarios del corredor. Esto es equivalente a multiplicar la variable propia de cada tramo por un factor que se presenta en la ecuación 5.1.

$$FC_{ij} = \frac{c(1 - v/c)_{ij} + c(1 - v/c)_{CSj}}{2 * c(1 - v/c)_{ij}} \quad (5.1)$$

Donde:

FC_{ij} : factor de corrección para la demora uniforme potencial para el tramo i, período j

c : tiempo de ciclo

v : tiempo de verde

$c(1 - v/c)_{ij}$: demora uniforme potencial para el tramo con tráfico mixto i, período j

$c(1 - v/c)_{CSj}$: demora uniforme potencial para el corredor segregado, período j

Posteriormente, se revisan los valores de las variables obtenidas y se observa que, en casos donde el ciclo era excesivamente más bajo que en el corredor, sigue sin ser suficiente la corrección, por lo que se aplica un factor extra de 1,05. Esto ocurre sólo para el tramo 6 entre 10 y 21 hrs. Por otro lado, en el tramo 6 de 7.30 a 10 hrs. hay presencia de demora excedente no suficientemente significativa estadísticamente (esta variable se intentó incluir en el modelo y su significancia siempre fue muy baja), por lo que en este caso se aplica un factor de 0,85 para recoger este efecto. Los valores de las variables respectivas para cada tramo y los factores de corrección en cada caso se presentan en la Tabla 5.18.

Tabla 5.18: Factor de corrección para demora uniforme potencial

Período	Tramo			
	1	2	6	7
07.30 - 10.00	1,22	1,01	0,77	0,92
10.00 - 14.30	1,19	0,99	1,30	1,12
14.30 - 17.00	1,10	0,92	1,20	1,09
17.00 - 21.00	1,23	1,02	1,37	1,09

Para el factor de reducción por coordinación se aplican factores donde no hay coordinación actualmente pero sí la habría con corredor: esto ocurre para el tramo 2 entre 7.30 y 10 hrs (se aplica factor de 1,25) y para el tramo 7 en todos los períodos (se aplica factor de 1,5) . La diferencia en los factores tiene que ver con el grado de coordinación respectivo de cada tramo.

A modo de validación de los factores de corrección aplicados, se realiza el siguiente procedimiento: para las variables intersecciones por km (NIS_L), detenciones ($NMDP_L$) y movimiento de pasajeros (MPT_L), que no están afectadas por las correcciones realizadas, se encuentra su posición relativa con respecto a las mismas variables para los tramos 3 y 4 del corredor segregado. Lo mismo se hace para el tiempo estimado para los tramos 1 y 2 si hubiera corredor, y el tiempo observado de los tramos 3 y 4 del corredor. Los resultados se presentan en la Tabla 5.19.

Tabla 5.19: Datos para validación de procedimiento de corrección

Tramo	NIS_L	$NMDP_L$	MPT_L	Tiempo Medio sin corregir	Tiempo Medio corregido
1 y 2	3,34	0,92	2,32	117,88	119,82
3	2,54	0,62	1,26	112,74	112,74
4	3,68	1,01	2,75	122,19	122,19
Posición Relativa	70,2 %	76,9 %	71,1 %	54,4 %	74,9 %

En la tabla anterior, se observa que, al corregir las variables, el tiempo estimado que resulta cae en una posición relativa muy similar al resto de las variables, lo que no ocurre si no se realiza la corrección. Esto indica que el procedimiento funciona en la dirección deseada, y que efectivamente corrige lo que debe corregir.

Una vez aplicadas las correcciones para las variables, se aplica el modelo con los parámetros del corredor y los valores de las variables corregidas propias de cada tramo de tráfico mixto de 2 y 3 pistas por separado. De este modo, resulta un tiempo medio estimado para cada tramo-período de tráfico mixto de 2 pistas y 3 pistas suponiendo que hay un corredor segregado en ellos. Este tiempo puede compararse con el tiempo medio observado o estimado correspondiente.

Para hacer el indicador de más sencilla y amplia aplicación, se opta por comparar el tiempo medio estimado con corredor con el tiempo medio observado en los tramos sujetos a comparación. Dado que se dispone de pulsos GPS que cubren casi la totalidad de la ciudad de Santiago y por lo tanto sus tiempos medios de viaje, si se cumplen las condiciones necesarias, es posible calcular estos ahorros para cualquier tramo-período sin la necesidad de modelar. Con el mismo propósito, se trabaja con los datos de tráfico mixto de 2 y 3 pistas y no con cada tramo por separado ya que en cada caso, uno de

ellos presenta congestión en varios períodos y el otro no. Así se cubre una mayor gama de situaciones.

De forma general, se encuentra que los ahorros de tiempo estimados y los tiempos medios observados por tramo-período tienen una relación lineal muy bien definida, como se muestra en las Figuras 5.2 y 5.22.

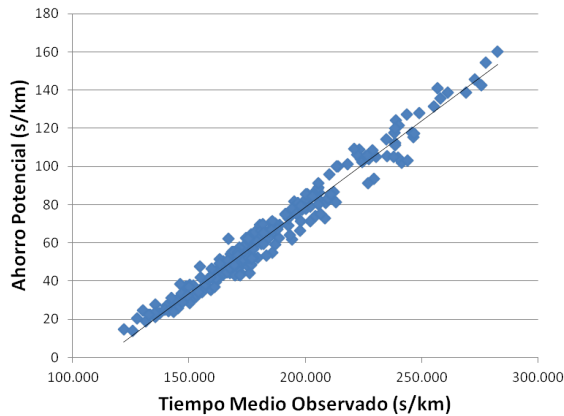


Figura 5.2: Tiempos de viaje observado (s/km) v/s Ahorros (s/km) para tráfico mixto de 2 pistas

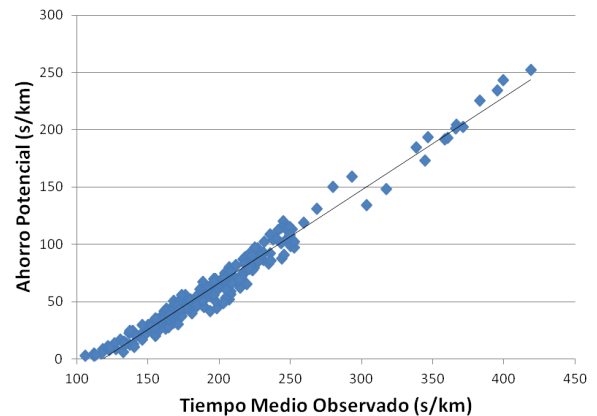


Figura 5.3: Tiempos de viaje observado (s/km) v/s Ahorros (s/km) para tráfico mixto de 3 pistas

Luego, el indicador se formula como se define en la ecuación 5.2.

$$ATC_{ij} = \alpha + \beta TMO_{ij} \quad (5.2)$$

Donde:

ATC_{ij} : ahorro de tiempo medio de viaje de un bus en el tramo i y período j que produciría un corredor segregado (s/km)

TMO_{ij} : tiempo medio de viaje de un bus observado en el tramo i y período j (s/km)

α, β parámetros a estimar

En la Tabla 5.20 se presentan los valores obtenidos mediante regresión lineal para el modelo anterior. El valor del estadístico t se presenta junto al parámetro correspondiente, entre paréntesis. TMO resulta muy significativo y con R^2 bastante alto.

Tabla 5.20: Modelos de ahorro tráfico mixto 2 y 3 pistas

Variable	Parámetro	Ahorro TM2	Ahorro TM3
-	α (s/km)	-102,28 (-53,58)	-96,07 (-54,81)
<i>TMO</i>	β	0,904 (88,21)	0,811 (93,65)
R^2		0,967	0,972

Para el modelo con variables corregidas, en términos simples, el corredor permite ahorrar un 90 % del tiempo de viaje en exceso de 113 s/km en un tramo de tráfico mixto de 2 pistas y un 81 % del tiempo en exceso de 118 s/km, en el caso de 3 pistas. Luego, para un mismo *TMO* el ahorro estimado es mayor si se trata de un tramo con dos pistas, aunque no haya diferencia de tiempo de viaje significativo de acuerdo al modelo estimado. Es importante tener en cuenta que el ahorro estimado corresponde a un sólo sentido de viaje.

Luego, el indicador generado con sus correcciones, permite estimar ahorros de tiempo de los buses con alta desagregación en el tiempo, lo que contribuye a realizar evaluaciones económicas más precisas de los beneficios involucrados. Las tasas de ocupación de los buses, factor que convertirá esos ahorros en tiempo de los usuarios, suelen variar significativamente en lapsos breves, especialmente en los períodos punta. La Tabla 5.21 ilustra el ahorro de tiempo estimado para diversos tiempos medios observados.

Tabla 5.21: Ahorro estimado para distintos tiempos medios observados

Tiempo Medio (s/km)	TM 2 pistas (s/km)	TM 3 pistas (s/km)
120,0	6,2	1,3
140,0	24,3	17,5
160,0	42,4	33,7
180,0	60,4	49,9
200,0	78,5	66,1
220,0	96,6	82,4
240,0	114,7	98,6
260,0	132,8	114,8
280,0	150,8	131,0
320,0	na	163,5
360,0	na	195,9

na: no aplicable

El rango de aplicación del indicador debe necesariamente ser compatible con el rango de calibración, es decir, solo será aplicable para tramos-período que cumplan con las siguientes condiciones:

- rango de tiempo medio observado (en tramos de 1 a 2 km de longitud y períodos de media hora ²):
 - en tráfico mixto de 2 pistas, entre el valor que anula el ahorro y 280 (s/km)
 - en tráfico mixto de 3 pistas, entre el valor que anula el ahorro y 420 (s/km)
- buses de piso bajo y puertas anchas, con pago de tarifa con smartcard a bordo
- flujo de buses: entre 30 y 140 (bus/h)
- pasajeros transferidos: entre 1 y 16 (pax/bus-km-h)
- no hay intersecciones no semaforizadas, número de intersecciones semaforizadas por kilómetro entre 3,3 y 3,8 (int/km)
- número de paraderos asignados por kilómetro entre 2,1 y 2,6 (par/km)
- corredor segregado de 2 pistas por sentido con paraderos situados a no menos de 25 metros de la línea de detención en intersecciones semaforizadas.

No es factible generar un indicador integral análogo para comparar tramos con tráfico mixto de 2 o 3 pistas pues en ambos casos hay numerosas variables mudas del modelo cuyo valor depende del flujo de autos, que se desconoce.

En la Tabla 5.22 se presentan los modelos sin aplicar la corrección a las variables, con el fin de analizar el efecto que tiene aplicar la corrección.

Tabla 5.22: Modelos de ahorro tráfico mixto 2 y 3 pistas, sin corregir variables

Variable	Parámetro	Ahorro TM2	Ahorro TM3
-	α (s/km)	-105,62 (-42,16)	-84,59 (-37,00)
<i>TMO</i>	β	0,933 (69,35)	0,758 (67,17)
R^2		0,948	0,947

Comparando los modelos sin y con corrección, se observa que, al no corregir variables hay una sobreestimación de los ahorros para TM2 a partir de 115,2 s de tiempo observado. Esto se debe a que, al no ajustar los ciclos a lo que ocurriría con corredor, se llega a un ahorro mayor, pues no se considera la demora extra que introducen los ciclos mayores. En el caso de TM3, ocurre lo mismo para tiempos menores que 216,6 s, pero luego habría una subestimación de los ahorros, ya que la corrección que se aplica por coordinación juega en el sentido contrario, es decir, si no se corrige por coordinación, se subestiman los ahorros. Luego, el modelo con las variables corregidas funciona adecuadamente,

²Se recomienda disponer de datos para al menos 5 días laborales.

rescatando correctamente los efectos de las correcciones introducidas.

Los tiempos estimados con corredor para tramos de tráfico mixto, los tiempos medios observados para estos tramos y el ahorro que produciría el corredor, que es la diferencia entre ellos en cada tramo-período, tanto corregidos como no corregidos se presentan, para cada tipo de vía en el CD anexo en el archivo ahorros.xlsx.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones y recomendaciones metodológicas

Conclusiones.

La primera conclusión es que es posible modelar con buena precisión el tiempo medio de viaje de los buses a partir de datos GPS y Bip! incluso en casos en que hay distintas condiciones de operación de los buses y tramos con muy distintos niveles de congestión en intersecciones y actividad en paraderos.

Para ello, es fundamental modelar la demora en intersecciones semaforizadas. El enfoque aquí planteado funciona bien, es flexible en cuanto puede aplicarse a semáforos que operan en red o aislados y a combinaciones de ellos. No requiere más información adicional que la programación de los semáforos, dato que en la actualidad está disponible fácilmente por la amplia presencia de sistemas de control centralizado, y observación en terreno de eventuales situaciones especiales que justifiquen la introducción de variables mudas específicas.

Además, la distinción de componentes de la demora en intersecciones semaforizadas da muy buen resultado. Para la demora uniforme potencial, las probabilidades de detención uniforme estimadas guardan buena relación con el nivel de saturación del tramo.

Es especialmente interesante que se pueda estimar la reducción de la demora uniforme por coordinación de los semáforos y que se confirme que la detención en paraderos disminuye esta reducción, de manera que se puede cuantificar vía la fórmula del factor de reducción FRC .

En cuanto a la demora excedente se ha podido identificar umbrales consistentes para el tiempo de viaje a partir de los cuales esta está presente. Estos umbrales varían según las detenciones y demanda de pasajeros en los paraderos.

Este enfoque además permite abordar la carencia de datos sobre el flujo de autos sin recurrir indiscriminadamente al uso de variables mudas por período. Estas se usan pero asociadas a componentes específicos del tiempo de viaje y sus períodos de aplicación se definen a partir de criterios objetivos derivados del análisis de los datos.

Los buenos resultados obtenidos indican que los procedimientos empleados para obtener las variables que caracterizan a los buses (tiempo de viaje, detenciones y pasajeros que suben y bajan en

paraderos), desarrollados en estudios anteriores, son apropiados.

Por otro lado, la metodología desarrollada sirve para analizar cuáles son los elementos críticos en el tiempo de viaje de los buses en determinados sectores o servicios, estimando el modelo para esos casos y observando la distribución resultante del tiempo entre componentes, de lo que se pueden derivar medidas apropiadas para reducir este tiempo.

Con respecto a las limitaciones de la metodología, la más relevante es la existencia de evasión significativa. Además, se identificó que hay diferencia entre el comportamiento de rígidos y articulados pero no se pudo rescatar este efecto adecuadamente en las distintas componentes del tiempo de viaje. Estos dos temas están ligados a la demora en paraderos y promueven su refinación. Resulta necesario más investigación e información sobre lo anterior.

Recomendaciones.

Para mejorar la modelación de la demora en paraderos se recomienda probar sumar las variables por paradero en vez de utilizar el promedio del conjunto de paraderos. Por otro lado, sería bueno probar la estimación de un modelo con todas las variables a nivel de bus individual en vez de trabajar con medias. Esto probablemente permitiría mayor diferenciación de efectos para distintas situaciones, como por ejemplo el tipo de bus, el número de puertas de bajada o la existencia de zona paga. Además, se podrían contrastar las demoras medias en intersecciones semaforizadas estimadas por este modelo y resultados de simulaciones con modelos de tráfico para los tramos estudiados, utilizando los mismos datos.

Para complementar los resultados sobre los impactos de esquemas de prioridad, es importante replicar este ejercicio para ejes con pista sólo bus (1 y 2 pistas), otro tipo de perfiles de corredor segregado (dos pistas discontinuas por ejemplo) y, en lo posible, con vías exclusivas en las que exista fiscalización adecuada.

Además, los resultados podrían apoyarse con mediciones del flujo de autos para los días correspondientes, pudiendo manejar de mejor manera la influencia de este factor sobre el tiempo de viaje de los buses.

6.2. Conclusiones y recomendaciones prácticas

Conclusiones.

Los datos revelan que la velocidad comercial media en el corredor segregado es de 30,3 km/h, cercana a la del Metro de Santiago (32 km/h). Esto confirma que es un esquema de prioridad muy efectivo con inversión considerablemente inferior a la de metro.

En cambio, a la luz de los datos, la vía exclusiva no opera como tal en absoluto, y si presenta mejores velocidades en la tarde es solo porque el flujo de autos es naturalmente menor. De hecho, esto también ocurre en los tramos de tráfico mixto de 2 pistas. Probablemente este esquema de prioridad solo puede funcionar con fuerte fiscalización.

Se establece que un corredor segregado produce ahorros sustanciales en el tiempo de viaje de los buses si se compara con condiciones de tráfico mixto. Son del orden de 1 min/km, por sentido de circulación, para velocidades comerciales cercanas a 20 km/h y se incrementan notoriamente si hay alta saturación en las intersecciones. Se generan funciones para estimar la magnitud de los potenciales ahorros con respecto a tráfico mixto en 2 y 3 pistas. Son de sencilla aplicación pues solo requieren conocer los tiempos medios de viaje en el caso base, los que pueden obtenerse de los datos GPS de los buses, pero debe tenerse en cuenta los rangos de validez de dichas funciones.

Se encuentra también que, en condiciones no congestionadas, sólo hay ahorros de tiempo de cruce para los buses en un tramo con tráfico mixto de 3 pistas con respecto a uno de 2 pistas, donde hay disminución significativa del flujo de autos. Si bien no es posible construir una función como en el caso anterior, se obtienen valores para cada componente del tiempo de viaje que permiten realizar comparaciones.

El uso de datos generados a partir de equipamiento GPS existente en todos los buses del sistema hace posible disponer de un gran volumen de información, sin más costo que su procesamiento, en cualquier parte de la ciudad o para cualquier conjunto de servicios. Por eso, hay un gran potencial para el empleo de técnicas de modelación como las de esta tesis en el desarrollo de instrumentos para mejorar el servicio de transporte público.

Recomendaciones.

Con respecto a los tramos de tráfico mixto de 3 pistas, la situación del tramo 7 requiere urgentes mejoras.

Si no se considera factible o conveniente implementar una fiscalización efectiva del esquema de vía exclusiva, puede recurrirse a soluciones más simples. Como el elemento crítico es la intersección con Av. Matta, en que hay poco espacio para aliviar la situación de Santa Rosa en la programación del semáforo, se recomienda dejar como sólo bus dos de las tres pistas al menos desde unos 50 m antes de los paraderos del Hospital San Borja. Además de prohibir, al menos entre 17 y 19 hrs, el viraje a la derecha de los autos en Av. Matta. La conveniencia de extender este esquema al conjunto de los tramos 6 y 7 no es clara, debe estudiarse considerando los impactos para una red más amplia e incluyendo los flujos de autos.

Con respecto al corredor segregado, solo podría reducirse algo la demora en intersecciones si es posible reducir el tiempo de ciclo de los semáforos. De forma más general, podrían potenciarse sus beneficios si se diseña algún sistema que implique menores tiempos de transferencia en los paraderos, por ejemplo, explorar diseños que aprovechen segregación del andén para crear zonas pagas sin que ello obligue a aumentar el ancho del mismo.

Bibliografía

- M. D. Abkowitz and I. Engelstein. Factors affecting running time on transit routes. *Transportation Research A*, 2:107–113, 1983.
- R.L. Bertini and A. M. El-Geneidy. Modeling Transit Trip Time Using Archived Bus Dispatch System Data. *Journal of Transportation Engineering*, 130:56–67, 2004.
- S. Cohen. Indicateurs d'allure et de consommation d'un autobus en exploitation. *Recherche Transport Sécurité - Janvier*, pages 16–22, 1984.
- C. E. Cortés, V. Burgos, and R. Fernández. Modelling passengers, buses and stops traffic microsimulation. *Journal of Advanced Transportation*, 44:73–88, 2010.
- C. E. Cortés, J. Gibson, A. Gschwender, M. Munizaga, and M. Zúñiga. Commercial bus speed diagnosis based on GPS-monitored data. *Transportation Research C*, 19:695–707, 2011.
- K. J. Dueker, T. J. Kimpel, and J. G. Strathman. Determinants of bus dwell time. *Journal of Public Transportation*, 7:21–39, 2004.
- A. El-Geneidy, J. G. Strathman, T. J. Kimpel, and D. T. Crout. The effects of stop bus consolidation on passenger activity and transit operations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1971:32–41, 2006.
- A. El-Geneidy, J. Horning, and K. Krizek. Analyzing transit service reliability using detailed data from automatic vehicle locator systems. 2008. Washington, D. C.
- R. Fernández. Análisis Ex post de la operación de la vía exclusiva para buses de Av. Grecia. 1996. Secretaría Ejecutiva, Santiago.
- R. Fernández. Medidas de prioridad al transporte público. In *Actas del IX Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*, pages 419–429, 1999. Santiago.
- R. Fernández. Experimental Studies of Bus Boarding and Alighting Times. In *European Transport Conference*, 10-12 October 2011. Glasgow, Scotland, UK.
- R. Fernández and E. Valenzuela. A model to predict bus commercial speed. *Traffic Engineering and Control*, 44:67–71, 2003.
- R. Fernández, M. del Campo, and C. Swett. Data collection and calibration of passenger service time models for the Transantiago System. In *European Transport Conference*, 6-8 October 2009. The Netherlands.

- R. Fernández, C. E. Cortés, and V. Burgos. Microscopic simulation of transit operations: policy studies with the mistransit application programming interface. *Transportation planning and Technology*, 33(2):157–176, 2010.
- J. Gibson, Saavedra A., and Soperer S. P. Metodología para la programación de redes de semáforos de tiempos prefijados. *Publicación ST-/NV/01/82, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile*, 1982.
- J. Gibson, I. Baeza, and L. Willumsen. Bus-stops, congestion and congested bus-stops. *Traffic Engineering and Control*, 30:291–296, 1989.
- A. Gschwender, R. Ibarra, M. Munizaga, C. Palma, and M. Zúñiga. Monitoring transantiago through enriched load profiles obtained from GPS and smartcard data. In *CASPT12 Conference on Advanced Systems for Public Transport*, 2012.
- H. S. Levinson. Analyzing transit travel time performance. *Transportation Research Record*, 915:1–6, 1983.
- E. Mazloumi, G. Rose, G. Currie, and M Sarvi. An integrated framework to predict bus travel time and its variability using traffic flow data. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 15:75–90, 2011.
- C. E. McKnight, H. S. Levinson, K. Ozbay, C. Kamga, and R. E. Paaswell. Impact of congestion on bus operations and costs. Technical report, FHWA Report, October 2003.
- M. Munizaga and C. Palma. Estimation of a disaggregate multimodal public transport Origin-Destination matrix from passive smart card data from Santiago, Chile. *Transportation Research C*, 24:9–18, 2012.
- J. M. Reilly and F. Aros-Vera. Estimating capacity of high volume bus rapid transit stations. In *Transportation Research Board Annual Meeting*, January 2013. Washington, DC.
- J. G. Strathman, T. J. Kimpel, K. J. Dueker, R. L. Gerhart, and S. Callas. Evaluation of transit operations: data applications of Tri-Met's automated Bus Dispatching System. *Transportation Quarterly*, 54:85–102, 2002.
- K. Strathman, J., T. Dueker, R. Kimpel, P. Gerhart, K. and Turner, S. Taylor, Callas, and Griffin. Service reliability impacts of computer-aided dispatching and automatic vehicel location technology: A Tri-Met case study. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 29(3):321–345, 1999.
- A. Tirachini. Estimation of travel time and the benefits of upgrading the fare payment technology in urban bus services. *Transportation Research Part C*, 2011. doi: 10.1016/j.trc.2011.11.007.
- A. Tirachini. Bus dwell time: the effect of different fare collection systems, bus floor level and age of passengers. *Transportmetrica A: Transport Science*, 9(1):28–49, 2013a.
- A. Tirachini. *Multimodal pricing and the optimal design of bus services: new elements and extensions*. PhD thesis, Institute of Transport and Logistics Studies, The University of Sydney, 2013b.
- P. R. Tétreault and A. M. El-Geneidy. Estimating bus run times for new limited-stop service using archived AVL and APC data. *Transportation Research part A*, 44:390–402, 2010.

- A. Valencia and R. Fernandez. A method to calculate commercial speed on bus corridors. *Traffic Engineering & Control*, 53(6):215–221, 2012.
- E. Valenzuela and I. Baeza. Influencia del diseño de bus, paradero y modalidad de operación sobre la duración de la detención de buses. page 453, 1991. Santiago.

ANEXOS

Anexo A

Modelos alternativos de tiempo de viaje

A.1. Modelos corredor con variable de flujo

El resultado de incluir q_{BCS} en el modelo del corredor se presenta en la tabla A.1. La variable incluida resulta no significativa.

Tabla A.1: Modelo q_{BCS}

Variable	Parámetro	Modelo q_{BCS}
-	c (s/km)	80,19 (26,76)
q_{BCS}	t_8 (s/bus-km)	-0,008 (-0,45)
$DUVD$	t_4	0,456 (10,19)
FRC	t_5 (s/int)	-8,46 (-6,34)
$EFRCCS_{10a14.30}$	t_6 (s/int)	-4,55 (-6,77)
$EFRCCS_{14.30a17}$	t_7 (s/int)	4,08 (4,30)
$NMDP_L$	t_2 (s/det)	20,28 (7,00)
MPT_L	t_3 (s/pax)	0,37 (0,54)
R-cuadrado ajustado (R^2)		0,684

Donde:

c : tiempo de cruce (s/km)

q_{BCS} : flujo de buses (bus/h)

t_8 : diferencia de tiempo de cruce por flujo de buses (s/bus-km)

$DUVD$: demora uniforme potencial media (int/km)

t_4 : tiempo medio asociado a la demora uniforme potencial (s/int)

FRC : factor de reducción por coordinación (int/km)

t_5 : variación de la demora potencial por coordinación (s/int)

$EFRCCS_{10a14.30}$: muda extra de FRC que vale FRC para el corredor segregado, períodos 10 a14.30 y 0 en otro caso

t_6 : variación de la demora potencial por coordinación para el corredor segregado, períodos 10 a14.30

$EFRCCS_{14.30a17}$: muda extra de FRC que vale FRC para el corredor segregado, períodos 14.30 a17 y 0 en otro caso

t_7 : variación de la demora potencial por coordinación para el corredor segregado, períodos 14.30 a17

$NMDP_L$: número medio de detenciones (det/bus-km)

t_2 : tiempo medio de detención (s/det)
 MPT_L : número medio de subidas y bajadas (pax/bus-km)
 t_3 : tiempo medio por pasajero transferido (s/pax)

A.2. Modelos 7 tramos, variables extra *FRC*

A continuación se muestran las pruebas realizadas en el modelo de 7 tramos para las variables extra de *FRC*. Los resultados se observan en la siguiente tabla.

Tabla A.2: Modelos 7 tramos, variables extra *FRC*

Variable	Parámetro	Modelo 5	Modelo 6	Modelo 7
-	c (s/km)	79,26 (4,53)	122,72 (15,80)	76,65 (4,37)
<i>DCS</i>	t_1 (s/km)	0,01 (0,00)	-43,07 (-4,28)	2,55 (0,14)
<i>DFTM</i> _{218.30a21}	t_3 (s/km)	-29,14 (-7,61)	-27,07 (-7,19)	-22,33 (-8,65)
<i>DFTM</i> _{319a21}	t_4 (s/km)	-35,73 (-10,04)	-33,07 (-9,61)	-34,86 (-9,82)
<i>DFT</i> _{617a19}	t_5 (s/km)	-14,49 (-4,60)	-14,97 (-4,74)	-14,36 (-4,54)
<i>DUVD</i> _{T1}	t_6	1,774 (5,46)	0,914 (9,65)	1,733 (5,33)
<i>DUVD</i> _{T2}	t_7	1,305 (5,71)	0,710 (9,12)	1,198 (5,33)
<i>DUVD</i> _{CS}	t_8	0,470 (5,24)	0,460 (5,12)	0,473 (5,27)
<i>DUVD</i> _{T6}	t_9	1,085 (5,02)	0,542 (5,97)	1,081 (4,99)
<i>DUVD</i> _{T7}	t_{10}	1,612 (6,06)	0,916 (10,47)	1,614 (6,05)
<i>FRC</i>	t_{11} (s/int)	-8,91 (-3,36)	-8,50 (-3,20)	-9,02 (-3,39)
<i>EFRCT</i> _{27.30a18.30}	t_{12} (s/int)	-7,97 (-2,41)	-8,28 (-2,49)	-
<i>EFRCCS</i> _{10a14.30}	t_{15} (s/int)	-4,18 (-3,48)	-4,26 (-3,53)	-4,14 (-3,43)
<i>EFRCCS</i> _{14.30a17}	t_{16} (s/int)	4,56 (2,61)	4,44 (2,53)	4,62 (2,64)
<i>EFRCT</i> _{610a21}	t_{13} (s/int)	15,88 (2,77)	-	15,35 (2,84)
<i>EFRCT</i> _{712a17}	t_{14}	31,35 (4,50)	18,90 (3,55)	32,00 (4,59)
<i>DET</i> _{18a9.30}	t_{17} (s/km)	53,03 (12,33)	55,25 (13,02)	56,03 (13,57)
<i>DET</i> _{19.30a10.30}	t_{18} (s/km)	30,80 (6,52)	32,78 (7,00)	33,97 (7,47)
<i>DET</i> _{110.30a11.30y13.30a14.30}	t_{19} (s/km)	8,79 (2,32)	8,29 (2,18)	12,06 (3,40)
<i>DET</i> _{112a13.30}	t_{20} (s/km)	20,88 (4,41)	22,71 (4,82)	24,37 (5,34)
<i>DET</i> _{116a17.30}	t_{21} (s/km)	33,43 (8,03)	35,31 (8,57)	36,85 (9,40)
<i>DET</i> _{117.30a18.30y12a12.30}	t_{22} (s/km)	43,17 (10,09)	45,28 (10,72)	46,67 (11,57)
<i>DET</i> _{27.30a8.30}	t_{23} (s/km)	35,75 (7,19)	37,98 (7,71)	37,21 (7,52)
<i>DET</i> _{77.30a8y8.30a9}	t_{25} (s/km)	91,97 (9,78)	111,44 (17,79)	91,30 (9,69)
<i>DET</i> _{78a8.30}	t_{26} (s/km)	116,60 (10,45)	136,08 (15,68)	115,79 (10,34)
<i>DET</i> _{79a10}	t_{27} (s/km)	5,02 (0,56)	24,59 (4,41)	4,89 (0,542)
<i>DET</i> _{711.30a12y13a13.30}	t_{28} (s/km)	9,19 (1,96)	9,58 (2,03)	9,36 (1,99)
<i>DET</i> _{712a13.30}	t_{29} (s/km)	38,55 (9,00)	38,30 (8,91)	38,46 (8,96)
<i>DET</i> _{717a19}	t_{30} (s/km)	15,68 (3,49)	20,29 (4,85)	16,01 (3,56)
<i>NMDP</i> _{LTM}	t_{31} (s/det)	18,76 (3,75)	17,84 (3,56)	20,05 (4,02)
<i>NMDP</i> _{LCS}	t_{32} (s/det)	18,69 (5,31)	18,41 (5,21)	18,51 (5,25)
<i>MPT</i> _L	t_{33} (s/pax)	0,79 (1,15)	0,85 (1,24)	0,84 (1,22)
R-cuadrado ajustado (R^2)		0,936	0,935	0,935

Donde:

c : tiempo medio de cruceo tráfico mixto de dos pistas (tramos 1 y 2) (s/km)

DCS : variable muda que vale 1 para tramos de corredor segregado (3,4 y 5) y 0 en otro caso

t_1 : diferencia de tiempo de cruceo debido al corredor segregado (s/km)

$DTM3$: muda que vale 1 para tramos de tráfico mixto de 3 pistas y 0 en otro caso
 t_2 : diferencia de tiempo de cruce debido a tráfico mixto de 3 pistas (tramos 6 y 7) (s/km)
 $DFTM2_{18.30a21}$: muda que vale 1 para tramos 1 y 2 de 18.30 a 21 hrs y 0 en otro caso
 t_3 : diferencia de tiempo de cruce por disminución de flujo de autos para tramos 1 y 2 de 18.30 a 21 hrs (s/km)
 $DFTM3_{19a21}$: muda que vale 1 para tramos de tráfico mixto de tres pistas (6 y 7) de 19 a 21 hrs
 t_4 : diferencia de tiempo de cruce por disminución de flujo de autos para tramos 6 y 7 de 19 a 21 hrs (s/km)
 $DFT6_{17a19}$: muda que vale 1 para el tramo 6 de 17 a 19 hrs y 0 en otro caso
 t_5 : diferencia de tiempo de cruce por disminución de flujo de autos para el tramo 6 de 17 a 19 hrs (s/km)
 $DUVDT_1$: demora media potencial por vehículo detenido para el tramo 1 (s/km)
 t_6 : probabilidad de detenciones uniforme para el tramo 1
 $DUVDT_2$: demora media potencial por vehículo detenido para el tramo 2 (s/km)
 t_7 : probabilidad de detenciones uniforme para el tramo 2
 $DUVDCS$: demora media potencial por vehículo detenido para el corredor segregado (s/km)
 t_8 : probabilidad de detenciones uniforme para el corredor segregado
 $DUVDT_6$: demora media potencial por vehículo detenido para el tramo 6 (s/km)
 t_9 : probabilidad de detenciones uniforme para el tramo 6
 $DUVDT_7$: demora media potencial por vehículo detenido para el tramo 7 (s/km)
 t_{10} : probabilidad de detenciones uniforme para el tramo 7
 FRC : factor de reducción por coordinación (int/km)
 t_{11} : variación en demora potencial por coordinación (s/int)
 $EFRCT_{7.30a18.30}$: muda extra de FRC para tramo 2 de 7.30 a 18.30 hrs y 0 en otro caso (int/km)
 t_{12} : variación en la demora potencial por coordinación para el tramo 2 de 7.30 a 18.30 (s/int)
 $EFRCS_{10a14.30}$: muda extra de FRC para el corredor segregado de 10 a 14.30 hrs y 0 en otro caso (int/km)
 t_{15} : variación en demora potencial por coordinación para corredor segregado, período de 10 a 14.30 (s/int)
 $EFRCS_{14.30a17}$: muda extra de FRC para corredor segregado de 14.30 a 17 hrs y 0 en otro caso (int/km)
 t_{16} : variación en demora potencial por coordinación para el corredor segregado de 14.30 a 17 hrs (s/int)
 $EFRCT_{6.10a21}$: muda extra de FRC para el tramo 6 de 10 a 21 hrs y 0 en otro caso (int/km)
 t_{13} : variación en la demora potencial por coordinación para el tramo 6 de 10 a 21 hrs (s/int)
 $EFRCT_{7.12a17}$: muda extra de FRC para el tramo 7 de 12 a 17 hrs y 0 en otro caso (int/km)
 t_{14} : variación en la demora potencial por coordinación para el tramo 7 de 12 a 17 hrs (s/int)
 $DET_{8a9.30}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 1 de 8 a 9.30 hrs y 0 en otro caso
 t_{17} : demora excedente tramo 1 de 8 a 9.30 hrs (s/km)
 $DET_{9.30a10.30}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 1 de 9.30 a 10.30 hrs y 0 en otro caso
 t_{18} : demora excedente del tramo 1 de 9.30 a 10.30 hrs (s/km)
 $DET_{10.30a12y13.30a14.30}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 1 de 10.30 a 12 y 13.30 a 14.30 hrs y 0 en otro caso
 t_{19} : demora excedente del tramo 1 de 16 a 18.30 hrs (s/km)
 $DET_{12.30a13.30}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 1 de 12.30 a 13.30 hrs y 0 en otro caso
 t_{20} : demora excedente del tramo 1 de 12 a 13.30 hrs (s/km)
 $DET_{16a17.30}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 1 de 16 a 17.30 hrs y 0 en otro caso
 t_{21} : demora excedente del tramo 1 de 16 a 17.30 hrs (s/km)
 $DET_{17.30a18.30y12a12.30}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 1 de 17.30 a 18.30 y 12 a 12.30 hrs y 0 en otro caso
 t_{22} : demora excedente del tramo 1 de 17.30 a 18.30 y 12 a 12.30 hrs (s/km)
 $DET_{2.7.30a8.30}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 2 en períodos de 07.30 a 08.30 hrs y 0 en otro caso

t_{23} : demora excedente del tramo 2 en períodos de 7.30 a 8.30 hrs (s/km)
 $DET_{6_{7.30a9}}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 6 en períodos de 7.30 a 9 hrs y 0 en otro caso
 t_{24} : demora excedente del tramo 6 en períodos de 7.30 a 9 hrs (s/km)
 $DET_{7_{7.30a8y8.30a9}}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 7 en períodos de 7.30 a 8 y 8.30 a 9 hrs y 0 en otro caso
 t_{25} : demora excedente del tramo 7 en períodos de 7.30 a 8 y 8.30 a 9 hrs (s/km)
 $DET_{7_{8a8.30}}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 7 de 8 a 8.30 hrs y 0 en otro caso
 t_{26} : demora excedente del tramo 7 de 8 a 8.30 hrs (s/km)
 $DET_{7_{9a10}}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 7 de 9 a 10 hrs y 0 en otro caso
 t_{27} : demora excedente del tramo 7 de 9 a 10 hrs (s/km)
 $DET_{7_{11.30a12y13a13.30}}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 7 de 11.30 a 12 y 13 a 13.30 hrs y 0 en otro caso
 t_{28} : demora excedente del tramo 7 de 11.30 a 12 y 13 a 13.30 hrs (s/km)
 $DET_{7_{12a13.30}}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 7 de 12 a 13.30 y 0 en otro caso
 t_{29} : demora excedente del tramo 7 de 12 a 13.30 hrs (s/km)
 $DET_{7_{17a19}}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 7 de 17 a 19 hrs y 0 en otro caso
 t_{30} : demora excedente del tramo 7 de 17 a 19 hrs (s/km)
 $NMDP_{LTM}$: número medio de detenciones en tramos de tráfico mixto (det/bus-km)
 t_{31} : tiempo perdido por detención en tramos de tráfico mixto (s)
 $NMDP_{LCS}$: número medio de detenciones en tramos de corredor segregado (det/bus-km)
 t_{32} : tiempo perdido por detención en tramos de corredor segregado (s)
 MPT_L : número medio de subidas y bajadas (pax/bus-km)
 t_{33} : tiempo medio por pasajero transferido (s/pax)

A.3. Modelo 7 tramos, prueba de variables no significativas en primera instancia

A continuación se muestra el modelo final para los 7 tramos, incluyendo las variables que salieron no significativas en primera instancia ($DTM3$ y $DET_{67.30a9}$), comprobando que siguen siendo no significativas. Los resultados se observan en la siguiente tabla.

Tabla A.3: Modelos 7 tramos

Variable	Parámetro	Modelo 7 tramos + $DTM3$ + $DET_{67.30a9}$
-	c (s/km)	131,74 (6,78)
DCS	t_1 (s/km)	-52,39 (-2,56)
$DTM3$	t_2 (s/km)	1,21 (0,11)
$DFTM2_{18.30a21}$	t_3 (s/km)	-27,84 (-6,80)
$DFTM3_{19a21}$	t_4 (s/km)	-37,03 (-3,94)
$DFT6_{17a19}$	t_5 (s/km)	-15,80 (-1,54)
$DUVD_{T1}$	t_6	0,835 (2,10)
$DUVD_{T2}$	t_7	0,657 (2,35)
$DUVD_{CS}$	t_8	0,481 (5,32)
$DUVD_{T6}$	t_9	0,488 (1,80)
$DUVD_{T7}$	t_{10}	0,928 (4,93)
FRC	t_{11} (s/int)	-9,21 (-3,45)
$EFRCT2_{7.30a18.30}$	t_{12} (s/int)	-8,62 (-2,57)
$EFRCCS_{10a14.30}$	t_{15} (s/int)	-3,95 (-3,25)
$EFRCCS_{14.30a17}$	t_{16} (s/int)	4,87 (2,76)
$DET1_{8a9.30}$	t_{17} (s/km)	55,86 (12,87)
$DET1_{9.30a10.30}$	t_{18} (s/km)	33,14 (6,93)
$DET1_{10.30a11.30y13.30a14}$	t_{19} (s/km)	8,25 (2,15)
$DET1_{12a13.30}$	t_{20} (s/km)	22,69 (4,68)
$DET1_{16a17.30}$	t_{21} (s/km)	35,48 (8,33)
$DET1_{17.30a18.30y12a12.30}$	t_{22} (s/km)	45,22 (10,25)
$DET2_{7.30a8.30}$	t_{23} (s/km)	38,92 (7,77)
$DET6_{7.30a9}$	t_{24} (s/km)	2,03 (0,35)
$DET7_{7.30a8y8.30a9}$	t_{25} (s/km)	104,85 (12,37)
$DET7_{8a8.30}$	t_{26} (s/km)	129,49 (12,33)
$DET7_{9a10}$	t_{27} (s/km)	19,40 (2,53)
$DET7_{11.30a12y13a13.30}$	t_{28} (s/km)	9,60 (2,02)
$DET7_{12a13.30}$	t_{29} (s/km)	43,00 (10,24)
$DET7_{17a19}$	t_{30} (s/km)	14,70 (1,59)
$NMDP_{LTM}$	t_{31} (s/det)	12,75 (2,52)
$NMDP_{LCS}$	t_{32} (s/det)	16,69 (4,62)
MPT_L	t_{33} (s/pax)	1,32 (1,85)
R-cuadrado ajustado (R^2)		0,934

Donde:

$DTM3$: muda que vale 1 para tramos de tráfico mixto de 3 pistas

t_2 : diferencia de tiempo debido a tráfico mixto de 3 pistas (tramos 6 y 7) (s/km)

$DET_{6,7,30a9}$: muda de congestión que vale 1 para el tramo 6 en períodos de 7.30 a 9 hrs y 0 en otro caso

t_{24} : demora excedente del tramo 6 en períodos de 7.30 a 9 hrs (s/km)

A.4. Test de significancia conjunta de variables

Para comprobar la significancia conjunta de variables se realiza un *test F*. Este se basa en la comparación de R^2 de dos modelos: el modelo completo y el modelo restringido, donde se dejan fuera las variables a las cuales se les quiere probar su significancia conjunta. Se construye el indicador λ que distribuye $F_{q,N-k}$ que se presenta en la ecuación A.1 y se rechaza la hipótesis nula H_0 si el valor de λ es mayor que un cierto valor de $F_{q,N-k}(\alpha)$, donde α es la significancia escogida. Se utiliza 99 %.

$$\lambda = \frac{(R^2 - R_R^2)/q}{(1 - R^2)/(N - k)} \quad (\text{A.1})$$

Donde: λ : estadístico que distribuye $F_{q,N-k}$

R^2 : ajuste del modelo completo

R_R^2 : ajuste del modelo restringido

q : número de coeficientes restringidos

N : número de observaciones

k : número de coeficientes no restringidos

La prueba de significancia conjunta se realiza para comprobar que las variables mudas de congestión no son las que están explicando toda la variabilidad de la variable dependiente. En este caso, el modelo restringido corresponde a un modelo que incluye sólo las variables mudas de congestión, para comprobar que las variables de prioridad, semáforos y paraderos si explican el fenómeno. Los resultados se presentan en la tabla A.4. Se comprueba la significancia conjunta demostrando que no son sólo las dummies de congestión las que explican la varianza.

Tabla A.4: Test F para modelos restringidos

Parámetros	Valores
R^2	0,937
R_R^2	0,601
q	16
N	926
k	29
λ	299,0
$F_{q,N-k}$	1,75