



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

**ANÁLISIS DE TIEMPOS DE VIAJE DE AUTOMÓVILES Y BUSES BAJO DISTINTOS
ESQUEMAS DE PRIORIDAD A PARTIR DE DATOS MASIVOS**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,
MENCIÓN TRANSPORTE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MATÍAS IGNACIO BOCHE MONTECINOS

PROFESOR GUÍA:

ALEJANDRO TIRACHINI HERNÁNDEZ

PROFESOR CO-GUÍA:

JAIME GIBSON ALDUNATE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ANTONIO GSCHWENDER KRAUSE

VIVIANA MUÑOZ DÍAZ

SANTIAGO DE CHILE

2022

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE: Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Transporte y Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil.

POR: Matías Ignacio Boche Montecinos

FECHA: 2022

PROFESOR GUÍA: Alejandro Tirachini Hernández

PROFESOR CO-GUÍA: Jaime Gibson Aldunate

ANÁLISIS DE TIEMPOS DE VIAJE DE AUTOMÓVILES Y BUSES BAJO DISTINTOS ESQUEMAS DE PRIORIDAD A PARTIR DE DATOS MASIVOS

Se realiza un análisis comparativo de los tiempos de viaje de automóviles y buses a partir de distintas fuentes de datos.

La red de estudio se ubica en la comuna de Ñuñoa, en la ciudad de Santiago, Chile, y está compuesta por 54 tramos pertenecientes a 10 ejes que se rigen bajo una diversidad de esquemas de gestión de tránsito. En ellos, se promedian los tiempos de viaje de automóviles y buses en intervalos de 15 minutos, entre las 6.30 y las 22.00 hrs.

Esta tesis aborda una serie de interrogantes y fenómenos que podrán ser explicados de manera inédita, puesto que es primera vez que se cuenta con datos pasivos de alta resolución de buses y automóviles para una investigación de esta índole.

En primer lugar, se analiza la validez de los datos de automóviles a partir de un análisis comparativo con los datos de buses, lo cual permite identificar tendencias en los tiempos de viaje y singularidades a partir de las discontinuidades de las mismas. Son, precisamente, estas singularidades que delatan situaciones irregulares las que se busca detectar a partir de herramientas sistemáticas, con el objeto de generar soluciones de ingeniería de transporte. En este sentido, se generó un instrumento para analizar el estado de las intersecciones de la red en base a la comparación de sus accesos, lo cual permitirá contar con nueva información para realizar diagnósticos, ejecutar medidas de gestión de tráfico y monitorear su evolución, entre otros.

A partir de las tendencias, se determinan y caracterizan tres niveles de congestión: el Nivel 1, correspondiente a la ausencia de congestión aparente, el Nivel 3, que presenta congestión significativa y el Nivel 2, que es un estado de transición intermedio. Se muestra estadísticamente que la congestión elimina la ventaja de los automóviles en tiempo de viaje respecto a los buses (más allá de las detenciones en paraderos).

Se modela la diferencia de tiempo de viaje neto entre modos en el Nivel 1, hallando parámetros razonables en su descomposición que van en la misma línea que los hallados por Schneider (2013) y Cubillos (2018), los antecedentes más próximos a este trabajo.

Finalmente, se determina que la implementación de un esquema de prioridad, como la pista solo bus, no asegura por sí sola que los buses mejoren su tiempo de viaje y su competitividad respecto de otros modos. El diseño y gestión de una pista solo bus debe considerar las condiciones locales y los factores externos, como la estructura de flujos.

AGRADECIMIENTOS

A Luz, Paula y Antonia, por no hacer preguntas incómodas y no cuestionar mis métodos, ni mis tiempos.

A mi padre, John.

A mi tía María por su apoyo incondicional.

A mi abuela, Olga, que me dio ánimo hasta el último de sus días.

A mis profesores Alejandro Tirachini y Jaime Gibson, por la dedicación mostrada durante estos dos años, la disposición a ayudar a superar obstáculos, su comprensión y apoyo para sacar este trabajo adelante.

A Antonio Gschwender y Viviana Muñoz, miembros de la comisión, por aceptar participar de esta investigación y darse el tiempo para aportar ideas para la tesis.

A Jacqueline Suárez por su gestión y amabilidad para atender mis consultas en el proceso de titulación.

A Matías Pizarro, Sebastián Donoso, Felipe Lizama y Javier Muñoz, Les Dines, por siempre estar.

A mi querido Transporteam, Diego Fuentealba, Gabriel Nova, Benjamín Ulloa, Matías Contreras y Jorge Méndez, por hacer más amena mi estadía en el departamento.

A mi increíble mejor amiga, Gabriela.

A mis amigos de la facultad, Benjamín Thedy, Daniel Salinas, Darío Teno, Alejandro Pizarro, Ricardo Cordero, Christian Soledispa, Luis Alvial, Ignacio Muñoz, Cristian "Ace" Acevedo, Mauricio Vilches, Álvaro Riquelme, Gustavo Araniz, Felipe Palma, Tomás Cabrera, Rodrigo Arnáiz, Paulina Julio, Mariana Matus, Montserrat Rodríguez, Antonio Montalva, Felipe Tapia, Adolfo "Fito" Obligado, Luckas Días y Ricardo Vargas.

A las niñas que escucharon mis descargos y quejas los últimos meses, Rubí, Javiera y Sofía.

A la Subsecretaría de Transportes, que suministró la base de datos empleada en esta Tesis y a Waze, que autorizó el uso de los datos para autos contenidos en la base.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Objetivos	2
1.1.1.	Objetivo General.....	2
1.1.2.	Objetivos Específicos	2
2.	MARCO TEÓRICO	4
2.1.	Modelación de Estimación de Congestión	4
2.2.	Modelación del tiempo de viaje en el transporte público	6
2.2.1.	Efectos de los esquemas de prioridad en buses	7
2.2.2.	Metodología base para cálculo de tiempos medios de viaje.....	7
3.	RED DE ESTUDIO Y BASES DE DATOS.....	10
3.1.	Variable de estudio.....	10
3.2.	Datos de buses del transporte público.	11
3.3.	Datos de automóviles.....	12
3.4.	Red de estudio	13
3.4.2.	Definición de ejes y tramos de la red.....	14
4.	ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE DATOS DE AUTOMÓVILES	19
4.1.	Metodología	19
4.2.	Análisis de consistencia.	20
4.3.	Caracterización de tiempos de viaje neto de automóviles y buses.	21
4.3.1.	Tramos sin paradero (SP).	21
4.3.2.	Tramos de tráfico mixto: tiempo de viaje de buses en tramos con y sin paradero.	31
4.3.3.	Tramos con paradero (CP).	37
4.3.4.	Tramos influidos por paraderos (IP).	41
4.3.5.	Síntesis.....	44
5.	UNA HERRAMIENTA DE DIAGNÓSTICO.....	45
5.1.	Singularidades.	45
5.2.	Análisis de intersecciones de la red	48
6.	COMPARACIÓN DE TIEMPOS DE VIAJE POR MODO.....	57
6.1.	Marco de Análisis.....	57

6.2.	Caracterización de la diferencia de tiempo de viaje neto en los distintos Niveles de Congestión.....	59
6.2.1.	Depuración de la base de datos.....	60
6.2.2.	Caracterización de niveles de congestión	61
6.2.3.	Síntesis.....	69
6.2.4.	Análisis de la diferencia del tiempo de viaje neto de buses y autos	70
6.3.	Modelación.....	72
6.3.1.	Modelación del Nivel 1.....	72
6.3.2.	Modelación del Nivel 2.....	74
6.4.	Comparación global	75
7.	ESQUEMAS DE PRIORIDAD.....	78
7.1	Análisis comparativo de la pista solo bus.....	78
7.1.1.	Tiempo de viaje neto de los buses	78
7.1.2.	Diferencia de tiempo de viaje neto de buses y autos.....	82
7.2.	Esquema de Irrarázaval	86
7.3.	Modelación.....	87
7.4.	Síntesis	89
8.	CONCLUSIONES.....	90
8.1.	Síntesis	92
8.2.	Limitaciones y recomendaciones de trabajo futuro	93
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	95

ÍNDICE DE TABLAS

Cuadro N°3-1	Tramos pertenecientes a la red.....	15
Cuadro N°4-1	Detalle de proceso de depuración de base de datos – Etapa 1.....	20
Cuadro N°4-2	Comparación estadística de tiempos de viaje neto en tramos sin paradero entre automóviles y buses.	31
Cuadro N°4-3	Comparación estadística de tiempos de viaje neto en tramos con paradero entre automóviles y buses.	41
Cuadro N°5-1	Detalle de proceso de depuración de base de datos – Etapa 2.....	45
Cuadro N°5-2	Caracterización de singularidades en la red de estudio.	46
Cuadro N°5-3	Criterios de identificación de candidatos a singularidades.	48
Cuadro N°5-4	Clasificación de intersección J. D. Cañas / Los 3 Antonios en día laboral.....	51
Cuadro N°6-1	Detalle de proceso de depuración de base de datos – Etapa 3.....	61
Cuadro N°6-2	Distribución de los tramo-períodos.....	61
Cuadro N°6-3	Caracterización de niveles de congestión.....	63
Cuadro N°6-4	Tiempo de viaje neto por modo y su diferencia (s/km).....	64
Cuadro N°6-5	Magnitudes características de DifTVN según niveles de congestión.....	71
Cuadro N°6-6	Modelo de diferencia de tiempo de viaje neto para el Nivel 1.....	73
Cuadro N°6-7	Descomposición de DifTVN en el Nivel 1.....	74
Cuadro N°6-8	Modelo de diferencia de tiempo de viaje neto conjunto para Niveles 1 y 2.....	75
Cuadro N°6-9	Diferencia del tiempo de viaje total de buses y automóviles.....	76
Cuadro N°7-1	Resumen comparación de tiempo de viaje neto de buses en ejes con pista solo bus y tráfico mixto en fin de semana.....	80
Cuadro N°7-2	Resumen comparación de TVB neto en ejes con pista solo bus y tráfico mixto en día laboral.....	82
Cuadro N°7-3	Resumen comparación de DifTVN en ejes con pista solo bus y tráfico mixto en fin de semana.....	84
Cuadro N°7-4	Resumen comparación de DifTVN en ejes con pista solo bus y tráfico mixto en día laboral.....	85
Cuadro N°7-5	Magnitudes características Irarrázaval O-P.....	87
Cuadro N°7-6	Modelo de diferencia de tiempo de viaje neto con PSB para los Niveles 1 y 2.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°2-1	Proyección de pulsos GPS sobre las rutas. Fuente: Cortés et al. (2011).....	8
Figura N°2-2	Grilla espacio-temporal de rutas. Fuente: Cortés et al. (2011).....	9
Figura N°3-1	Diagrama tipo caja-bigote de velocidades de buses en la red.	12
Figura N°3-2	Histograma de velocidades de automóviles en la red.	13
Figura N°3-3	Mapa de la red de estudio. Ñuñoa, Santiago de Chile.	14
Figura N°4-1	Tiempos de viaje promedio de automóviles y buses en tramos sin paradero registrados en día laboral (NT-6).	22
Figura N°4-2	Tiempos de viaje promedio de automóviles y buses en el tramo Alessandri SN – 5 registrados en día laboral (NT-1).	24
Figura N°4-3	Tiempos de viaje promedio de automóviles y buses en el tramo Campo de Deportes SN – 3 registrados en día laboral (NT-1).	25
Figura N°4-4	Tiempos de viaje promedio de automóviles y buses en tramo Irarrázaval PO – 4 en día laboral (NT-1).	26
Figura N°4-5	Irarrázaval esquina Ricardo Lyon. 19.01.2021, 19.04 hrs.	27
Figura N°4-6	Irarrázaval esquina Ricardo Lyon. 19.01.2021, 19.05 hrs.	27
Figura N°4-7	Tiempos de viaje promedio de automóviles y buses en tramos SP (sin singularidades) registrados en día laboral (NT-6).	28
Figura N°4-8	Tiempos de viaje promedio de automóviles y buses en tramos sin paradero registrados en sábados, domingos y festivos (NT-6).	29
Figura N°4-9	Tiempos de viaje promedio de automóviles y buses en tramos SP (sin singularidades) registrados en día de fin de semana (NT-6).....	30
Figura N°4-10	Tiempo de viaje promedio de buses en tramos CP y SP registrados en día de fin de semana (NTCP-10, NTSP-5).	34
Figura N°4-11	Tiempo de viaje promedio de buses en tramos CP y SP registrados en día laboral (NTCP-10, NTSP-5).....	35
Figura N°4-12	Tiempo de viaje promedio de buses en tramos CP y SP registrados en día laboral excluyendo eje Irarrázaval PO (NTCP-8, NTSP-4).....	36
Figura N°4-13	Tiempos de viaje neto promedio de automóviles y buses en tramos con paradero registrados en día laboral (NT-36).	37
Figura N°4-14	Tiempos de viaje neto promedio de automóviles y buses en Alessandri SN – 4 registrados en día laboral.....	38

Figura N°4-15	Tiempos de viaje neto promedio de automóviles y buses en tramos CP (sin singularidades) registrados en día laboral (NT-36).....	39
Figura N°4-16	Tiempos de viaje neto promedio de automóviles y buses en tramos con paradero registrados en sábados, domingos y festivos (NT-36).	40
Figura N°4-17	Tiempos de viaje promedio de automóviles y buses en tramos con influencia de paradero registrados en día laboral (NT-2).	42
Figura N°4-18	Tiempos de viaje promedio de automóviles y buses en tramos con influencia de paradero registrados en sábados, domingos y festivos (NT-2).	43
Figura N°5-1	Niveles de congestión en automóviles en intersección José Domingo Cañas esquina Los 3 Antonios.....	50
Figura N°5-2	Grado de congestión en eje Pedro de Valdivia, según automóviles, en día laboral.....	52
Figura N°5-3	Grado de congestión en eje Pedro de Valdivia, según buses, en día laboral.....	53
Figura N°5-4	Grado de congestión en Pedro de Valdivia esquina Irrarázaval en día laboral.....	53
Figura N°5-5	Grado de congestión en Pedro de Valdivia esquina Dublé Almeyda en día laboral.....	54
Figura N°5-6	Grado de congestión en Pedro de Valdivia esquina José Domingo Cañas en día laboral.	54
Figura N°5-7	Grado de congestión en Pedro de Valdivia esquina Castillo Velasco en día laboral.....	55
Figura N°6-1	Tiempo de viaje de automóviles vs tiempo de viaje neto de buses en la red.....	57
Figura N°6-2	Histograma de tiempos de viaje de automóviles.	58
Figura N°6-3	Diferencia de tiempo de viaje neto en función del tiempo de viaje total de automóviles, para tiempo de viaje de autos (TVA) mayor a 240 s/km.....	59
Figura N°6-4	Porcentaje de tramos en cada nivel por período en día laboral	62
Figura N°6-5	Diferencia de tiempo de viaje neto entre automóviles y buses y representación de tramos en Nivel 1 en días laborales.....	65
Figura N°6-6	Diferencia de tiempo de viaje neto entre automóviles y buses y representación de tramos en Nivel 1 en días de fin de semana.....	65
Figura N°6-7	Diferencia de tiempo de viaje neto entre automóviles y buses y proporción de tramos en Nivel 2 en días laborales.	67
Figura N°6-8	Diferencia de tiempo de viaje neto entre automóviles y buses y proporción de tramos en Nivel 2 en días de fin de semana.	67

Figura N°6-9	Diferencia de tiempo de viaje neto entre automóviles y buses y proporción de tramos en Nivel 3 en días laborales.	69
Figura N°7-1	Comparación de TVB neto en ejes de Alessandri NS y Pedro de Valdivia NS en día de fin de semana.	79
Figura N°7-2	Comparación de TVB neto en ejes de Alessandri SN y Pedro de Valdivia SN en día de fin de semana.	79
Figura N°7-3	Comparación de TVB neto en ejes de Alessandri NS y Pedro de Valdivia NS en día laboral.	81
Figura N°7-4	Comparación de TVB neto en ejes de Alessandri SN y Pedro de Valdivia SN en día laboral.	81
Figura N°7-5	Comparación de DifTVN en ejes Alessandri NS y Pedro de Valdivia NS en día de fin de semana.	83
Figura N°7-6	Comparación de DifTVN en ejes Alessandri SN y Pedro de Valdivia SN en día de fin de semana.	83
Figura N°7-7	Comparación de DifTVN en ejes Alessandri NS y Pedro de Valdivia NS en día de laboral.	84
Figura N°7-8	Comparación de DifTVN en ejes Alessandri SN y Pedro de Valdivia SN en día laboral.	85
Figura N°7-9	Tiempo de viaje neto de buses y diferencia de tiempo de viaje neto en Irarrázaval OP, día laboral.	86

1. INTRODUCCIÓN

El tiempo de viaje es la variable que mejor describe las condiciones de circulación en una red urbana. Si bien es directamente observable, tiene una alta variabilidad en el espacio-tiempo, lo que dificulta considerablemente su medición.

Caracterizar las condiciones de circulación del flujo vehicular ha sido históricamente un gran desafío para la comunidad científica, debido a la escasez de datos para poner a prueba modelos y teorías al respecto. Dicha barrera se está diluyendo gracias al surgimiento de nuevas tecnologías, permitiendo en la actualidad contar con dispositivos capaces de localizar geográficamente a los vehículos en todo momento y disponer de grandes bases de datos para almacenar los registros asociados a ellos.

A principios del siglo, Porikli y Li (2004) utilizan una técnica basada en el monitoreo de tráfico a través de cámaras de video, una tecnología ampliamente utilizada en la época para controlar el tráfico vehicular. Posteriormente, comienza a cobrar popularidad e importancia la utilización de datos GPS de automóviles como fuente de información. En este contexto, uno de los primeros acercamientos al uso de datos GPS fue impulsado por Pattara-atikom et al. (2006), quienes emplearon un dispositivo GPS asociado a un vehículo para medir los pulsos y a partir de ello obtener las velocidades instantáneas, las que se utilizaron como fuente única para describir el estado del tráfico. En esta misma línea, Sananmongkhonchai et al. (2008) propone incorporar al algoritmo perfiles de velocidades históricos con datos en tiempo real. Más adelante, Diker y Nasibov (2012), Shankar et al. (2011) y Kong et al. (2015) desarrollan modelos basados en técnicas fuzzy, que son comúnmente utilizadas en problemas donde hay incertidumbre debido a situaciones que dependen de sentimientos humanos o experticia, como es el caso de la estimación de niveles de tráfico. Yang et al. (2017) incorpora por primera vez registros históricos y la influencia del entorno a la estimación de tráfico en secciones urbanas de gran escala.

Hoy en día, numerosos conductores de automóviles utilizan aplicaciones móviles de navegación asistida por GPS para desplazarse entre dos puntos, siguiendo la ruta sugerida por la aplicación. Gracias a la gran cantidad de usuarios que emplean este tipo de herramientas a diario, es que aplicaciones como Waze son capaces de estimar el tiempo de viaje entre cualquier par de puntos de una red a partir de datos GPS, para cualquier período del día y en tiempo real.

Por otro lado, los buses del transporte público de Santiago están equipados con dispositivos GPS con el objeto de monitorear su posición, ya sea en tiempo real o en archivos de información histórica. Estos datos han sido utilizados para un gran número de análisis, tanto para el monitoreo del cumplimiento de contratos por parte de la autoridad, como en estudios científicos, destacando en este ámbito modelaciones de apaltonamiento de buses (Arriagada et al., 2019), estudios sobre la heterogeneidad de

la estrategia de elección de rutas (Arriagada et al., 2020), políticas públicas y planificación en transporte público (Gschwender et al., 2016) y construcción de matrices origen-destino (Devilleine et al., 2013), entre otras aplicaciones. Para estos propósitos, se ha validado una metodología para la obtención de tiempos de viaje en toda la red a partir de pulsos GPS (Cortés et al., 2011).

En este contexto, se dispone de una base de datos de tiempos de viaje con alta resolución espacio-temporal, correspondiente a una red acotada en la comuna de Ñuñoa, registrados durante 4 semanas durante marzo y abril de 2019. Los datos de buses y automóviles provienen de un informe a SECTRA (Gibson, 2019).

En esta red hay vías de distinto tipo y una variedad de esquemas de gestión de tránsito, incluyendo medidas de prioridad para los buses, como ejes de pista solo bus, con pistas reversibles y de tráfico mixto. Contar con una detallada descripción del tiempo de viaje tanto de los buses como de los automóviles hace posible examinar de qué manera fenómenos como la congestión afectan a unos y otros y en qué medida el tipo de infraestructura y su forma de gestión inciden en la diferencia en el tiempo de viaje de ambos modos.

Dado que es primera vez que se cuenta en Chile con datos masivos, tanto de buses como de automóviles en la misma red al mismo tiempo, para un estudio de estas características, será un avance relevante sentar las bases para la creación de herramientas que permitan identificar, y en lo posible cuantificar, de manera robusta las diferencias que existen en la circulación vehicular de buses y automóviles y así implementar mejoras significativas sobre el tiempo de viaje que experimentan los usuarios, especialmente los del transporte público.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GENERAL

El principal objetivo de esta tesis es realizar una descripción exhaustiva y un análisis comparativo de los tiempos de viaje de automóviles y buses en una red que permita entender cuáles son las condiciones de circulación de los vehículos que inciden en mayor medida en el tiempo de viaje de los buses, para poder implementar medidas que mitiguen los efectos adversos y mejoren el nivel de servicio del transporte público.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como se explica a continuación, son objetivos específicos relevantes:

- I) Determinar la consistencia de datos de tiempos de viaje entre las dos bases de datos a disposición: automóviles y buses.

- II) Identificar los fenómenos que caracterizan la variación de la circulación vehicular y cuantificar la incidencia de éstos sobre los tiempos de viaje de automóviles y buses.

2. MARCO TEÓRICO

El estudio y comprensión del fenómeno de la congestión vehicular ha despertado gran interés en el mundo científico durante las últimas décadas, motivando un notable crecimiento en el número de artículos relacionados a este tópico. La disponibilidad de datos masivos ha dado paso a sofisticados modelos de estimación de congestión vehicular, cuyos alcances podrían materializarse a través de la implementación de políticas públicas y, de este modo, traducirse en mejoras significativas sobre el tiempo de viaje que experimentan los usuarios tanto del transporte público como del transporte privado. En esta sección se presentan distintos enfoques de estimación de congestión vehicular, concentrándose la primera parte en los algoritmos y técnicas empleados para la modelación. Posteriormente, se abordarán modelos de evaluación de esquemas de prioridad en transporte público, basados en el tiempo de viaje que experimentan los buses en tramos determinados bajo condiciones dadas.

2.1. MODELACIÓN DE ESTIMACIÓN DE CONGESTIÓN

Cómo estimar la congestión vehicular de manera eficiente y precisa ha sido objeto de controversia en el ámbito científico durante los últimos años, debido a que en la actualidad no es posible describir el fenómeno de manera estandarizada: la interpretación de los modelos presenta un grado de ambigüedad considerable al ser un resultado de la percepción del ojo humano y de criterios individuales que no permiten, de momento, establecer una perspectiva uniforme al respecto. Qué atributos y variables se deben considerar para la modelación es una de las interrogantes fundamentales que los autores han debido resolver para generar modelos robustos, eficientes y precisos, a pesar de contar con información limitada para ello. Porikli y Li (2004) utilizan una técnica basada en un método ampliamente utilizado como es el monitoreo de tráfico a través de cámaras de video, con la salvedad que en lugar de basar su modelo en *vehicle tracking*, proponen caracterizar a los carriles de las vías de manera separada y construir un modelo a partir de aquello, basado en un modelo oculto de Markov (HMM). El modelo se desarrolla a partir de la extracción de vectores, que indican la velocidad y densidad del tráfico, a partir de las imágenes captadas por la cámara de video, para que posteriormente el modelo sea entrenado y a partir de una estimación máxima verosimilitud se clasifique el estado del tráfico dentro de los patrones de tráfico establecidos por los autores. Este sistema resultó ser más sensible que un operador humano, capturando variaciones repentinas del tráfico con una precisión del 94 %. Sus ventajas radican en una baja complejidad computacional, resultados que no dependen de la configuración de la cámara y un sistema que funciona bajo cualquier condición de luminosidad.

Posteriormente, comienza a cobrar popularidad e importancia la utilización de datos GPS de automóviles como fuente de información. Pattara-atikom, Pongpaibool, y

Thajchayapong (2006) emplearon un dispositivo GPS asociado a un vehículo para medir los pulsos y a partir de ello obtener las velocidades instantáneas, las que luego de ser procesadas se utilizaron como fuente única para describir el estado del tráfico. En esta misma línea, Sananmongkhonchai, Tangamchit, y Pongpaibool (2008) propone un algoritmo que pondera perfiles de velocidades históricos con datos en tiempo real. Este algoritmo es comparado con el cálculo de velocidades a partir de la distancia dada por latitud y longitud y el intervalo de tiempo de las mediciones, con lo cual se determina el error asociado a estas últimas. Este modelo resulta ser más preciso que aquellos modelos que simplemente ponderan velocidades en tramos de una vía, como el de Pattara-atikom et al. (2006).

Diker y Nasibov (2012) proponen un enfoque más sofisticado para estimar la congestión, basado en un algoritmo que combina el método DBSCAN (*Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise*), que es un algoritmo de agrupamiento de datos basado en densidad; y métodos del estilo FJP (*Fuzzy Joint Points*), que se basan en la técnica *fuzzyneighborhood cardinality* para determinar los puntos centrales de los clusters a generarse. Los modelos fuzzy son ampliamente utilizados en situaciones donde hay incertidumbre debido a problemas que dependen de sentimientos humanos o experiencia, por lo que es ideal para modelar congestión, ya que todos tenemos percepciones distintas para una misma situación. Estos sistemas constan de 2 partes: en primer lugar, funciones membership de clasificación de entrada y salida, que representan el nivel de pertenencia a una serie de conjuntos definidos de manera difusa y cuyos rangos se definen manualmente de acuerdo a la lógica; y reglas fuzzy definidas por el modelador, que obedecen a restricciones propias del contexto del problema. El método FN-DBSCAN integra la ventaja de velocidad del DBSCAN y la robustez del FJP. Este modelo considera como inputs la distancia recorrida y velocidad obtenidas a partir de datos GPS, y entrega como resultado una correcta categorización y segmentación de estados del tráfico, pero el área de estudio no presenta semáforos, quedando propuesta su incorporación en la modelación a futuro, al igual que el uso de perfiles de velocidad históricos.

Siguiendo la línea de los modelos basados en técnicas fuzzy, Shankar, Raju, y Rao (2011) presentaron un modelo de congestión de tráfico multicriterio, incorporando como inputs la velocidad media y la densidad por intervalo de tiempo. Propone de manera novedosa un modelo que integra redes neuronales y lógica difusa (*fuzzy logic*) para evitar realizar ajustes iterativos manuales para determinar las funciones *membership* requeridas para obtener el estado asociado a un nivel de congestión del tráfico. Los autores determinaron que el modelo capturaba la experiencia humana mejor que aquel que requiere de ajustes manuales de los inputs requeridos por las funciones *membership*, pero no se obtuvieron resultados concluyentes respecto a la conveniencia de utilizar intervalos más grandes para mejorar la precisión del modelo. Si bien los sistemas propuestos resultan ser precisos y con un bajo margen de error, dependen en demasía del modo en el que se definan las reglas y los rangos de las funciones *membership*.

Kong et al. (2015), motivados por estimar la congestión en áreas urbanas a gran escala y mejorar la precisión, instantaneidad y estabilidad de la estimación y predicción de la congestión, elaboran un modelo usando un método basado en el mapeo de la trayectoria de vehículos en circulación (mediante GPS) y herramientas de lógica difusa, bajo un método denominado Fuzzy Comprehensive Evaluation (FCE), el cual se ajusta dinámicamente acorde a los flujos vehiculares. El modelo tiene un buen desempeño, pero la instantaneidad de la estimación queda al debe dado que hay un retraso entre los resultados y la realidad. Para manipular de forma exitosa y eficiente una gran base de datos y estimar eficiente y precisamente el nivel de congestión en secciones urbanas de gran escala, Yang et al. (2017) proponen un modelo de estimación de congestión de tráfico utilizando múltiples propiedades espacio-temporales, tales como la velocidad promedio, la densidad del tráfico, la afluencia en una sección de vía, definido como la tasa de cambio en la congestión y la influencia del entorno, y el estado de congestión previo de una sección, que considera registros históricos y patrones de congestión. Tanto la afluencia como el estado previo se incorporan por primera vez a un modelo de estas características. Estas variables se ponderan dinámicamente en sintonía con el espacio y tiempo, aumentando la precisión y eficiencia en la estimación. Al igual que algunos de los artículos citados previamente, este estudio presenta un modelo que tiene un desfase respecto de la realidad, pero mejora en situaciones donde la calidad de la información no es la deseada y en ocasiones presenta lagunas.

2.2. MODELACIÓN DEL TIEMPO DE VIAJE EN EL TRANSPORTE PÚBLICO

La modelación del tiempo de viaje de buses en el transporte público es altamente útil para entender la influencia de los factores que afectan en el tiempo de viaje total. En este aspecto, Bertini et al. (2004), desarrollaron un modelo con datos de GPS de buses en Portland, Oregon, registrados durante un día; desagregando el tiempo de viaje con componentes asociadas al tiempo que el bus estuvo en movimiento, al tiempo en que estuvo detenido y al número de pasajeros subiendo y bajando del bus. Los modelos se conformaron mediante regresiones lineales, teniendo como resultados más importantes en términos cuantitativos el tiempo promedio de detención en paradas y los tiempos de subidas y bajadas por pasajero; dejando como desafío futuro el testeo del modelo con más datos.

Más adelante, y con el objetivo de determinar la confiabilidad de los tiempos de viaje de buses, Ma et al. (2015) desarrollaron modelos lineales utilizando datos de tarjetas inteligentes e información de detenciones de buses en paradas, incorporando entre las variables explicativas una componente de congestión recurrente y parámetros para el tipo de vía, las condiciones climatológicas y el número de señales, entre otros. Los modelos multivariados consideran que existe una componente de tiempo de viaje promedio, un tiempo de holgura (*buffer time*) y un coeficiente de variación del tiempo de viaje. Los

modelos resultantes contribuyen a saber qué parámetros se deben intervenir al momento de realizar la planificación del transporte público de manera focalizada y eficiente.

Recientemente, Ranjiktar et al. (2019) desarrollaron una serie de modelos de distinta complejidad en una red de Auckland buscando predecir el tiempo de llegada de buses, incluyendo series de tiempo, regresiones lineales multivariadas y árboles de decisión, siendo el modelo de series de tiempo basado en redes neuronales artificiales el de mejor desempeño. Además, se determinó que en los modelos de regresiones lineales la variable explicativa con mayor significancia resultó ser la distancia entre paradas de buses, seguida por la variabilidad de la programación y la finalización de ruta; mientras que el tiempo perdido en detenciones arrojó no ser para nada relevante.

2.2.1. EFECTOS DE LOS ESQUEMAS DE PRIORIDAD EN BUSES

En la línea del análisis de los factores que inciden directamente sobre la velocidad comercial del transporte público, definida como la velocidad promedio de los buses en un tramo incluyendo detenciones operacionales, Schneider (2013) desarrolló modelos lineales de tiempo de viaje de buses de transporte público, determinando qué esquemas de prioridad resultan ser más beneficiosos para los usuarios usando datos de ejes característicos de la ciudad de Santiago, logrando cuantificar dichos beneficios. Para ello, empleó como inputs las detenciones en paraderos, la demora en intersecciones, la transferencia de pasajeros en paradas, el tipo de prioridad al transporte público y aspectos de infraestructura vial como el ancho de vía.

En esta misma línea, Cubillos (2018) desarrolla un modelo para evaluar infraestructura prioritaria usando datos de una red que cuenta con distintos esquemas de prioridad, con la novedad de que propone una nueva forma de modelar la demora en intersecciones en función de la densidad de éstas. Desarrolla un nuevo mecanismo de detección de incidentes a partir de la comparación temporal de observaciones y determina el efecto de las variables que condicionan la operación de los buses bajo distintos esquemas de prioridad, logrando cuantificar el tiempo de cruce de los buses en cada régimen y el comportamiento de la demora en intersecciones y la demora en paraderos en torno a los tiempos de viaje.

Los trabajos de Cubillos (2018) y Schneider (2013) configuran los antecedentes previos de esta tesis, que busca extender esta línea investigativa con nuevas contribuciones.

2.2.2. METODOLOGÍA BASE PARA CÁLCULO DE TIEMPOS MEDIOS DE VIAJE

Cortés et al. (2011) generan una metodología para estimar la velocidad comercial de los buses a partir de datos GPS. El análisis es útil desde una perspectiva global, a nivel de ruta o tramo de vía, y el desarrollo de esta herramienta es útil para tomadores de

decisiones en relación a gestión de tráfico, tarificación, optimización de semáforos, infraestructura vial, etc.

El procedimiento se subdivide en dos etapas: rectificación de rutas y luego proyección de pulsos GPS sobre dichas rutas (Figura 2-1). Así, se está en condiciones de calcular tiempos y distancias.

Para seguir el avance de las rutas se adopta otro enfoque, esta vez utilizando una grilla espacio-temporal. En la Figura 2-2, los puntos corresponden a las trayectorias de los buses. Para calcular la velocidad promedio de un bus en una ruta-período, se toma la suma de todas las distancias y se divide por la suma de todos los tiempos que caen en una determinada cuadrícula.

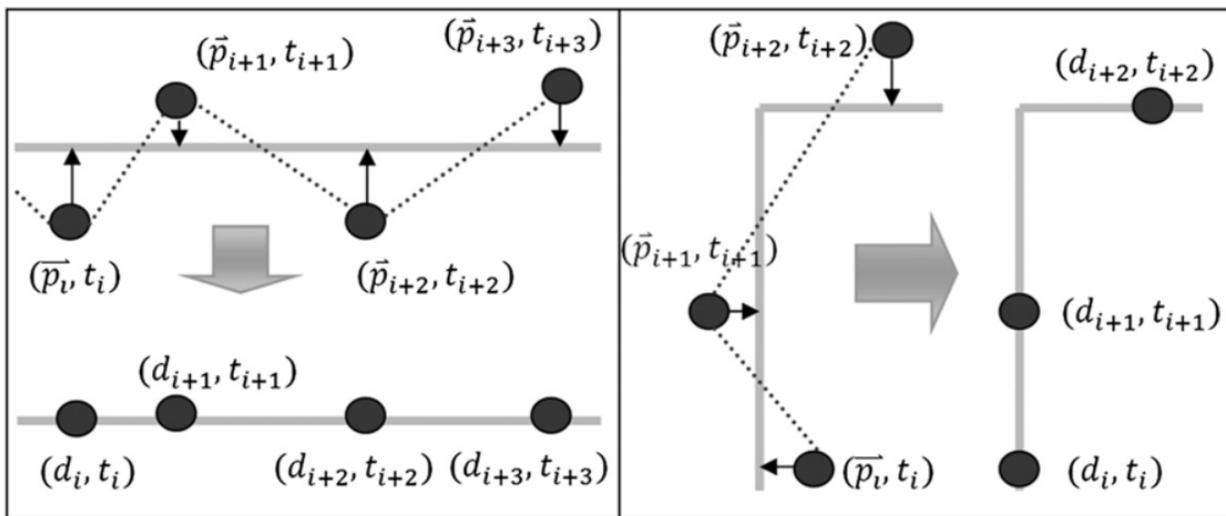


Figura N°2-1 Proyección de pulsos GPS sobre las rutas.
Fuente: Cortés et al. (2011).

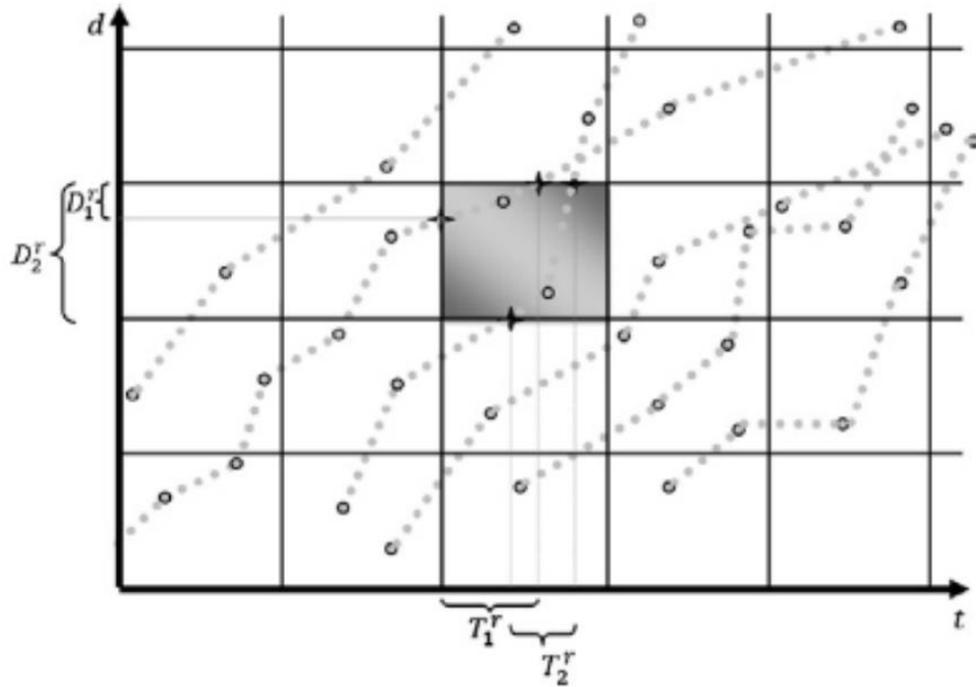


Figura N°2-2 Grilla espacio-temporal de rutas.

Fuente: Cortés et al. (2011).

Para completar el diagnóstico se propone un índice que toma como referencia una velocidad mínima deseable para realizar la comparación y determinar el nivel de servicio.

Este método es particularmente relevante para esta investigación, puesto que permite contrastar datos de rutas para un mismo periodo o una misma ruta para periodos distintos, posibilitando así el análisis de las tendencias de los tiempos de viaje a través de un día o de varios días para un período determinado.

3. RED DE ESTUDIO Y BASES DE DATOS

En el presente capítulo se aborda la caracterización de la red de estudio, poniendo especial énfasis en sus cualidades operativas y estructurales; y las bases de datos empleadas, desde su conformación hasta su validación para el caso de interés.

3.1. VARIABLE DE ESTUDIO

La variable de estudio de esta investigación, tanto para buses como automóviles, corresponde al tiempo de viaje en un tramo medido en s/km. En el caso de los buses, esta se trabajará mediante sus tres componentes básicas, como se muestra a continuación:

$$tv_{tp} = tc_{tp} + dp_{tp} + di_{tp}$$

Donde

- tv_{tp} : tiempo de viaje promedio de los buses en un tramo t y período p (s/km).
- tc_{tp} : tiempo de cruceo promedio de los buses en un tramo t y período p (s/km).
- dp_{tp} : demora media en paraderos de los buses en un tramo t y período p (s/km).
- di_{tp} : demora en intersecciones promedio de los buses en un tramo t y período p (s/km).

La demora en paraderos (DP) se estimó usando los parámetros del modelo de Cubillos (2018), el cual utiliza datos pasivos de GPS de buses y transacciones Bip!. El modelo considera la descomposición de DP en dos componentes: una asociada a los procesos de detención en paraderos de los buses y otra al proceso de transferencia de pasajeros en ellos.

$$DP_{tp} = tpp_{tp} + ttp_{tp}$$

Donde:

- DP_{tp} : demora media en paraderos de un bus en un tramo t y un período p (s/km).
- tpp_{tp} : tiempo perdido en el proceso de detención en un tramo t, período p (s/km).
- ttp_{tp} : tiempo empleado en transferencia de pasajeros en tramo t, período p (s/km).

Este modelo no incorpora una componente de congestión en paraderos, ya que no había evidencia de su existencia en ausencia de congestión de tráfico. Y si se dan ambos tipos de congestión, no era posible distinguirlos con la información disponible.

La componente de DP asociada al tiempo perdido por el proceso de detención propiamente tal (tpp_{tp}) incluye la apertura y cierre de puertas y es sensible a la velocidad de cruceo de los buses en el tramo. Esta se diferencia según el tipo de vía: corredor

segregado, pista sólo bus o pista de tráfico mixto. Para efectos de la red de estudio, se utilizaron sólo las últimas dos y se calcula mediante:

$$tpp_{tp} = c_1 * NMDP_{tp}$$

Donde:

- tpp_{tp} : tiempo perdido en el proceso de detención en un tramo t, período p (s/km).
- $NMDP_{tp}$: número medio de detenciones por bus para tramo t, período p (det/km).
- c_1 : parámetro estimado según tipo de pista (s/det)

Por otro lado, la componente de DP que corresponde a transferencia de pasajeros (ttp_{tp}) se determina mediante el tiempo medio de servicio en subidas y bajadas de pasajeros. Dado que no se cuenta con información de la distribución de estas entre puertas del bus, se utiliza su suma como variable para este propósito.

$$ttp_{tp} = c_2 * MPT_{tp} + c_3 * D_{tp} * (MPT_{tp} - 20)$$

Donde:

- ttp_{tp} : tiempo de transferencia de pasajeros en tramo t, período p (s/km).
- MPT_{tp} : número medio de subidas y bajadas por bus para tramo t, período p (pax/km).
- D_{tp} : dummy que vale 1 si MPT_{tp} es mayor que 20 y 0 en otro caso
- c_2, c_3 : parámetros estimados, que representan el tiempo de servicio (s/pax).

3.2. DATOS DE BUSES DEL TRANSPORTE PÚBLICO.

El sistema de transporte público que rige en la ciudad de Santiago, y, por ende, en la red de estudio, corresponde a Red Metropolitana de Movilidad (o sencillamente Red). En ella, se integran buses como modo de transporte en superficie, el Metro de Santiago y el tren urbano Nos – Estación Central.

Los buses están monitorizados constantemente mediante dispositivos GPS, permitiendo a los usuarios de aplicaciones web conocer con un alto grado de precisión el tiempo estimado que tardará un determinado recorrido en llegar de un punto a otro.

Para este trabajo se facilitaron los datos individuales de GPS de los buses en el marco de la ejecución de un informe a SECTRA (Gibson, 2019) con procedimientos desarrollados en el marco de un convenio establecido entre el Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM) y el Instituto de Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI), donde la metodología empleada para la recopilación y procesamiento de los datos es robusta y conocida: los pulsos de cada uno de los buses fueron emitidos cada 30 segundos y se almacenaron datos de distancia y tiempo de cada servicio asociados a una determinada hora y día de la semana, con lo cual se obtiene indirectamente el *tiempo*

de viaje (medido en s/km), correspondiente al inverso de la velocidad, que es la variable más relevante para la investigación. También se cuenta con información de la *frecuencia de detenciones en paraderos* [detenciones/km] y de la *demora media en paraderos*, medida en [s/km]. Esta última se obtuvo mediante el modelo de Cubillos (2018) que se basa en datos pasivos generados por los GPS y transacciones con la tarjeta Bip! en buses.

Como existe una alta variabilidad en el espacio y el tiempo, interesa emplear una alta resolución. Así, los tramo-períodos fueron definidos en intervalos de 15 minutos de duración, entre las 6.30 y las 22.00 hrs, para que los datos de buses sean representativos en ejes y períodos de baja frecuencia; y se tomaron registros durante 4 semanas en los meses de marzo y abril de 2019.

Un aspecto relevante que hay que resaltar es que, pese a que se registraron pulsos individuales, se realizó una agregación por tipo de día, quedando entonces sólo tres categorizaciones posibles: día laboral (de lunes a viernes), sábado y por último domingo y festivo. Bajo esta jerarquización los buses exhiben velocidades de entre 4 km/h y 47 km/h, de modo que se tienen intervalos suficientes para describir la variedad de situaciones del tráfico (Figura 3-1).

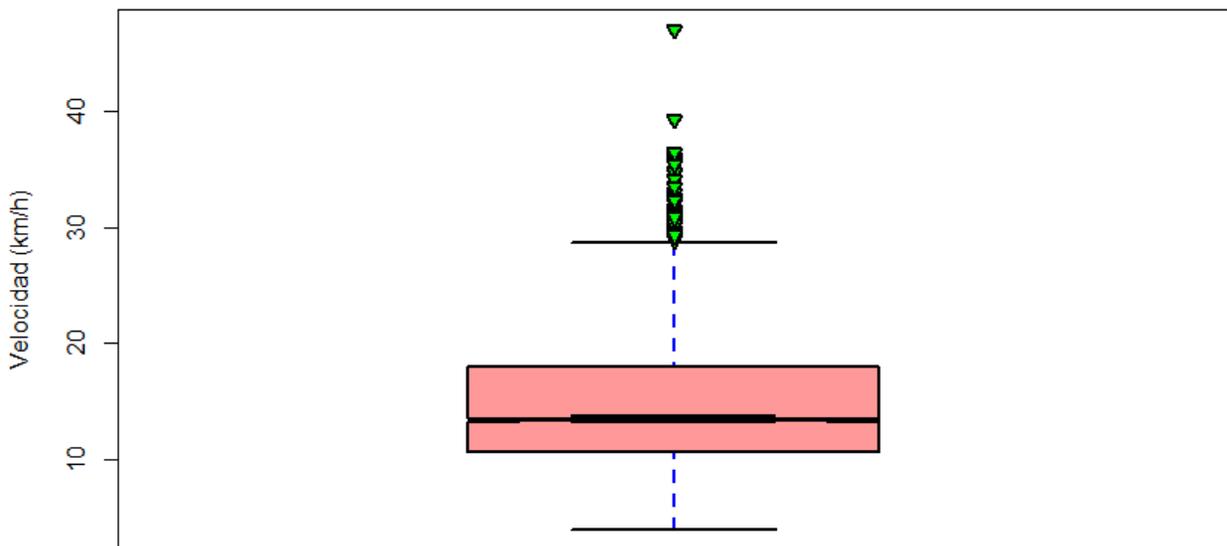


Figura N°3-1 Diagrama tipo caja-bigote de velocidades de buses en la red.

3.3. DATOS DE AUTOMÓVILES

Para esta investigación se emplearon los datos de estimaciones directas de tiempos de viaje provistos por la aplicación de tránsito vehicular Waze, facilitados gracias a un convenio establecido entre Google y el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones

(MTT)¹. Los datos fueron procesados por el área Big Data del MTT. Dicho procedimiento contempló una etapa de detección de outliers a nivel de tramo-período individual.

Si bien se conoce la fuente de los datos, se desconoce cuál es el proceso de generación al que están sujetos, lo cual exige someterlos a un proceso de validación para verificar su consistencia.

La definición de los tramo-períodos y la resolución espacio-temporal de los datos es equivalente a la de los buses, con lo cual se obtuvo un rango de velocidades que va desde los 5 km/h hasta los 61 km/h, es decir, apta para describir el espectro de fenómenos que ocurren en el tráfico vehicular (Figura 3-2).

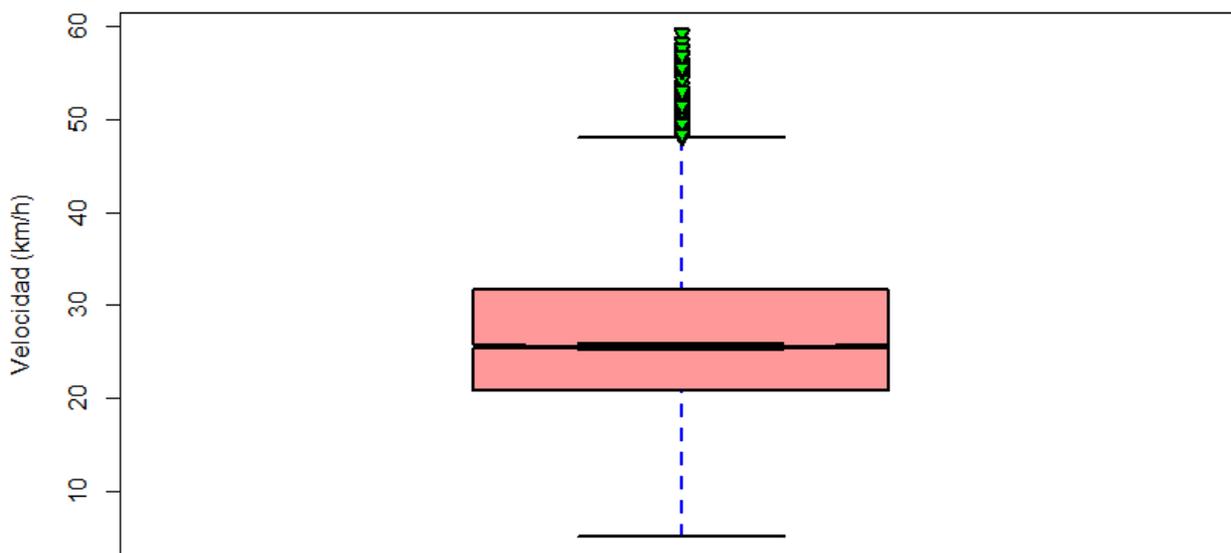


Figura N°3-2 Histograma de velocidades de automóviles en la red.

3.4. RED DE ESTUDIO

El caso de estudio corresponde a una red vial ubicada en la comuna de Ñuñoa, en la ciudad de Santiago, Chile (Figura 3-1). Está conformada por 10 ejes, los cuales se distribuyen equitativamente en orientación norte-sur y oriente-poniente y subdividida en 54 tramos, los cuales están insertos en distintos esquemas de gestión de tránsito y están sometidos a una variedad de situaciones de tráfico, tales como reversibilidad, pista solo bus, vía exclusiva de buses y ciclovía recreativa.

Los tramos fueron definidos 30 metros aguas abajo de la línea de detención para que sean consistentes con la descomposición del tiempo de viaje, y en particular, los procesos de aceleración y desaceleración, para incorporar correctamente la componente de

¹ Los Datos son suministrados por la App de Waze. Más información en <http://waze.com>.

demora en intersecciones. Cabe resaltar que la definición de los tramos, tanto para automóviles y para buses, es básicamente la misma, ya que la diferencia es inferior al 2%. Además, tienen una longitud promedio de 330 metros, nunca superan los 400 metros y tienen una densidad de intersecciones semaforizadas media de 4,4 int/km.



Figura N°3-3 Mapa de la red de estudio. Ñuñoa, Santiago de Chile.

3.4.2. DEFINICIÓN DE EJES Y TRAMOS DE LA RED

La red está conformada por 54 tramos pertenecientes a 10 ejes, los cuales exhiben distintos esquemas de prioridad y geometría.

Los tramos se pueden agrupar de acuerdo a la presencia de paradero en 3 tipos:

- 1) Tramos con paradero (CP): tramos en los que existe una parada para los buses del transporte público.
- 2) Tramos sin paradero (SP): tramos en los que **no** existe una parada para los buses del transporte público.
- 3) Tramos con influencia de paradero (IP): tramos que recogen demoras de paraderos provenientes del tramo adyacente

Los tipos de gestión de tráfico presentes en la red se describen a continuación:

Tráfico mixto: corresponde al régimen en el que tanto vehículos particulares como buses del transporte público comparten infraestructura vial de manera indistinta, es decir, no existe segregación. Están sometidos a este esquema los ejes de Pedro de Valdivia (ambos sentidos), Campo de Deportes (ambos sentidos), Exequiel Fernández, Irarrázaval (ambos sentidos), Dublé Almeyda y Castillo Velasco.

Reversibilidad: son ejes reversibles aquellos que cambian la orientación del tránsito vehicular en determinados períodos del día. Dentro de la red, son reversibles de 7:30 a 10:00 horas todos los tramos de los ejes Alessandri – NS e Irarrázaval – PO, y el tramo Campo de Deportes – NS – 2.

Pista solo bus: se denomina al régimen en el que los buses disponen de una pista de uso exclusivo en la cual teóricamente está prohibido el ingreso de automóviles particulares en ciertos períodos del día. Sin embargo, en la práctica existe invasión producto de los virajes, ingresos a propiedades, etc. El único eje que presenta una pista solo bus es Alessandri en ambos sentidos; no obstante, cuando Irarrázaval es reversible una de las pistas actúa como pista solo bus, lo cual se abordará más adelante.

Sólo automóviles: si bien no constituye un esquema de prioridad como tal, existen ejes en la red en los que sólo hay presencia de automóviles particulares, como Los Tres Antonios, Suárez Mujica y José Domingo Cañas (ambos sentidos).

El Cuadro 3-1 resume las características físicas y operativas más relevantes de cada tramo que compone la red.

Cuadro N°3-1 Tramos pertenecientes a la red.

ID Tramo	Eje Inicio	Eje Fin	Longitud [m]	Número de Pistas	Esquema de prioridad	Paradero
J. P. Alessandri - NS – 2*	Cervantes	Av. Irarrázaval	217	3	Pista solo bus	IP
J. P. Alessandri - NS – 3*	Av. Irarrázaval	José Domingo Cañas	329	3	Pista solo bus	CP
J. P. Alessandri - NS – 4*	J. Domingo Cañas	Gómez Millas	420	3	Pista solo bus	CP
J. P. Alessandri - NS – 5*	Gómez Millas	Grecia	346	3	Pista solo bus	CP
J. P. Alessandri - SN – 2	Las Palmeras	Grecia	272	3	Pista solo bus	CP
J. P. Alessandri - SN – 3	Grecia	Gómez Millas	290	3	Pista solo bus	CP

Continuación Cuadro 3-1

J. P. Alessandri - SN – 4	Gómez Millas	Eduardo Castillo Velasco	288	3	Pista solo bus	CP
J. P. Alessandri - SN – 5	Eduardo Castillo Velasco	Dublé Almeyda	260	3	Pista solo bus	SP
J. P. Alessandri - SN – 6	Dublé Almeyda	Av. Irarrázaval	229	3	Pista solo bus	CP
Pedro de Valdivia - SN – 2	Dr. Luis Bisquert	Grecia	310	2	Tráfico mixto	CP
Pedro de Valdivia - SN – 3	Grecia	Eduardo Castillo Velasco	312	2	Tráfico mixto	SP
Pedro de Valdivia - SN – 4	Eduardo Castillo Velasco	José Domingo Cañas	242	2	Tráfico mixto	CP
Pedro de Valdivia - SN – 5	José Domingo Cañas	Av. Irarrázaval	321	2	Tráfico mixto	CP
Pedro de Valdivia - NS – 2	Simón Bolívar	Av. Irarrázaval	437	2	Tráfico mixto	CP
Pedro de Valdivia - NS – 3	Av. Irarrázaval	José Domingo Cañas	309	2	Tráfico mixto	SP
Pedro de Valdivia - NS – 4	José Domingo Cañas	Eduardo Castillo Velasco	242	2	Tráfico mixto	CP
Pedro de Valdivia - NS – 5	Eduardo Castillo Velasco	Grecia	359	2	Tráfico mixto	CP
Campo de Deportes - NS – 2*	Av. Irarrázaval	José Domingo Cañas	341	1	Tráfico mixto	CP
Campo de Deportes - NS – 3	José Domingo Cañas	Suárez Mujica	366	4	Tráfico mixto	CP
Campo de Deportes - NS – 4	Suárez Mujica	Grecia	219	4	Tráfico mixto	CP
Campo de Deportes - SN – 2	Grecia	Eduardo Castillo Velasco	457	4	Tráfico mixto	CP
Campo de Deportes - SN – 3	Eduardo Castillo Velasco	Dublé Almeyda	306	2	Tráfico mixto	SP
Campo de Deportes - SN – 4	Dublé Almeyda	Av. Irarrázaval	180	2	Tráfico mixto	CP
Los 3 Antonios - SN – 1	Grecia	Eduardo Castillo Velasco	477	2	Solo Automóviles	CP
Los 3 Antonios - SN – 2	Eduardo Castillo Velasco	Dublé Almeyda	296	2	Solo Automóviles	CP
Exequiel Fernández - NS – 2	Capitán Orella	Av. Irarrázaval	257	2	Tráfico mixto	CP

Continuación Cuadro 3-1

Exequiel Fernández - NS – 3	Av. Irarrázaval	José Domingo Cañas	338	2	Tráfico mixto	CP
Exequiel Fernández - NS – 4	José Domingo Cañas	Juan Gómez Millas	438	2	Tráfico mixto	CP
Exequiel Fernández - NS – 5	Juan Gómez Millas	Grecia	337	2	Tráfico mixto	CP
Irarrázaval - OP – 2	José Pedro Alessandri	Exequiel Fernández	355	2	Tráfico mixto	CP
Irarrázaval - OP – 3	Exequiel Fernández	Los Tres Antonios	279	2	Tráfico mixto	SP
Irarrázaval - OP – 4	Los Tres Antonios	Av. Pedro de Valdivia	273	2	Tráfico mixto	CP
Irarrázaval - OP – 5	Av. Pedro de Valdivia	Campo de Deportes	373	2	Tráfico mixto	CP
Irarrázaval - PO – 2*	Manuel Montt	Campo de Deportes	349	2	Tráfico mixto	IP
Irarrázaval - PO – 3*	Campo de Deportes	Av. Pedro de Valdivia	366	2	Tráfico mixto	CP
Irarrázaval - PO – 4*	Av. Pedro de Valdivia	Los Tres Antonios	229	2	Tráfico mixto	SP
Irarrázaval - PO – 5*	Los Tres Antonios	Exequiel Fernández	243	2	Tráfico mixto	CP
Irarrázaval - PO – 6*	Exequiel Fernández	José Pedro Alessandri	185	2	Tráfico mixto	CP
Dublé Almeyda - PO – 2	Monseñor Eyzaguirre	Campo de Deportes	434	2	Tráfico mixto	CP
Dublé Almeyda - PO – 3	Campo de Deportes	Av. Pedro de Valdivia	372	2	Tráfico mixto	CP
Dublé Almeyda - PO – 4	Av. Pedro de Valdivia	Los Tres Antonios	221	2	Tráfico mixto	CP
Dublé Almeyda - PO – 5	Los Tres Antonios	José Pedro Alessandri	459	2	Tráfico mixto	CP
José Domingo Cañas - PO – 1	Monseñor Eyzaguirre	Campo de Deportes	443	2	Solo Automóviles	CP
José Domingo Cañas - PO – 2	Campo de Deportes	Av. Pedro de Valdivia	356	2	Solo Automóviles	CP
José Domingo Cañas - PO – 3	Av. Pedro de Valdivia	Exequiel Fernández	528	2	Solo Automóviles	CP
José Domingo Cañas - PO – 4	Exequiel Fernández	José Pedro Alessandri	209	2	Solo Automóviles	CP
José Domingo Cañas - OP – 1	José Pedro Alessandri	Los Tres Antonios	457	2	Solo Automóviles	CP
José Domingo Cañas - OP – 2	Los Tres Antonios	Av. Pedro de Valdivia	223	2	Solo Automóviles	CP
José Domingo Cañas - OP – 3	Av. Pedro de Valdivia	Campo de Deportes	380	2	Solo Automóviles	CP
Alcalde Eduardo Castillo Velasco - OP – 2	Dr. Johow	José Pedro Alessandri	393	2	Tráfico mixto	CP
Alcalde Eduardo Castillo Velasco - OP – 3	José Pedro Alessandri	Los Tres Antonios	474	2	Tráfico mixto	CP
Alcalde Eduardo Castillo Velasco - OP – 4	Los Tres Antonios	Av. Pedro de Valdivia	222	2	Tráfico mixto	CP

Continuación Cuadro 3-1

Alcalde Eduardo Castillo Velasco - OP – 5	Av. Pedro de Valdivia	Campo de Deportes	374	2	Tráfico mixto	CP
Suárez Mujica - OP – 1	Av. Pedro de Valdivia	Campo de Deportes	385	1	Solo Automóviles	CP

*Tramo reversible entre las 7.30 y las 10.00 hrs de lunes a viernes.

4. ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE DATOS DE AUTOMÓVILES

El tiempo de viaje en un tramo tiene, para los automóviles, dos componentes: tiempo de crucero y demora en intersecciones. Para los buses, hay además una demora en paraderos (DP). Estas componentes no son directamente observables ni medibles, lo que plantea una dificultad para comparar los datos de tiempo de viaje de ambos tipos de vehículo.

Por otro lado, los tiempos de viaje de buses y de automóviles provienen de fuentes distintas y en su obtención hay diversos procesos, que conocemos para los buses pero no para los automóviles. Para trabajar simultáneamente con ambos es necesario hacer primero un análisis de consistencia. En tramos con paradero, que son la gran mayoría, esto se complica por DP.

En Santiago se han estimado modelos de tiempo de viaje para buses [Schneider (2013) y Cubillos (2018)] con todas sus componentes mediante datos pasivos (añadiendo información de Bip! para operaciones en paraderos) con lo que se puede estimar DP de manera coherente a partir de la desagregación de ésta en el tiempo de detención en paraderos y las pérdidas producto de los procesos de aceleración y frenado. Si esto conduce a buenas estimaciones de DP en la red en estudio, se puede trabajar con el **tiempo de viaje neto** (tiempo de viaje total menos demora en paraderos) para comparar con automóviles.

Entonces hay dos vertientes para el análisis de consistencia: la demora en paraderos y el contraste de tiempos de viaje de automóviles y buses. En la medida que este produzca un resultado exitoso, será posible emplear los datos disponibles para realizar comparaciones de manera confiable.

4.1. METODOLOGÍA

Se contrastarán perfiles de tiempos de viaje entre distintos tramos que compartan alguna característica o permitan visualizar, a priori, el grado de diferencia que se percibe entre tiempos de viaje que experimentan usuarios de transporte público y privado al circular por vías de similar infraestructura sujetas a distintas condiciones de circulación. En primer lugar, se analizarán tramos sin presencia de paraderos, dado que se pueden establecer comparaciones de tiempos de viaje medidos. En torno a estos tramos, el procedimiento contempla la caracterización de las diferencias entre los tiempos de viaje de buses y automóviles de acuerdo a su magnitud, la identificación de fuentes de variabilidad, características operacionales y otros factores relativos a la infraestructura vial presentes en el tramo.

A continuación, se evaluará la consistencia de la estimación de la demora en paraderos (Cubillos, 2018) empleada en el cálculo del tiempo de viaje neto (TVN) de buses en dos etapas: primero se analizará la consistencia interna, es decir, se analizarán sólo tiempos de viaje de buses en ejes contiguos con y sin paradero; posteriormente se contrastarán datos de ambos modos, realizando igual distinción entre tramos con y sin paradero.

Los tramos con influencia de paraderos (IP) son aquellos que aunque no tengan presencia de un paradero, recogen demoras de paraderos provenientes del tramo adyacente, motivo por el cual no serán considerados. Sin perjuicio de lo anterior, se analizarán estos tramos para corroborar que haya consistencia en las diferencias de tiempos de viaje entre modos en el comportamiento global de los datos.

Se efectuará un proceso para identificar valores anómalos en los datos. Ellos fueron ya sometidos a detección de outliers, por separado para automóviles y buses. Aquí se incorporará la comparación de tiempos de viaje de ambos para cada tramo – período de la red. En caso de encontrar diferencias sustantivas, se analizará si existe un fundamento sólido que las sustente en base a la información disponible. De no ser así, se calificarán los valores pertinentes como anómalos y serán descartados en los análisis subsiguientes.

El Cuadro 4-1 resume las modificaciones sobre la base de datos original sobre la cual se realizarán los análisis respectivos.

Cuadro N°4-1 Detalle de proceso de depuración de base de datos – Etapa 1.

Etapa	Datos Iniciales	Datos Finales	Delta Datos	%BD extraída	%BD extraída acumulada
Extracción de datos nulos	8184	7585	599	7,32%	7,32%
Remoción Tramos IP	7585	7255	330	4,03%	11,35%

Una vez depurada la base de datos y establecida su consistencia, se procederá a realizar los análisis conducentes al objetivo principal de esta tesis.

4.2. ANÁLISIS DE CONSISTENCIA.

Para realizar los análisis de consistencia es necesario identificar y describir detalladamente las tendencias y fenómenos que se observan en los datos. En este contexto, el análisis irá desde lo global a lo específico, dado que un análisis macro entregará las directrices y el marco referencial que posteriormente serán útiles para dilucidar situaciones particulares.

La discusión se centrará en evaluar si existe consistencia en los datos de tiempos de viaje de automóviles provistos por Waze y en la estimación de demora en paraderos (DP). Para este propósito, la clasificación más relevante de los tramos pertenecientes a la red de estudio está determinada por la presencia de paraderos de buses.

Además de las paradas de buses, el día de la semana en que se registre la medición, así como el período del día son variables que permitirán dilucidar de manera concluyente la credibilidad de los datos, puesto que existen tendencias típicas y diferencias sustanciales en cuanto a las magnitudes de buses y automóviles en días laborales o de fines de semana, así como en horario punta o fuera de punta.

4.3. CARACTERIZACIÓN DE TIEMPOS DE VIAJE NETO DE AUTOMÓVILES Y BUSES.

En esta sección se hará una completa descripción y caracterización de los tiempos de viaje de automóviles y buses de acuerdo a distintas categorizaciones, lo cual entregará una visión global de las tendencias presentes en los datos y sentará las bases para análisis posteriores.

4.3.1. TRAMOS SIN PARADERO (SP).

En un tramo sin presencia de paraderos las componentes que describen el tiempo de viaje de automóviles y buses son las mismas: tiempo a velocidad de cruce (TC) y demora en intersecciones (DI). La primera corresponde al tiempo que emplea un vehículo en recorrer una distancia dada sin considerar sus detenciones en intersecciones o en paraderos (en el caso de los buses) y está influenciada por la interacción con el flujo vehicular, la infraestructura vial, propiedades del vehículo y normativa vigente (velocidad máxima permitida, por ejemplo). Por otro lado, la demora en intersecciones corresponde al tiempo que transcurre cuando el vehículo atraviesa una intersección semaforizada. En esta última el tiempo de detención podría estar asociado a la programación del semáforo y al grado de saturación del eje, lo que se conoce como demora uniforme, o ser producto de un estado congestionado del tráfico (demora excedente).

Los datos de tiempos de viaje de buses (TVB) asociados a tramos sin paradero (SP) cuentan con la particularidad que, a diferencia de los tramos con paradero, son datos procesados completamente a partir de los registros de los GPS de los vehículos, es decir, son datos medidos, y no son datos estimados como lo es el tiempo de viaje neto (TVN) en el caso de los tramos con paradero (CP), dado que la componente asociada a demora en paraderos (DP) es una estimación.

En particular, esta red cuenta con 6 tramos sin paraderos:

- Alessandri SN – 5

- Pedro de Valdivia NS – 3
- Pedro de Valdivia SN – 3
- Campo de Deportes SN – 3
- Irarrázaval OP – 3
- Irarrázaval PO – 4

Para obtener una visión de las tendencias globales en los datos se graficaron los tiempos de viaje promedio en tramos SP, distinguiendo por tipo de día: laboral (Figura 4-1) o fin de semana / festivo (Figura 4-8). Entre paréntesis se indica el número de tramos que cuentan con datos para cada tipo de modo.

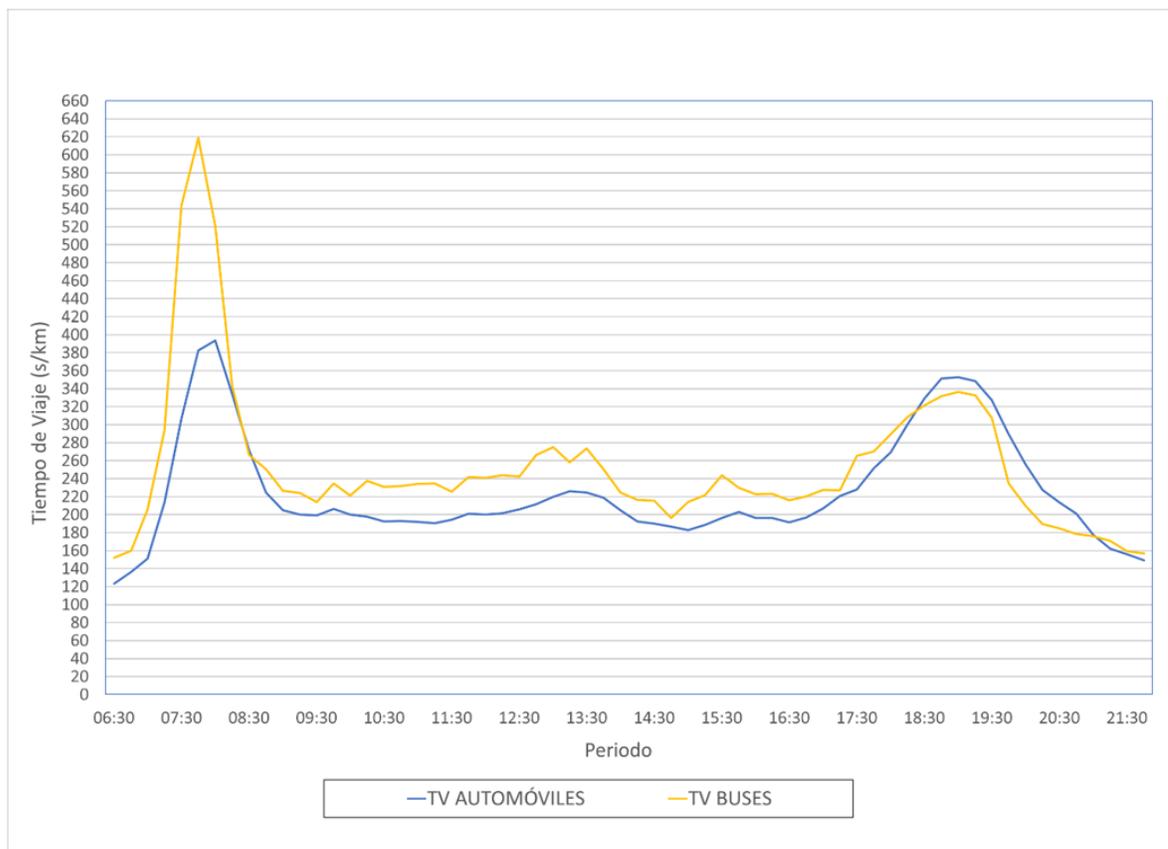


Figura N°4-1 Tiempos de viaje promedio de automóviles y buses en tramos sin paradero registrados en día laboral (NT-6)².

En días de tipo laboral se observa que la curva de tiempo de viaje de buses está por sobre la curva de automóviles en la mayoría de los períodos, exceptuando aquellos que se sitúan en torno al horario punta tarde (Figura 4-1). En este sentido, se distinguen

² Si bien se consideró presentar gráficamente los tiempos de viaje mediante diagramas tipo caja-bigote, al tratarse de un análisis de tendencias promedio de una variable que posee un gran nivel de dispersión se optó por graficar una curva que representa el promedio de los datos. El análisis a nivel granular se realizará en una sección posterior.

claramente tres regiones con distintos comportamientos: por un lado, se identifican períodos asociados la punta mañana y la punta tarde: el primero con altos tiempos de viaje y grandes diferencias en favor de los automóviles y el segundo caracterizado por presentar tiempos de viaje predominante similares entre automóviles y buses (sobre los 260 s/km), probablemente debido a que se enmarca en un escenario congestionado en el que la ocupación de la infraestructura vial no deja lugar a la expresión de ventajas de un modo sobre otro. Dado que la punta mañana también exhibe un alto grado de congestión, es objeto de análisis la discrepancia en la tendencia observada respecto de la que presenta la punta tarde.

También existe un régimen fuera de punta, en el cual existe una diferencia estable de 26 s/km en favor de los automóviles, valor que se explicaría en mayor medida por las ventajas de cruce de éstos, que se hacen patentes en presencia de un bajo grado de saturación. Antes del período punta tarde existe una fase de convergencia en la cual la diferencia va disipándose hasta que los tiempos de viaje de buses y automóviles son coincidentes.

Las tendencias antes descritas presentan una consistencia notable, a excepción de un período particular en la punta mañana y los últimos períodos del día. La primera situación a destacar consiste en la gran diferencia que existe durante la punta mañana entre automóviles y buses y que alcanza los 220 s/km, fenómeno que guardaría relación con la presencia de un establecimiento educacional en uno de los tramos pertenecientes a la categoría SP, el cual conforma el 16% de la muestra de tramos SP y, por lo tanto, incide de manera crucial en el promedio de los datos asociados a dicho período. En horas de la mañana del tramo Alessandri SN – 5 (Figura 4-2), los conductores de automóviles invaden la pista de los buses (para acceder a un colegio en Dublé Almeyda) generando congestión en Alessandri, de modo que los tiempos de viaje de buses se incrementan notoriamente respecto del de los automóviles, quienes mantienen su operación normalmente en el resto de las pistas del eje; sumado a que durante esta franja horaria ambas calzadas del eje operan hacia el norte, medida que beneficiaría principalmente a los automóviles y no a los buses.

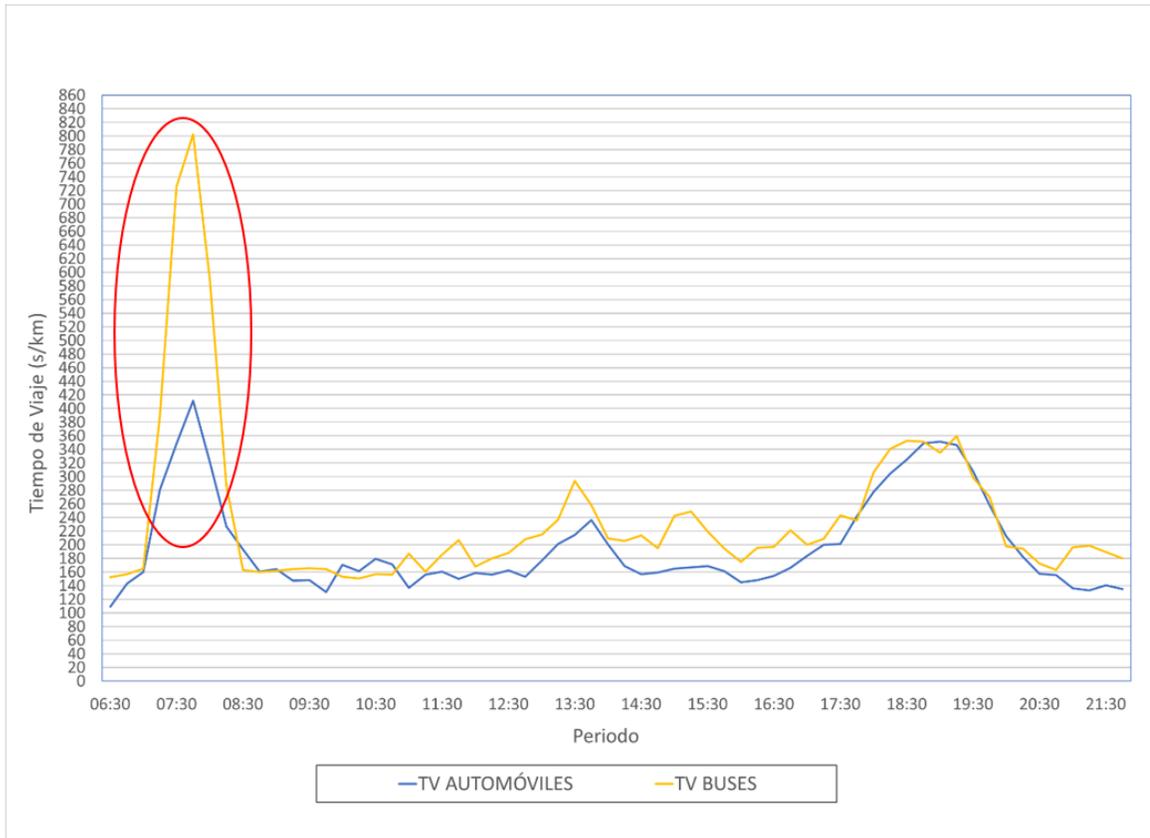


Figura N°4-2 Tiempos de viaje promedio de automóviles y buses en el tramo Alessandri SN – 5 registrados en día laboral (NT-1).

Con el propósito de dilucidar si existían otros valores singulares se analizaron los restantes 5 tramos sin paradero, hallando un segundo tramo que presentaba tiempos sustancialmente dispares entre buses y automóviles. Este tramo corresponde a Campo de Deportes SN – 3 (Figura 4-3), cuyo límite al norte coincide con el inicio de un tramo que es reversible durante la punta de la mañana, es decir, todo el flujo circula hacia el norte. Cuando los automóviles que circulan en este sentido, a bajas velocidades, concurren a Dublé Almeyda, tienen la posibilidad de hacer uso de una tercera pista. Como los buses circulan preferentemente por la pista derecha, esto beneficiaría principalmente a los automóviles, quienes pueden incorporarse a esta nueva pista y circular a mayores velocidades.

En este mismo tramo existen otros cuatro períodos que presentan una gran disparidad en la magnitud de tiempos de viaje de automóviles y buses (15.00 hrs, 15.45 hrs, 16.00 hrs y 17.00 hrs) que no se reproduce con tanta intensidad en otros períodos contiguos y que, por lo tanto, escapa a las tendencias globales. Estos valores no responderían a ninguna condición operacional en particular de este tramo, quedando así en la categoría de anómalos. Al extraer estos valores se recupera la tendencia global hallada en el resto de los tramos.

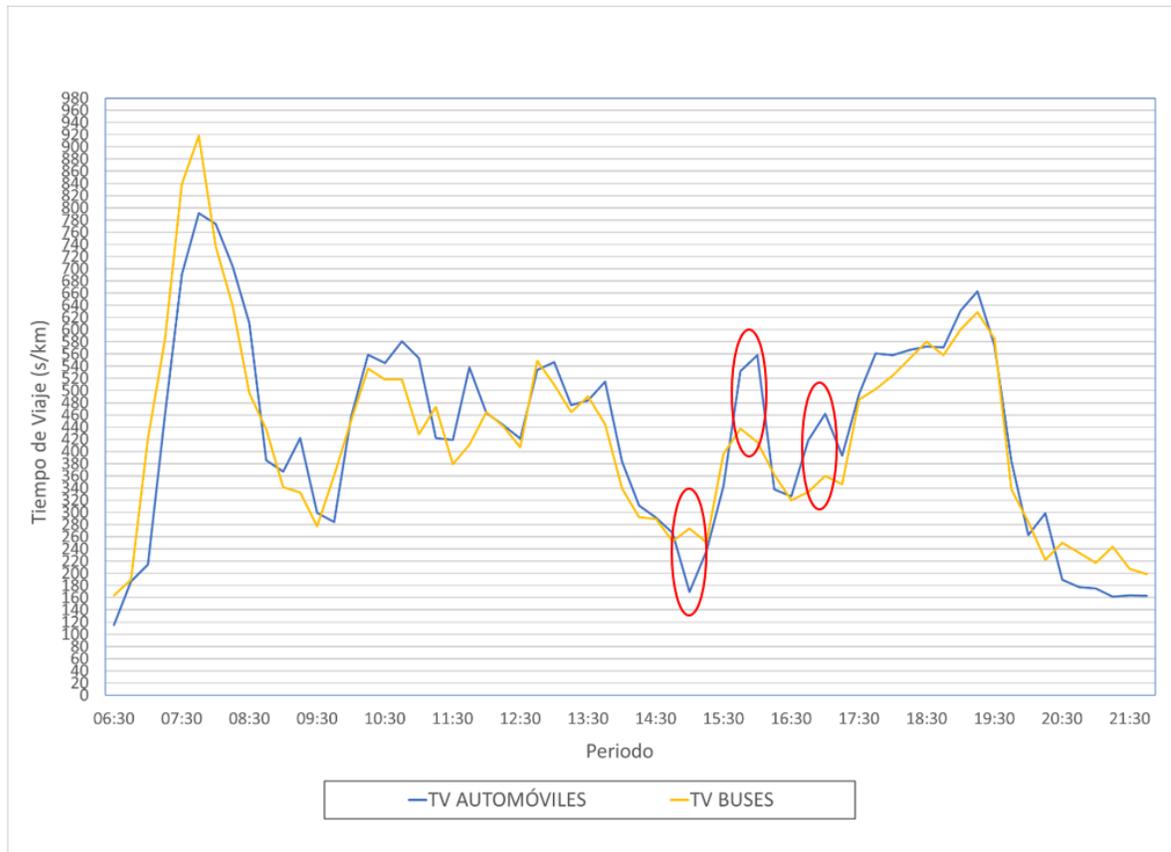


Figura N°4-3 Tiempos de viaje promedio de automóviles y buses en el tramo Campo de Deportes SN – 3 registrados en día laboral (NT-1).

Por último, se indagó en los datos correspondientes a la punta tarde debido a que los automóviles presentaban tiempos sostenidamente mayores a los de buses, identificándose así la influencia sustancial del tramo Irrárazaval PO – 4 (Figura 4-4), en el cual los valores de automóviles son superiores a los de buses entre un 26% y un 101%, una tendencia que dista de la observada en el resto de los tramos sin paradero, donde no se observan diferencias significativas entre modos.

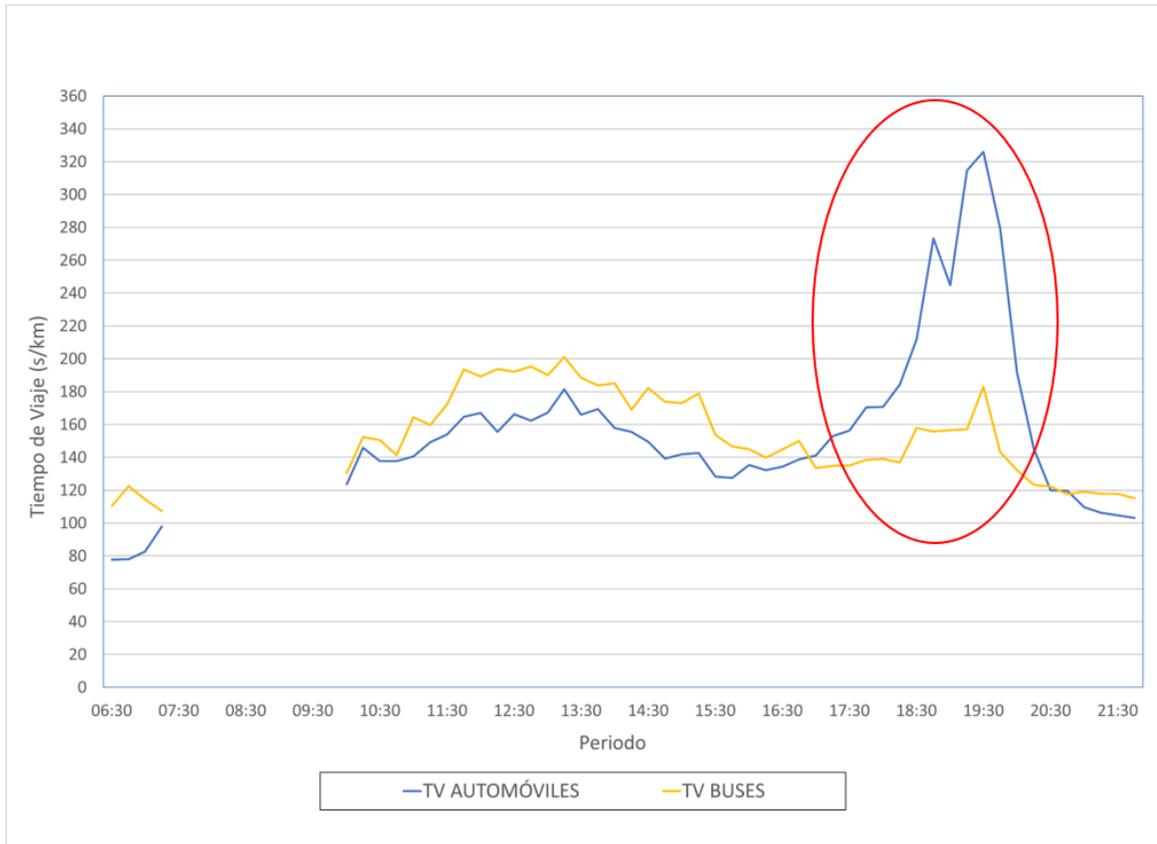


Figura N°4-4 Tiempos de viaje promedio de automóviles y buses en tramo Irarrázaval PO – 4 en día laboral (NT-1).

Para entender este comportamiento se efectuó una visita a terreno³, hallándose dos situaciones que provocarían mayores tiempos de viaje en automóviles en relación a los buses:

- Se ocupa cerca del 100% de la capacidad de la pista de viraje durante el verde del eje Irarrázaval, notando que el semáforo no es de tres tiempos. Los vehículos no pueden virar a la izquierda debido a que el flujo que circula en sentido contrario no lo permite, debiendo esperar a que les dé rojo para realizar el movimiento (Figura 4-5).
- Una cuadra al poniente de Ricardo Lyon está Villaseca, que descarga un flujo importante a Irarrázaval. La distancia entre ambas calles es de alrededor de 100 metros, y el flujo se incorpora mayoritariamente a la pista izquierda, lo que ocasiona que ésta se encuentre a capacidad al momento que el semáforo le otorga prioridad al eje Irarrázaval en la intersección con Villaseca. Producto de lo anterior,

³ La visita a terreno se efectuó el 19 de enero de 2021 de 18 a 19 hrs, día y hora en el los cuales se permitió la libre circulación del flujo vehicular en la comuna en la cual se sitúa la red de estudio. Por lo tanto, la situación es comparable al contexto en el cual se realizaron las mediciones en marzo y abril de 2019, es decir, sin restricciones de movilidad.

aquellos vehículos que circulan por la pista rápida no pueden iniciar su marcha apenas la lámpara cambia a verde, generándose una cola excedente (Figura 4-6).



Figura N°4-5 Irarrázaval esquina Ricardo Lyon. 19.01.2021, 19.04 hrs.



Figura N°4-6 Irarrázaval esquina Ricardo Lyon. 19.01.2021, 19.05 hrs.

Para comprobar que efectivamente existe una incidencia de los valores asociados al conjunto de situaciones detectadas sobre el promedio del conjunto de tramos SP se graficaron los tiempos de viaje excluyendo la franja horaria comprendida entre las 7:30 y las 8:00 hrs de los tramos Alessandri SN – 5 y Campo de Deportes SN – 3 y entre 17.30 y 20.00 hrs en el caso de Irarrázaval PO – 4 (Figura 4-7). La exclusión de los datos antes citados (36 valores) entrega como resultado una disminución de 90 s/km en la brecha entre automóviles y buses para el segmento de punta mañana, quedando el nuevo peak de diferencia en 60 s/km, el cual es razonable considerando que los tiempos de viaje promedio están en entorno de los 450 s/km. Por otro lado, excluyendo los valores atípicos

del eje Irrázaval durante la punta tarde se exhibe una coincidencia notable entre automóviles y buses, sobre todo a partir del umbral de los 280 s/km.

En virtud de lo anterior se puede concluir que efectivamente existe una influencia significativa de los registros pertenecientes a estos tramos, y, por lo tanto, constituyen singularidades respecto de la tendencia general. Sin embargo, durante los primeros períodos de la mañana se puede notar que los tiempos de viaje de buses siguen siendo mayores a los de automóviles, fenómeno para el cual no existe un fundamento robusto. En este contexto, se identificó un tercer tramo con una diferencia importante en tiempo de viaje neto (TVN) entre automóviles y buses dentro de los tramos sin paradero (Pedro de Valdivia SN – 3), que a diferencia de los casos antes examinados presenta brechas de magnitud mayor a 50 s/km sostenidamente durante el día, incluyendo las horas punta, lo que podría explicar que aun excluyendo las singularidades siga existiendo una diferencia significativa entre modos.

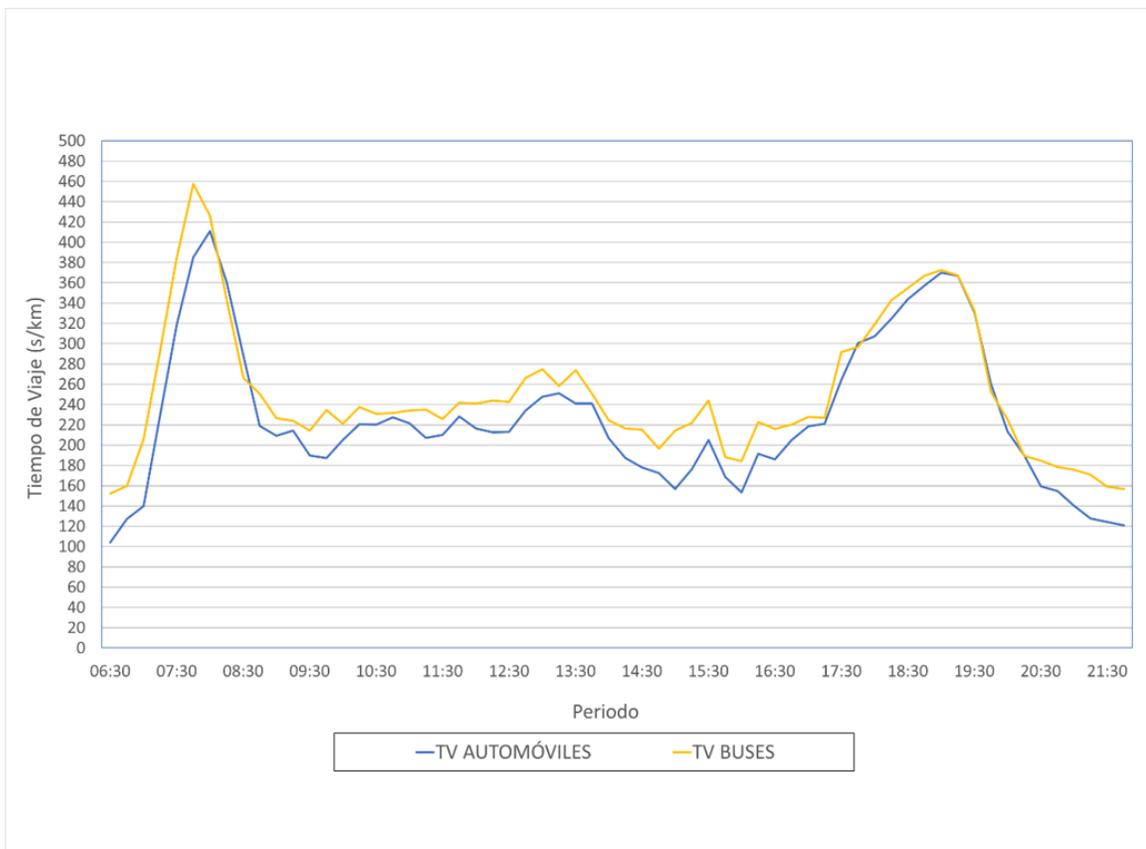


Figura N°4-7 Tiempos de viaje promedio de automóviles y buses en tramos SP (sin singularidades) registrados en día laboral (NT-6).

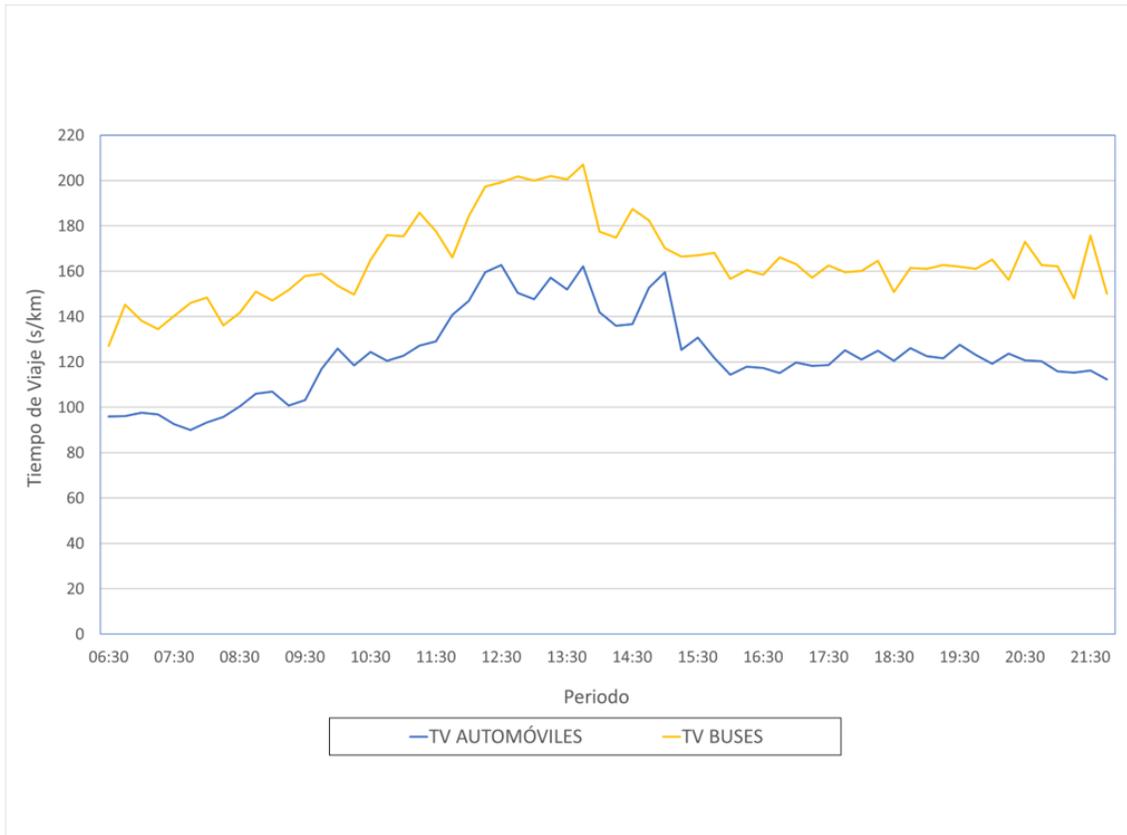


Figura N°4-8 Tiempos de viaje promedio de automóviles y buses en tramos sin paradero registrados en sábados, domingos y festivos (NT-6).

En días de fin de semana y festivos las series de datos de automóviles y buses (Figura 4-8) presentan una estabilidad notable en todos los períodos del día, con magnitudes que difieren en promedio 42 s/km y que se mantienen estables durante todo el día (Cuadro 4-1). La diferencia entre modos es mayor que la observada en días de tipo laboral (19 s/km mayor a la de días laborales), algo que podría deberse a que el flujo vehicular es menor, y, por lo tanto, se daría lugar a que se expresen las diferencias entre modos, y en particular, las ventajas en tiempo de cruce de los automóviles.

La única excepción relevante a las tendencias la constituyen los valores de las 11.45 hrs y 15.00 hrs del día sábado, el cual resultó estar influenciado por los registros del tramo Campo de Deportes SN – 3, ambos valores que se alejan de la tendencia general de manera sustancial. Este tramo se caracteriza por tener un régimen de tráfico mixto sin prioridad para buses y presentar sólo un viraje a la izquierda (que no genera colas), de modo que podría tratarse de un valor anómalo; tomando además en cuenta que en períodos contiguos no se exhibe una tendencia similar.

La Figura 4-9 muestra la tendencia de los datos en días de fin de semana sin considerar los valores anómalos, con lo cual se ha ratificado la tendencia global que exhiben el resto de los períodos de manera individual.

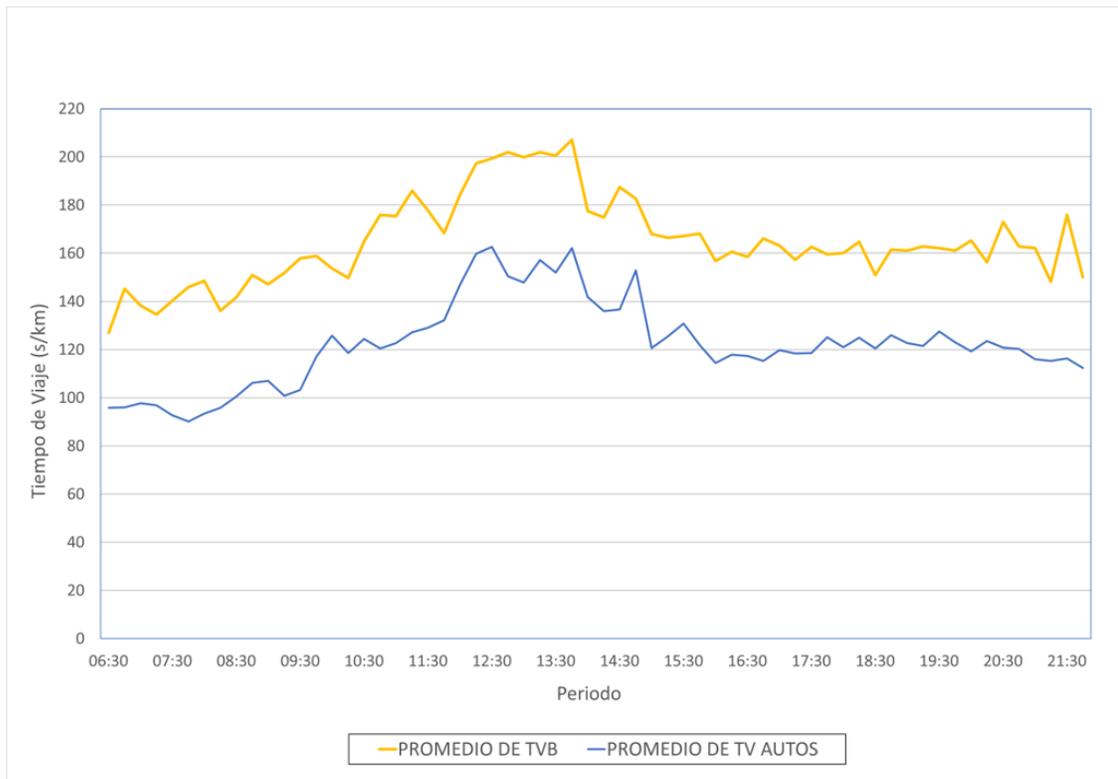


Figura N°4-9 Tiempos de viaje promedio de automóviles y buses en tramos SP (sin singularidades) registrados en día de fin de semana (NT-6).

Una vez efectuado el proceso de análisis y detección de singularidades se realizó la comparación estadística de las curvas correspondientes a días laborales y fines de semana utilizando el t-test o test de diferencia de medias para contrastar los resultados promedios de tiempos de viaje netos de automóviles y buses. Como la diferencia de tiempo de viaje neto entre modos se comporta de una manera particular dependiendo de la magnitud del tiempo de viaje se hará la distinción entre períodos punta y fuera de punta, ya que las tendencias indican que en el primero la diferencia es mucho menor que en el segundo. La determinación del umbral que indica en qué categoría se sitúa un determinado valor se obtiene al identificar aquella región en la que la brecha de tiempo de viaje se reduce notoriamente. De acuerdo a lo observado en la Figura 4-7, la región en cuestión quedaría delimitada por valores entre los 220 s/km y 260 s/km, quedando así el umbral establecido como la media del intervalo, es decir, 240 s/km. Cabe mencionar que pese a que los tiempos de viaje distribuyen como una normal asimétrica (Figura 3-2), el tamaño muestral es más que suficiente para otorgar resultados robustos.

En el Cuadro 4-2 se puede apreciar que en día laboral la media de las diferencias es mucho menor respecto de días de fin de semana, tanto en períodos punta como fuera de punta. Sin embargo, en períodos punta de día laboral existe una altísima variabilidad, lo cual se debe principalmente al orden de los valores que se observan en estos períodos (valores de hasta 460 s/km) y a la variedad de situaciones presentes en la red. En este

sentido, Durán-Hormazábal et al. (2016) concluyeron que la variabilidad de los tiempos de viaje de buses aumenta conforme crece la congestión vehicular, en un estudio que también empleó datos de una red de Santiago.

Finalmente, la única diferencia que resultó no ser estadísticamente significativa entre automóviles y buses se halla en días laborales en períodos punta, que como se ha hecho hincapié anteriormente es el régimen en el cual se anulan las diferencias entre modos producto del alto grado de ocupación de las vías.

Cuadro N°4-2 Comparación estadística de tiempos de viaje neto en tramos sin paradero entre automóviles y buses.

Tipo de día	ΔTVN medio (s/km)	$sd(\Delta TVN)$ (s/km)	t-test	
			$p - value$ ($\alpha = 0.05$)	Comparación de medias t-test
Laboral - períodos punta	14	83	0,441	Diferencia de medias no significativa
Laboral - períodos fuera de punta	26	26	3,0e-15	Diferencia de medias significativa
Fines de semana y Festivos	42	33	2,2e-16	Diferencia de medias significativa

Esta primera aproximación a la prueba de consistencia de los datos entrega las primeras luces sobre la validez de los datos de automóviles. Mediante el análisis de tendencias de diferencias de tiempos de viaje neto (en este caso particular el tiempo de viaje neto es equivalente al tiempo de viaje total) se pudo establecer que los valores tienen sentido tomando en cuenta que hay fenómenos recurrentes ligados a la circulación vehicular que debiesen traducirse en los datos: cuando los tiempos de viaje son altos, las curvas tienden a aproximarse entre ellas, producto de que no hay lugar a que se expresen diferencias modales, mientras que cuando los tiempos de viaje son bajos, los tiempos de viaje de los automóviles son sostenidamente mayores a los de los buses, lo cual se refleja de manera acentuada en días de fin de semana.

4.3.2. TRAMOS DE TRÁFICO MIXTO: TIEMPO DE VIAJE DE BUSES EN TRAMOS CON Y SIN PARADERO.

Cuando hay paraderos en un tramo de vía, además del tiempo de cruce y la demora en intersecciones una tercera componente se añade a la desagregación del tiempo de viaje total para los buses: la demora en paraderos (DP).

La demora en paraderos comprende el tiempo empleado en el proceso de aceleración, desaceleración y frenado de los buses en una parada, el tiempo que permanece el bus detenido antes y después de los procesos de apertura y cierre de puertas y finalmente la transferencia de pasajeros. Sin embargo, en la realidad la operación en paraderos depende directamente de otros factores ligados principalmente a la interacción con el flujo vehicular circundante y a la disposición de la infraestructura vial en torno a los sitios para buses en la parada. Entre estos factores destacan fenómenos como el apilamiento de buses, que puede ocurrir de manera esporádica y genera una demora adicional por exceso de flujo sobre capacidad, ya que incluso cuando un bus realizara la operación fuera del área habilitada para ello podría verse limitado por los buses que lo anteceden. Un segundo factor relevante es la distancia del paradero a la intersección semaforizada más próxima aguas abajo, dado que la acumulación de vehículos en cola podría impedir que el bus acceda al sitio de la parada y, en consecuencia, se generaría una demora adicional, la cual es más relevante mientras más cerca se encuentra la parada del semáforo. Tirachini et al. (2016) mostraron que la ubicación de un semáforo aguas abajo de la parada induce la componente de demora de mayor magnitud en la detención de un bus en una parada; efecto negativo que crece conforme disminuye la distancia entre el semáforo y la parada.

De las tres componentes de demora en paraderos, la estimación que se aplicó sobre la base de datos empleada en este trabajo sólo consideró la primera, es decir, la demora propiamente tal asociada a transferencia de pasajeros, permanencia en paradero y aceleraciones, constituyendo esta una limitante para determinar la consistencia de la demora en paraderos.

En esta línea, para determinar si la demora estimada en paraderos es consistente se analizarán las tendencias de los tiempos de viaje netos de buses en tramos con y sin paradero. En este punto surge una segunda limitante: ¿cómo asegurar que la comparación tenga sentido? Cada uno de los tramos guarda importantes diferencias en aspectos operativos y estructurales respecto de los demás. Tomando en consideración que una comparación elaborada con el total de tramos disponibles no es del todo razonable desde el punto de vista del tamaño muestral (6 tramos sin paradero frente a 36 tramos con paradero) y a la variedad de situaciones operacionales particulares de cada eje y tramo pertenecientes a la red, se consideró un subconjunto de los tramos con paradero que son adyacentes a tramos sin paradero, de modo de contrastar tramos cuyas características sean lo menos heterogéneas posibles y de minimizar cambios estructurales y operacionales entre tramos que pueden distorsionar los resultados (un eje mantiene, entre otros, esquema de gestión de tránsito y número de pistas). En virtud de lo anterior, de los 6 tramos sin paradero que contiene la red se excluyó del análisis al tramo perteneciente al eje Campo de Deportes SN, puesto que la geometría cambia significativamente tramo a tramo: el primer tramo cuenta con 4 pistas, el segundo sólo con 2 y el tercero tiene un aumento de capacidad durante una fracción del día que sólo beneficia a los automóviles. Además de la geometría del eje, existen condiciones

operacionales que alterarían de manera significativa los tiempos de viaje en determinados tramos: los virajes desde José Domingo Cañas generan retenciones aguas arriba, en arco corto delimitado por Dublé Almeyda y José Domingo Cañas. Estas retenciones afectarían en mayor medida a los buses, quienes circulan preferentemente por la pista derecha, y en menor grado a los automóviles. Así, queda de manifiesto que no son tramos comparables producto de la poca homogeneidad en el número de pistas.

En consecuencia, este análisis que permitirá establecer la validez de la estimación de demora en paraderos y su aplicación a la red de estudio queda reducido a los 5 tramos sin paraderos restantes y a 10 tramos con paradero adyacentes a ellos.

En primer lugar, se realizó la distinción entre días de tipo laboral y de fin de semana para identificar tendencias globales. Al igual que la sección anterior, se descartaron valores puntuales que se alejaban significativamente de la tendencia global y los equivalentes al mismo período en tramos adyacentes, quedando fuera finalmente 12 valores en días de tipo laboral y 9 valores en días de fines de semana.

A diferencia de los días laborales, en días de fines de semana los episodios de congestión vehicular son escasos y, en consecuencia, se exhiben menores tiempos de viaje. Cuando el grado de saturación es bajo existe una mayor pérdida de beneficios por coordinación de semáforos, la cual desaparece gradualmente en la medida que aumentan los niveles de flujo vehicular. Debido a lo anterior, resulta conveniente analizar primeramente los datos asociados a días de fines de semana de manera cuantitativa para comprender las magnitudes en ausencia de congestión vehicular. En la Figura 4-10 se observa que el TV de buses de tramos sin paradero se encuentra siempre bajo la curva de tiempo de viaje neto correspondiente a tramos con paradero. Los tiempos de viaje netos (tiempo de viaje total descontando la demora en paraderos) en ambos tipos de tramo están siempre por debajo de los 220 s/km, de modo que en tramos CP el efecto de las detenciones en ellos en la demora por intersección por pérdida de beneficios de coordinación por detenciones en paradero es relevante. Respecto de la magnitud de las diferencias, se aprecia que ésta es de en promedio 18 s/km, muy similar a los 15 s/km atribuibles a la pérdida por beneficios de coordinación derivados del producto de la estimación del factor de reducción por coordinación de Schneider (2013) y la densidad de intersecciones semaforizadas en esta red (3,5 s/int y 4,4 int/km, respectivamente); siendo entonces bastante consistente y encontrándose dentro del margen de error.

Una característica a resaltar en fines de semana es el comportamiento de las curvas de tiempo de viaje en torno al mediodía: cuando se exhiben los mayores tiempos de viaje, la brecha entre tiempos de viaje neto en tramos CP y SP se reduce, sugiriendo que habría una dependencia entre la magnitud del tiempo de viaje en el tamaño de la brecha, lo que tiene bastante sentido si se considera que la pérdida de beneficios por coordinación en paraderos disminuye conforme aumenta el tiempo de viaje.

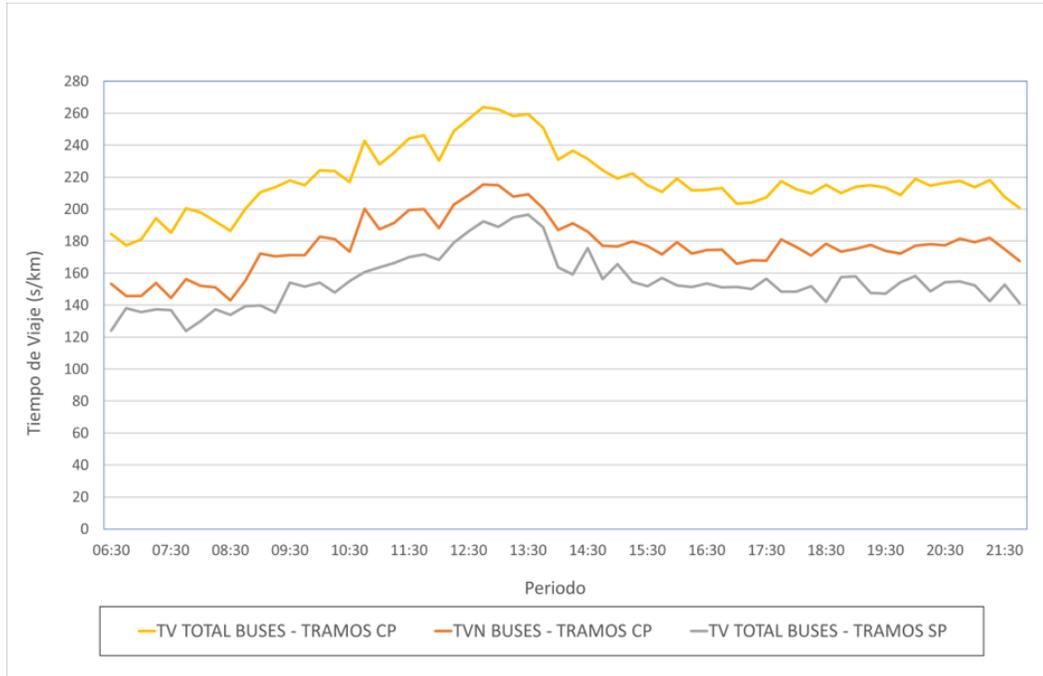


Figura N°4-10 Tiempo de viaje promedio de buses en tramos CP y SP registrados en día de fin de semana (NTCP-10, NTSP-5).

Luego de examinar los tiempos de viaje de buses en escenarios sin congestión apreciable corresponde analizar los datos de días laborales, que son los que con más frecuencia exhiben episodios de congestión.

Al visualizar los tiempos de viaje total y neto en tramos CP y total en tramos SP en día laboral (Figura 4-11) se observan variadas tendencias en el transcurso del día. A nivel macro, la curva de TVN de tramos CP se encuentra –a excepción de dos períodos– siempre entre las curvas de TV total de tramos CP y SP: aun cuando se descuenta la demora en paraderos, que en promedio es del orden de 60 s/km, existe la ya mencionada pérdida de beneficios por coordinación en tramos CP, lo que explica la sistematicidad de este fenómeno a lo largo del día. Cuando el grado de saturación es bajo (menor a 280 s/km), la brecha entre curvas se mantiene con notoria estabilidad, siendo esta de magnitud promedio 42 s/km. Como la pérdida de beneficios por coordinación justifica una diferencia de hasta 15 s/km, existiría un remanente de 27 s/km cuyo origen estaría en parámetros aún no analizados como la congestión en paraderos.

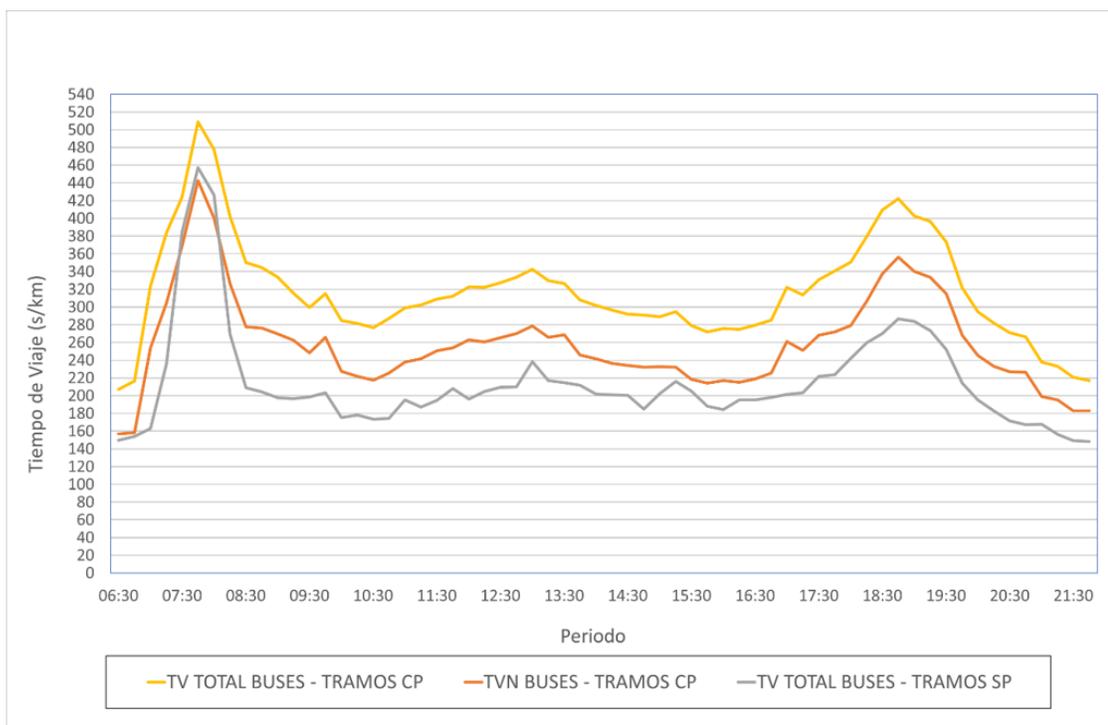


Figura N°4-11 Tiempo de viaje promedio de buses en tramos CP y SP registrados en día laboral (NTCP-10, NTSP-5).

La tendencia madre en día laboral se aleja notoriamente durante la punta mañana, que es la que exhibe los tiempos de viajes más altos y, por ende, las situaciones de congestión severa. En este segmento horario, tiempos de viaje netos de tramos CP y SP tienden a igualarse producto de que los buses de tramos CP utilizan el tiempo detenidos por congestión para realizar operación de transferencia de pasajeros como si se tratase de un paradero habilitado, eliminando así la principal diferencia entre ambos tipos de tramos. Sin embargo, este comportamiento no se replica en la punta tarde, en la cual los tiempos de viaje de los buses conservan la diferencia de 60 km/s que se observa en gran parte de los períodos que presentan bajo flujo. Uno de los motivos que puede explicar este fenómeno es que, tal como se hizo hincapié anteriormente, en la estimación de demora en paraderos no está incorporado el efecto del *bunching* en los buses que genera congestión en paraderos; efecto que se exhibe de manera pronunciada en el eje de Irarrázaval PO. En este caso, la congestión de pistas aledañas en hora punta no permite que los buses puedan cambiarse de pista con facilidad. Para ilustrar la incidencia de este fenómeno en el eje de Irarrázaval PO a continuación se exhiben los tiempos de viaje de buses en día laboral excluyendo los tramos pertenecientes a este eje (Figura 4-12).

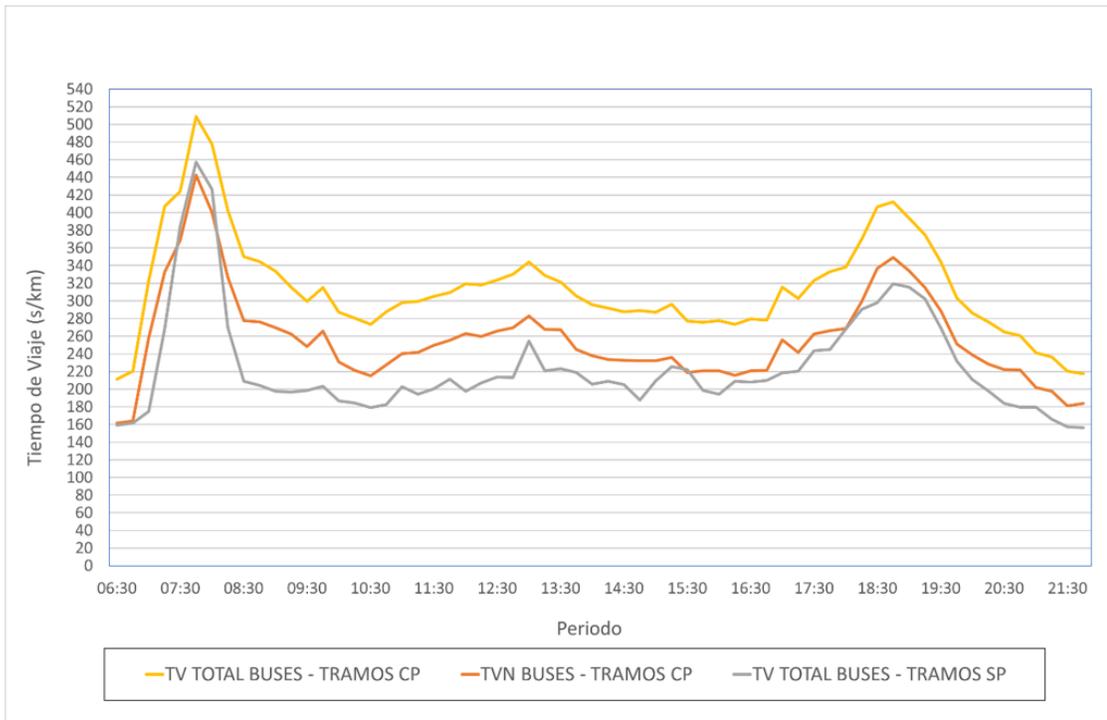


Figura N°4-12 Tiempo de viaje promedio de buses en tramos CP y SP registrados en día laboral excluyendo eje Irrazaval PO (NTCP-8, NTSP-4).

En la Figura 4-12 se observa que la brecha entre el tiempo de viaje neto de buses en punta tarde en tramos CP y SP disminuye considerablemente y se sitúa en el orden de los 5 a 20 s/km -siendo el tiempo de viaje neto (TVN) siempre superior en tramos CP-, un valor razonable al recordar que la demora estimada en paradero no recoge el efecto de congestión en paraderos.

En general, se observa una gran consistencia en los datos producto de las tendencias halladas, la magnitud de éstas y la validez que hay detrás del sustento de las explicaciones proporcionadas para entender las tendencias; cuando hay diferencias, se hallaron supuestos razonables compatibles con los valores encontrados y no existen diferencias sistemáticas que sean cuantitativamente significativas, de modo que se puede establecer que la estimación de demora en paraderos genera resultados satisfactorios en el subconjunto de tramos analizados, y dado que se empleó la misma metodología en el resto de los tramos, se valida su aplicación en toda la red. Sin embargo, no es posible realizar comparaciones específicas debido a que el número de datos disponibles es mucho mayor en tramos CP (36 tramos) respecto de tramos SP (6 tramos).

Se determina así que es posible hacer comparaciones con el tiempo medio de viaje de automóviles en tramos con paradero usando el tiempo de viaje neto de buses.

4.3.3. TRAMOS CON PARADERO (CP).

Probada la validez de la estimación de demora en paraderos empleada en la red, se analizaron las tendencias de tiempos de viaje neto de buses y automóviles en tramos con paradero. Así, se graficaron los tiempos de viaje netos de buses y automóviles, diferenciando los datos según el tipo de día.

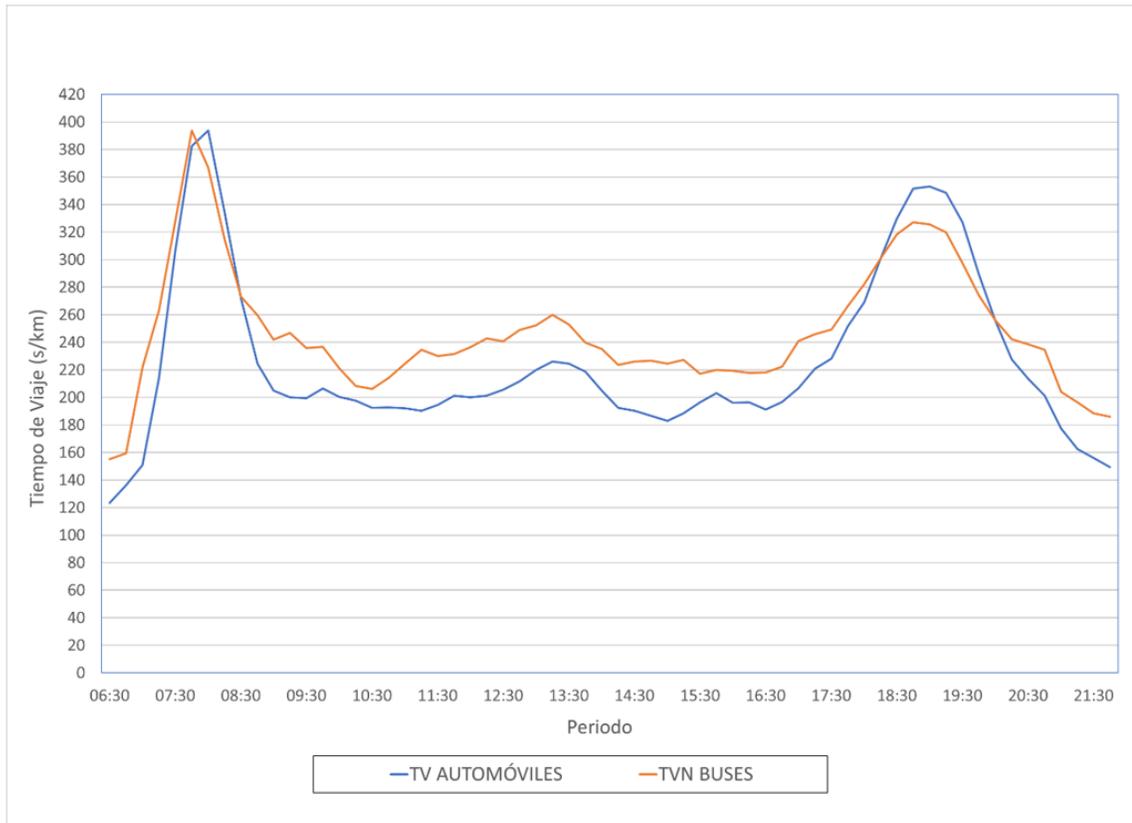


Figura N°4-13 Tiempos de viaje neto promedio de automóviles y buses en tramos con paradero registrados en día laboral (NT-36).

Nuevamente, se observa que en días laborales (Figura 4-13) se mantiene una diferencia estable entre tiempos de viaje de automóviles y buses durante gran parte del día, que es del orden de los 30 segundos y sólo se ve interrumpida en periodos asociados comúnmente a la punta mañana y la punta tarde: durante los primeros periodos del día se aprecian tiempos de viaje neto de buses superiores de manera sistemática y constante hasta las 8:00, donde los tiempos de viaje netos tienden a coincidir hasta el final de la punta mañana; mientras que entre las 18 y las 20 hrs son los automóviles quienes presentan mayores tiempos de viaje por una magnitud promedio de 25 s/km, fenómeno que dista de lo observado anteriormente en tramos sin paradero. El fenómeno que se produce entre 6.30 y 8.00 no es nuevo, puesto que los tramos sin paradero presentaron el mismo patrón, que se observa de manera sistemática en todos los ejes de la red de

estudio. Si bien causas posibles pueden ser un desplazamiento temporal en el registro de datos de automóviles y buses o la inyección de buses del transporte público para regular frecuencias, no existe un fundamento robusto para validar alguna de las hipótesis.

Al examinar detenidamente cada uno de los tramos con paradero presentes en la red se identificó un eje que presenta un comportamiento singular en varios de sus tramos, tanto en sentido norte como en sentido sur. El eje en cuestión es Alessandri, el cual se caracteriza por contar con una pista solo bus por sentido en cada uno de los tramos pertenecientes a la red de estudio. Los tramos NS-4, NS-5, SN-4 y SN-5 son los que evidencian una mayor diferencia en tiempo de viaje neto, exhibiendo los automóviles tiempos de viaje netos superiores en hasta un 130% respecto del de los buses (Figura 4-14).

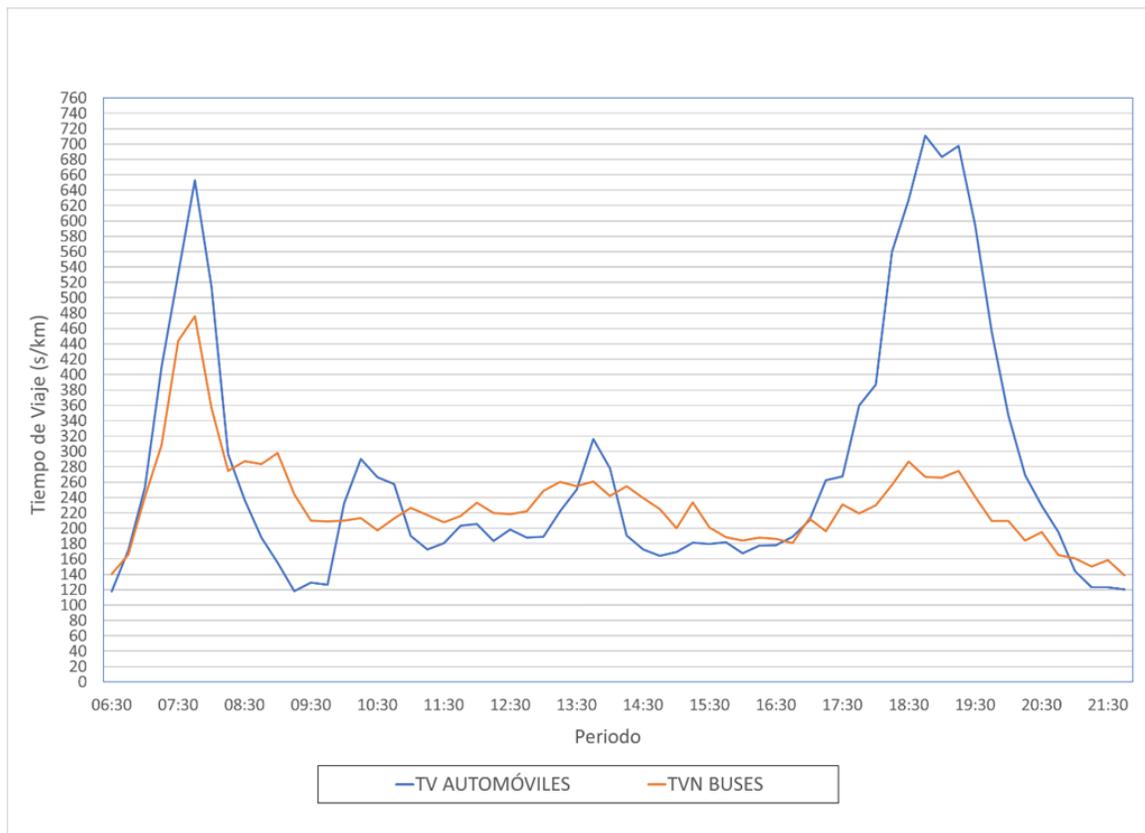


Figura N°4-14 **Tiempos de viaje neto promedio de automóviles y buses en Alessandri SN – 4 registrados en día laboral**

Este fenómeno puede deberse a diversos factores, desde condiciones operacionales propias de los tramos del eje, como virajes a la izquierda e intersecciones congestionadas, hasta el funcionamiento de la pista solo bus. Sin perjuicio de lo anterior, al tratarse de un caso singular se determinó no considerar los tiempos de viaje de automóviles y buses entre 17.15 y 20.45 de días laborales de los tramos NS-4, NS-5, SN-4 y SN-5 de Alessandri (120 tramo-períodos) para el análisis de tendencias globales.

La figura 4-15 muestra las tendencias de tiempos de viaje neto en tramos con paradero sin los valores atípicos asociados a los tramos identificados. En la punta tarde se observa que las tendencias se refuerzan, con tiempos de viaje promedio indistinguibles entre modos cuando los tiempos de viaje son superiores a 260 s/km y una región de transición hacia el régimen sin congestión apreciable. El umbral identificado es el mismo que se encontró en tramos SP y puede estar asociado al inicio de situaciones de congestión severa y la similitud de estos umbrales es un indicativo de que en los tramos con paradero de la red la demora estimada genera resultados bastante precisos.

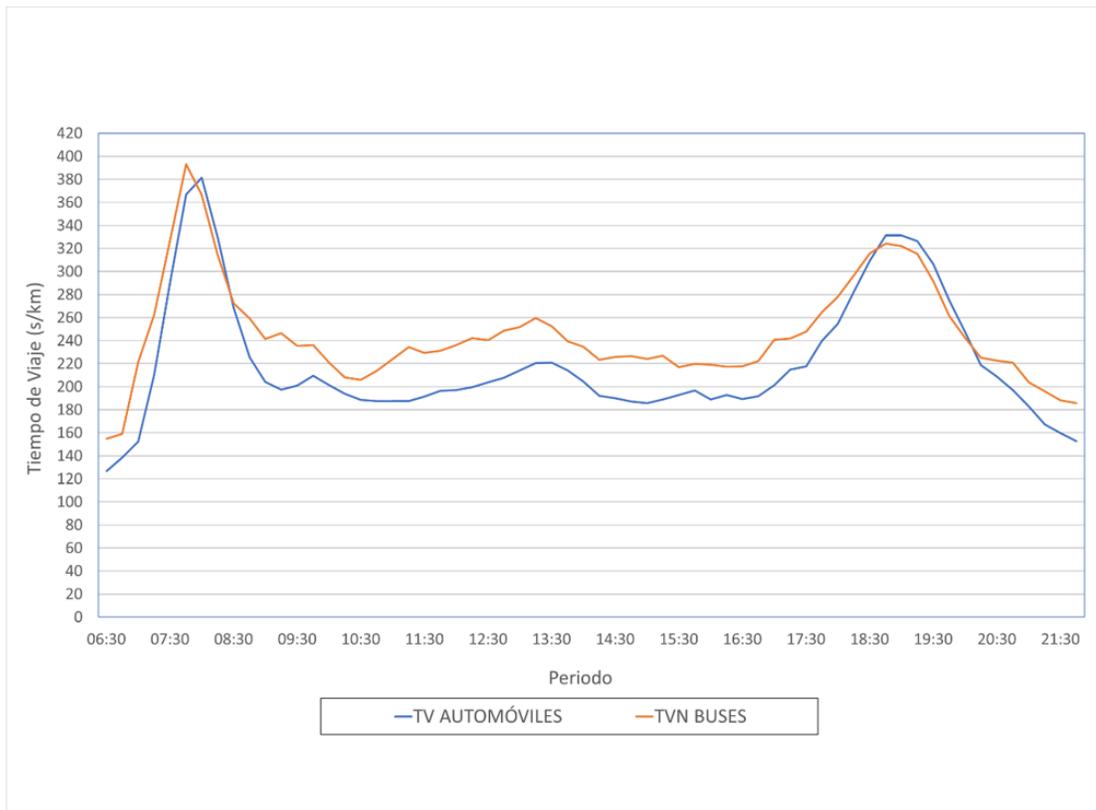


Figura N°4-15 Tiempos de viaje neto promedio de automóviles y buses en tramos CP (sin singularidades) registrados en día laboral (NT-36).

Por otro lado, en días de fin de semana (Figura 4-16) las series de datos presentan una estabilidad notable a lo largo del día, comenzando con valores ascendentes en el tiempo con diferencias del orden de los 30 s/km entre automóviles y buses y que luego disminuyen hasta los 20 s/km en torno a la punta mediodía, para finalmente estabilizarse alrededor de los 25 s/km.

Cabe destacar que se reproduce exactamente el mismo comportamiento a nivel macro que el anteriormente descrito en tramos SP, con la salvedad de que la magnitud de las diferencias pasa de, en promedio, 40 s/km en tramos SP a 25 s/km en tramos CP, lo cual se puede deber principalmente a la disminución de la brecha de tiempo de viaje neto

entre modos conforme aumenta el tiempo de viaje y, en efecto, en tramos CP los tiempos de viaje son sostenidamente más altos para automóviles y buses. Por otro lado, en fines de semana se hace más evidente la pérdida de beneficios por coordinación para buses debido a las detenciones en paradas, que en la mejor condición posible no superarían los 10 s/km. Lo anterior indica que podría existir una subestimación de la demora en paraderos del orden de los 10 s/km, razonable de acuerdo a las magnitudes de los tiempos de viaje y al orden de imprecisión de los datos, que se estima en 10 s/km.

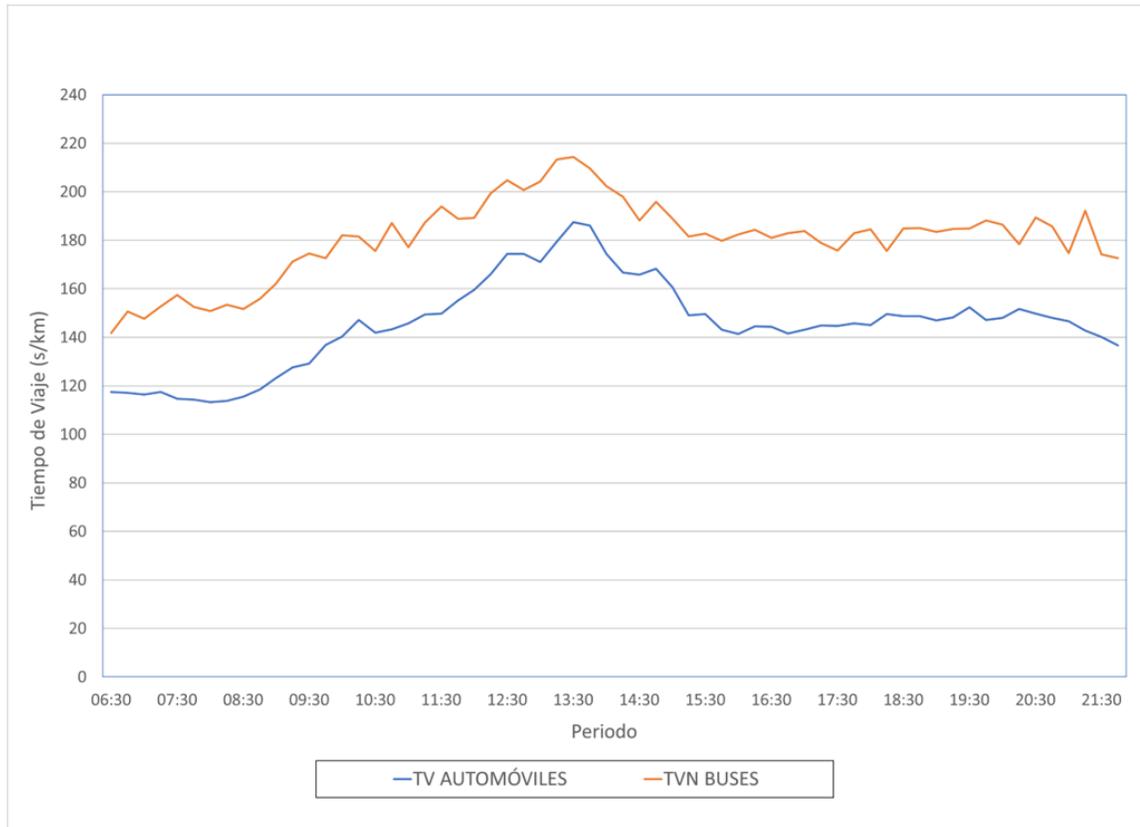


Figura N°4-16 Tiempos de viaje neto promedio de automóviles y buses en tramos con paradero registrados en sábados, domingos y festivos (NT-36).

En el Cuadro 4-3, al igual que en tramos sin paradero, se observa que en día laboral la media de las diferencias es mucho menor respecto de días de fin de semana, tanto en horario punta como fuera de punta. Del mismo modo, la única diferencia que resultó no ser estadísticamente significativa entre automóviles y buses es en días laborales en horario punta, es decir, en presencia de un alto grado de saturación.

Cuadro N°4-3 Comparación estadística de tiempos de viaje neto en tramos con paradero entre automóviles y buses.

Tipo de día	ΔTVN medio (s/km)	$sd(\Delta TVN)$ (s/km)	t-test	
			$p - value$ ($\alpha = 0.05$)	Comparación de medias t-test
Laboral hora punta	6	84	0,371	Diferencia de medias no significativa
Laboral fuera de punta	22	32	2,2e-16	Diferencia de medias significativa
Fines de semana y Festivos	37	42	2,2e-16	Diferencia de medias significativa

En esta sección se ratifican las tendencias exhibidas anteriormente en tramos sin paradero. Si bien se halló una diferencia en el comportamiento de la diferencia de tiempo de viaje neto en la punta tarde de los días laborales, se identificó una anomalía que influía significativamente sobre el promedio de los demás tramos. La diferencia sostenida que existe en el tiempo de viaje neto entre automóviles y buses en presencia de un bajo grado de saturación se incrementa respecto de los tramos sin paradero, debido a la pérdida de beneficios por coordinación en intersecciones semaforizadas para los buses.

4.3.4. TRAMOS INFLUIDOS POR PARADEROS (IP).

Dentro de la red se han identificado dos tramos que si bien, no tienen un paradero en sus dominios, están evidentemente influidos por ellos debido a la proximidad a la que se encuentran. Debido a la construcción de los tramos de la red que derivó en que estos tuvieran su inicio 30 metros aguas abajo de la línea de detención; sumado a que se trabajó con el supuesto de que no existe congestión en paraderos se generaron dos tramos que reciben efectos colaterales de parte de otros tramos CP, provocando que los tramos en cuestión tengan tendencias y magnitudes características distintas al resto de los tramos SP. Estos corresponden a Irrázaval PO – 2 y Alessandri NS – 2, y se han clasificado como “Tramos sin paradero con influencia de paraderos (IP)”, y corresponden a casos singulares hallados en tramos SP.

La Figura 4-17 muestra el tiempo de viaje promedio de buses y automóviles en tramos IP en día laboral. En ella se observa una notable estabilidad de la diferencia entre tiempos de viaje de automóviles y buses, la cual es del orden de los 80 segundos promediando el mediodía y disminuye hasta alcanzar los 60 segundos previo a la punta tarde, que es

donde las curvas se acercan más para luego recuperar la diferencia inicial. Pese a que la magnitud de la diferencia es mayor que en tramos SP y CP, se replican las tendencias halladas en los otros tipos de tramo.

La magnitud de las diferencias entre modos es mayor a la de tramos CP y SP, algo que se presume es debido a que recogería parcialmente el efecto de la demora, e incluso de la congestión, en paraderos. Para verificar que la hipótesis sea admisible se analizó la demora en paraderos en tramos ubicados aguas abajo, obteniéndose un promedio de 78 s/km en el tramo de Irarrázaval y de 68 s/km en el de Alessandri, valores que se ubican muy por sobre el promedio de demora en paraderos en tramos CP, el cual asciende a 35 s/km.

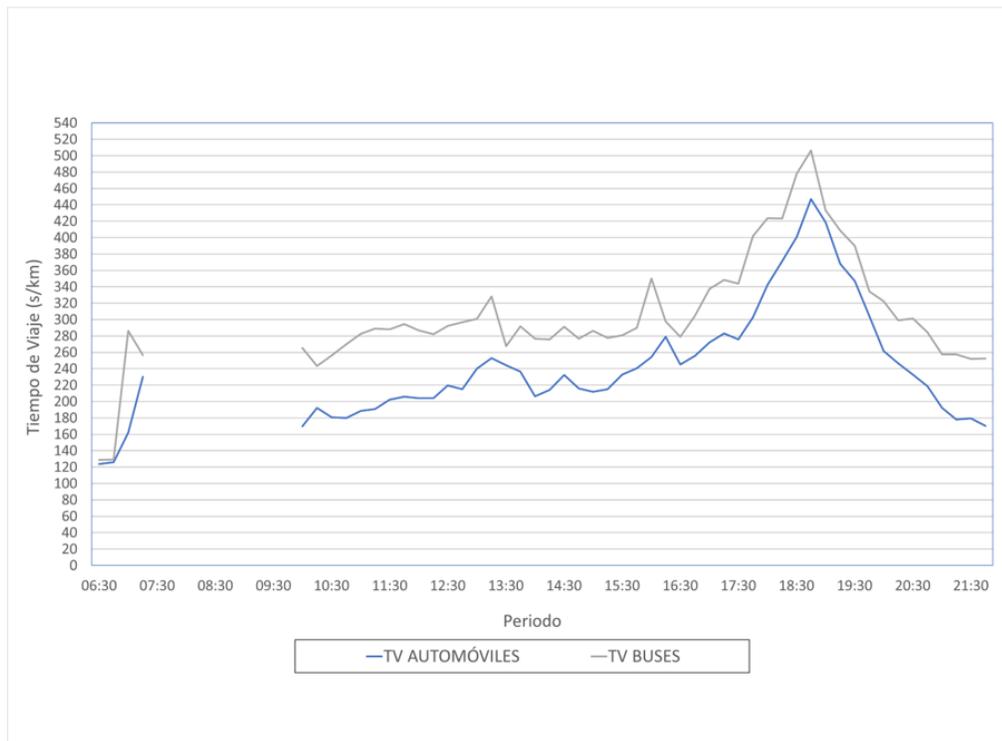


Figura N°4-17 Tiempos de viaje promedio de automóviles y buses en tramos con influencia de paradero registrados en día laboral (NT-2).

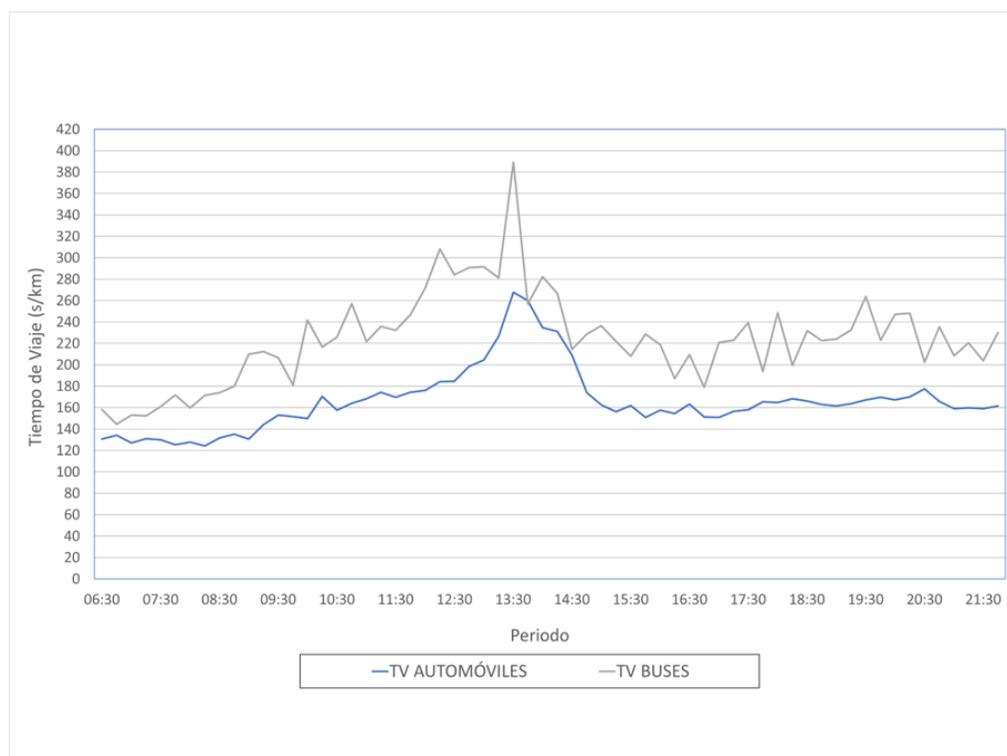


Figura N°4-18 Tiempos de viaje promedio de automóviles y buses en tramos con influencia de paradero registrados en sábados, domingos y festivos (NT-2).

En lo que respecta a días de fin de semana (Figura 4-18), los tramos IP muestran estabilidad en la curva de automóviles mas no así en la de buses. Pese a la alta variabilidad de los datos de buses, se puede establecer que la tendencia es análoga a los tramos SP y CP, con la salvedad de que la magnitud de las diferencias nuevamente es mayor.

La alta variabilidad en los datos de buses se puede deber al número de datos con los que se cuenta (sólo 2 tramos). Al igual que ocurre en días laborales, la magnitud de la diferencia es mayor a la de tramos CP y SP, algo que además de la influencia del factor DP tendría base en características propias de los tramos, recordando que Alessandri NS – 1 cuenta con pista solo bus, esquema de prioridad que no significaría un ahorro de tiempo para buses frente a grados de saturación bajos.

Este hallazgo da cuenta de que los efectos colaterales de un paradero (en particular, el fenómeno de congestión en paraderos) pueden tener un efecto importante sobre un tramo de vía. Al presentar una tendencia completamente distinta al resto de los tramos sin paradero, es fácil identificar estos tramos. Con esto, se puede analizar con mayor detención lo que ocurre en un tramo que presenta un comportamiento atípico, lo cual ilustra el potencial de diagnóstico que tiene esta herramienta.

4.3.5. SÍNTESIS

A través de la comparación de tiempos de viaje neto de automóviles y buses se analizó la consistencia de la base de datos de automóviles. Para ello, se estudió por separado días laborales y de fines de semana, ya que las condiciones de circulación vehicular son notoriamente distintas. Bajo este marco conceptual, se da cuenta de que las tendencias observadas tienen un fundamento sólido, y que cuando éstas presentan un comportamiento atípico, es posible identificar los tramo-períodos que presentan discrepancias y, más aún, hallar una explicación a los valores asociados con base en fenómenos observables en terreno.

Se determina que en tramos sin paraderos existe una buena concordancia de los tiempos de viaje durante el día, mientras que en tramos con paradero se validó la estimación de la demora en paraderos empleada, ya que las diferencias de tiempo de viaje en tramos con y sin paradero hacen sentido.

En suma, estos resultados dan cuenta de que la base de datos de automóviles es consistente, y, por lo tanto, permiten validar los resultados derivados de esta investigación.

5. UNA HERRAMIENTA DE DIAGNÓSTICO.

5.1. SINGULARIDADES.

Producto de la gran variabilidad que presentan los registros individuales de tiempos de viaje de automóviles y buses en sus respectivas bases de datos no es trivial determinar cuándo un dato está reflejando de manera fidedigna la realidad o simplemente constituye un registro erróneo que distorsiona los resultados de los cálculos y pruebas estadísticas. Cuando un dato se escapa de la tendencia central comúnmente se cataloga como outlier o **valor atípico**, con lo cual es descartado de la medición respectiva. Sin embargo, se puede estar cometiendo un error si aquel dato, aunque alejado de los valores promedio, efectivamente representa un fenómeno comprobable en la realidad y la causa de su distanciamiento respecto de la nube de puntos radica en una explicación con sentido y validez. Por este motivo, cabe hacer la distinción entre aquellos valores que aunque están alejados de la tendencia central tienen una explicación razonable y aquellos cuya causa es desconocida. De este modo, se denomina **singularidades** a aquellos valores atípicos que son explicables de manera razonable mediante fenómenos comprobables y que generalmente responden a condiciones físicas u operacionales propias al tramo al que pertenecen. En contraste, un **valor anómalo** no es posible de justificar mediante la información disponible, es decir, no tiene correlato con ninguna situación observada en la calle y, por ende, se trata de un probable error en los datos.

En la sección anterior se examinaron las tendencias en los valores correspondientes a los tiempos de viaje de automóviles y buses en la red de estudio, hallándose una consistencia notable entre ambas bases de datos. Sin embargo, en el transcurso del análisis se encontraron una serie de valores atípicos que fueron catalogados como singularidades, los que fueron detectables cuando las condiciones de buses y automóviles eran muy distintas; y otros como atípicos, dado que no tenían un respaldo robusto dentro de la información disponible.

El Cuadro 5-1 muestra el detalle de la cantidad de datos correspondientes a singularidades y anomalías extraídos de la base de datos.

Cuadro N°5-1 Detalle de proceso de depuración de base de datos – Etapa 2.

Etapa	Datos Iniciales	Datos Finales	Delta Datos	%BD extraída	%BD extraída acumulada
Singularidades y Anomalías	7255	7114	141	1,72%	13,07%

Al analizar ambas bases de datos en conjunto se determinaron una serie de situaciones que fueron delatadas por diferencias poco usuales entre los tiempos de viaje de

automóviles y buses. Si se tratase de un evento que afectara de igual manera a ambos modos, ya sea porque está relacionado con la infraestructura compartida o se debe a un movimiento que realizan ambos, el problema podría identificarse con cualquiera de las bases de datos. No obstante, en el capítulo anterior se exhibieron una serie de casos en los cuales la situación estaba ligada sólo a buses, como en el caso de la pista solo bus de Alessandri próxima al colegio, o sólo a automóviles, como el viraje a la izquierda en un tramo de Irarrázaval, de modo que si contara con datos de un solo modo hubiese sido posible diagnosticar una de las dos situaciones, pero en ningún caso ambas. Esto indica que el contar con una sola base de datos es bastante útil como herramienta de diagnóstico para el modo del cual se disponen registros y en algunos casos para identificar situaciones no asociados a ningún modo en específico; pero se estaría omitiendo información relevante para analizar situaciones que sólo afectan a un modo en particular.

A partir de los casos ilustrados anteriormente surge la posibilidad de elaborar una metodología para la detección de comportamientos irregulares que delaten la presencia de una condición a identificar, es decir, que sea capaz de detectar un problema, pero no la naturaleza del mismo, para lo cual se requeriría complementar la información con una imagen dinámica del área en cuestión para generar el diagnóstico correspondiente.

A pesar de que las singularidades halladas tienen distinta naturaleza, todas comparten el mismo mecanismo de diagnóstico: diferencias sustantivas en los tiempos de viaje que se extienden por al menos una cantidad determinada de tiempo. De manera exploratoria se identifican algunos casos que tienen estas cualidades como un primer acercamiento para identificar los patrones de las singularidades. En el Cuadro 5-2 se resumen las características que reúnen los casos en cuestión.

Cuadro N°5-2 Caracterización de singularidades en la red de estudio.

Tramo	Tipo de día	$\overline{\Delta TV} = [TVB - DP] - TA$ (s/km)	Duración (min)
Alessandri SN - 5	Laboral	345	45
Campo de Deportes SN - 3	Laboral	133	45
Irarrázaval PO - 4	Laboral	-81	165
Irarrázaval PO - 2	Laboral	65	375
	Sábado	70	360
Alessandri NS - 2	Laboral	73	525
	Sábado	70	330
	Domingo	76	360

Pese a que en la mayoría de los casos la singularidad presenta una extensión

considerable, la variabilidad de los datos dificulta la detección algorítmica: los patrones de mayor duración se ven interrumpidos por algunos registros que se alejan de la singularidad y, por ende, para cuantificar su duración real se utilizaron herramientas gráficas. No obstante, un análisis complementario más agregado podría ser empleado para corregir este inconveniente, dado que valores puntuales que interrumpirían la tendencia global serían absorbidos por ésta.

El primer paso es definir los umbrales de tiempo de viaje y duración de la singularidad para que un caso sea candidato a un análisis diferenciado. De acuerdo a la caracterización de los tiempos de viaje efectuada anteriormente, la diferencia de tiempo de viaje promedio más alta se produce en tramos sin paradero en días de fin de semana y es del orden de los 40 s/km; mientras que la menor magnitud de las singularidades halladas es de 65 s/km. Tomando en cuenta imprecisiones del orden de 10 s/km, diferencias en magnitud desde 50 s/km en tramo-períodos sostenidas en el tiempo a favor de los buses podría entonces delatar situaciones fuera de lo común que requieren una mirada adicional. Por otro lado, fenómenos que afecten principalmente la circulación de automóviles podrían ser delatadas por tiempos de viaje netos mayores a los de buses por 10 s/km (nuevamente tomando en cuenta una imprecisión en los datos de 10 s/km). Pese a que estas cifras son comunes en períodos congestionados, su permanencia en el tiempo no lo es, y entonces es la combinación de la diferencia de tiempos entre modos y la duración de tal diferencia, la que, en definitiva, arrojaría la alarma para determinar que es una situación objeto de examinación posterior.

La duración de situaciones singulares es la segunda arista por considerar para determinar los casos que requieren mayor atención. La duración de los casos expuestos en el capítulo anterior varía considerablemente en un rango entre 45 y 525 minutos (Cuadro 5-2), siendo las de menor duración aquellas que presentan la mayor diferencia de tiempo de viaje entre modos. Por este motivo, un umbral de 45 minutos (3 períodos consecutivos) sería suficiente para delatar de manera sistemática todas las singularidades halladas por simple inspección. En consecuencia, serán objeto de análisis todos aquellos valores que cumplan conjuntamente con superar los umbrales de diferencia de tiempos de viaje netos.

Cabe destacar que estos umbrales son válidos y aplicables sólo en esta red, y no necesariamente son extrapolables a otras bases de datos. Sí es relevante replicar la serie de pasos que conduce a la obtención de estos valores.

También es importante precisar en la metodología la agregación de períodos con fines de aplicar un criterio complementario para determinar con mayor precisión la duración de las singularidades. Para evitar que discontinuidades en las tendencias escondan situaciones de interés, se propone agregar los períodos de 15 minutos en sets de 4 períodos, es decir, de una hora, con pasos de 15 minutos; configurando así un filtro adicional a aquellos que examinan valores individuales, siendo la magnitud del umbral diferencias de tiempos de viaje la misma que al examinar un tramo-período particular.

Es imprescindible resaltar que estos umbrales están basados sólo en esta red y su pertinencia en otras redes es motivo de investigación futura. Sin perjuicio de lo anterior, es razonable que el umbral de detección de singularidades adopte un valor mayor para los buses que para los automóviles, lo cual es aplicable para cualquier red.

El Cuadro 5-3 resume los criterios básicos para identificar situaciones donde los buses o los automóviles puedan sufrir efectos de la circulación vehicular que afecten a uno u otro modo, pero no a ambos en conjunto. Para examinar al conjunto de vehículos se abordará posteriormente una herramienta de diagnóstico que permitirá establecer niveles de servicio intersección a intersección, identificando oportunidades de mejora a nivel de la programación de semáforos y otras medidas de gestión de tránsito.

Cuadro N°5-3 Criterios de identificación de candidatos a singularidades.

Casos genéricos	Criterios	
	$\Delta\overline{TV}_i = [TVB - DP] - TA \text{ (s/km)}^4$	Duración (min)
Singularidad centrada en buses	> 50	> 45
Singularidad centrada en automóviles	< -10	> 45

5.2. ANÁLISIS DE INTERSECCIONES DE LA RED

La gestión de tránsito en intersecciones semaforizadas juega un rol importantísimo dentro de una red de transporte, puesto que atender situaciones problemáticas con soluciones de aplicación en el corto plazo podría prevenir o detener la propagación en hasta 4 sentidos de una onda de congestión vehicular. En este contexto, resulta vital conocer el estado de cada una de ellas para poder actuar de manera focalizada ante la detección de un eventual deterioro pronunciado de las condiciones de circulación vehicular. En este sentido, uno de los parámetros más útiles son los tiempos de viaje y más precisamente, su evolución espacio-temporal. Así, el objetivo central de esta herramienta es construir indicadores de la condición de las intersecciones a partir de los tiempos de viaje disponibles a nivel de tramo-períodos.

En el Capítulo 6 se abordará la identificación de 3 niveles de congestión o estados del tráfico, los cuales presentan características y tendencias distintivas que permiten establecer claras diferencias entre ellos y están asociados a características de la circulación vehicular para automóviles. Se determina un umbral a partir del cual los tiempos de viaje netos de automóviles y buses se hacían indistinguibles, y, por ende, la transición entre el Nivel 2 y el Nivel 3 se establece en 240 s/km para los automóviles y buses. Sin embargo, en la región que divide los Niveles 1 y 2 existen ventajas de tiempo

⁴ $\Delta\overline{TV}_i$ corresponde al promedio de la diferencia de tiempo de viaje asociada al período i.

de cruce en automóviles que se ven plasmadas en los tiempos de viaje, de modo que no es adecuado adoptar el mismo umbral para los buses. A partir de los resultados del modelo conjunto de los Niveles 1 y 2 (ver Capítulo 7), se define el umbral de transición entre estos niveles como el límite establecido para los automóviles más la diferencia de tiempo de cruce entre modos, es decir, 195 s/km.

Dicho esto, el desafío radica en cómo construir los indicadores a partir de los niveles de congestión definidos. En efecto, existe un modo de caracterizar a cada tramo-período de la red con Niveles de Congestión asociados a automóviles y a buses. Por construcción, cada uno de estos tramo-períodos comprende 1 ó 2 intersecciones semaforizadas, las cuales tienen entre 2 y 4 accesos, dependiendo del caso. Cuando un tramo período abarca sólo una intersección, el nivel de flujo vehicular se mantiene constante entre el inicio del tramo y la línea de detención más próxima, a partir de la cual los flujos cambiarán en función de los movimientos permitidos en cada intersección. Sin embargo, considerando que los tramos tienen una longitud promedio de 330 metros y siempre inferior a los 400 metros, es razonable considerar que el nivel de congestión, independiente de lo que ocurra en los 30 metros que hay entre la línea de detención y el tramo siguiente, describe de manera fidedigna el tramo completo, y, en consecuencia, a la intersección contenida en él. En cambio, si un tramo contiene dos intersecciones el nivel de congestión indica de manera menos precisa qué ocurre en cada sub-tramo delimitado por las líneas de detención, dado que el nivel de agregación no permite identificar situaciones particulares ligadas a cada sub-tramo y, en consecuencia, no es posible determinar el nivel de homogeneidad del estado del tráfico.

La red consta de 26 intersecciones semaforizadas, de las cuales en 20 se dispone de datos de al menos dos accesos perpendiculares entre ellos. De estas 20 intersecciones, 18 de ellas pertenecen a tramos que cubren dos intersecciones semaforizadas. Debido a la imprecisión que significa asociar más de una intersección a un tramo, se trabajará con el supuesto de que el paso medio de los automóviles y buses es relativamente homogéneo dentro de un mismo tramo y su variabilidad es tal que se mantienen dentro del mismo nivel de congestión durante todo el tramo, lo cual es bastante razonable si se toma en cuenta que se definieron sólo tres estados del tráfico con intervalos lo suficientemente amplios. Dicho esto, es factible caracterizar a cada intersección a partir de un indicador que dependa del nivel de congestión asociado a los tramos que la contienen, es decir, es posible etiquetar a cada uno de los accesos con un nivel de congestión entre 1 y 3. En consecuencia, cada intersección quedará caracterizada por un vector de niveles de congestión, para automóviles y buses, mediante el cual se podrá establecer su categoría mediante una jerarquización acorde a los escenarios posibles, los cuales son, ordenados en nivel ascendente de criticidad:

- a) Grado 1: todos los accesos de la intersección se encuentran en Nivel 1, es decir, no existe congestión apreciable.

- b) Grado 2: todos los accesos se encuentran a lo más en Nivel 2. Puede que exista cola excedente en algunos accesos, pero el nivel de servicio es satisfactorio; la congestión es tolerable.
- c) Grado 3: pertenecen a esta categoría aquellas intersecciones que presentan al menos un acceso en Nivel 3 en una dirección, pero todos en Nivel 2 o inferior en las ramas perpendiculares. Esto indica que podría haber un escenario de mejora, dado que un eje está en una situación desfavorable en relación a su par perpendicular. La forma de plasmar una mejoría en el cruce depende netamente de las características propias del mismo, teniendo como alternativas medidas de gestión de tránsito como un cambio en la programación semafórica.
- d) Grado 4: una intersección está en Grado 4 cuando existe al menos un acceso por eje que está en nivel 3.
- e) Grado 5: todos los accesos se encuentran operando en Nivel 3, es decir, existe una congestión severa en la intersección y se generan bloqueos con alta probabilidad.

Para ilustrar de mejor manera cómo es aplicable esta categorización a una intersección cualquiera, se presentará a continuación un ejemplo con un cruce semaforizado de la red. La Figura 5-1 muestra los niveles de congestión de una intersección donde únicamente circulan automóviles, correspondiente al cruce de José Domingo Cañas con Los Tres Antonios.

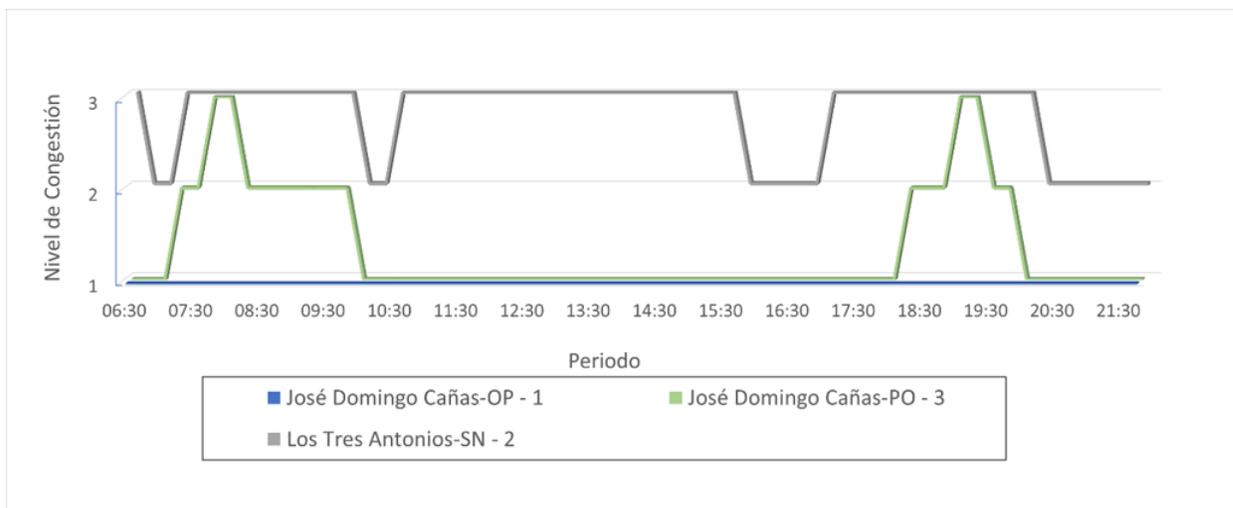


Figura N°5-1 Niveles de congestión en automóviles en intersección José Domingo Cañas esquina Los 3 Antonios.

Debido a que los Niveles de Congestión varían período a período y considerando que la jerarquización de las intersecciones está en función de estos, se puede describir a la intersección mediante su grado cada 15 minutos (Cuadro 5-4).

Cuadro N°5-4 Clasificación de intersección J. D. Cañas / Los 3 Antonios en día laboral.

Periodo	Categoría int.	Periodo	Categoría int.
6:30	3	15:30	3
6:45	2	14:00	3
7:00	2	14:15	3
7:15	2	14:30	3
7:30	3	14:45	3
7:45	3	15:00	3
8:00	4	15:15	3
8:15	4	15:30	3
8:30	3	15:45	3
8:45	3	16:00	3
9:00	3	16:15	3
9:15	3	16:30	3
9:30	3	16:45	3
9:45	3	17:00	3
10:00	2	17:15	3
10:15	2	17:30	3
10:30	2	17:45	2
10:45	3	18:00	2
11:00	3	18:15	2
11:15	3	18:30	2
11:30	3	18:45	2
11:45	3	19:00	2
12:00	3	19:15	4
12:15	3	19:30	4
12:30	3	19:45	3
12:45	3	20:00	3
13:00	3	20:15	3
13:15	3	20:30	2
13:30	3	20:45	2
13:45	3	21:00	2
14:00	3	21:15	2
14:15	3	21:30	2
14:30	3	21:45	2
14:45	3		
15:00	3		
15:15	3		

Del Cuadro 5-4 se desprende que en la intersección del ejemplo existe un tiempo de permanencia en un determinado grado que comprende varios períodos, lo cual resulta bastante útil para definir cuál sería el segmento horario crítico o, en otras palabras, la hora punta ligada a esta intersección a partir de su condición.

Otra de las aristas interesantes guarda relación con la condición particular que presenta el Grado 3, predominante en el ejemplo antes expuesto. Precisamente, en la Figura 5-1 se observa que durante gran parte del día ambos accesos correspondientes al eje José Domingo Cañas se encuentran en Nivel 1, mientras que el acceso perpendicular a ellos en el eje Los 3 Antonios está mayoritariamente en Nivel 3, lo que refleja una clara disparidad en lo que respecta a demoras en intersecciones en cada eje. Así, hay una variedad de situaciones donde conviene mirar una intersección de manera individual y otras donde es necesario mirar un grupo de intersecciones de la red. Por este motivo, conviene adoptar una mirada más amplia del fenómeno, como podría ser un eje o un subconjunto de la red.

Para ilustrar el concepto anterior hará el ejercicio con el eje Pedro de Valdivia, un eje representativo al regirse bajo un esquema de tráfico mixto sin segregación alguna. En él se dispone información de 4 ejes que lo intersectan: (de norte a sur) Eduardo Castillo Velasco (ECV), José Domingo Cañas (DC), Dublé Almeyda (DA) e Irrazábal (IRA). Con excepción de José Domingo Cañas, todos estos ejes antes mencionados presentan flujo de buses del transporte público. Las Figuras 5-2 y 5-3 muestran el grado de congestión de la intersección promedio durante el día para automóviles y buses, respectivamente.

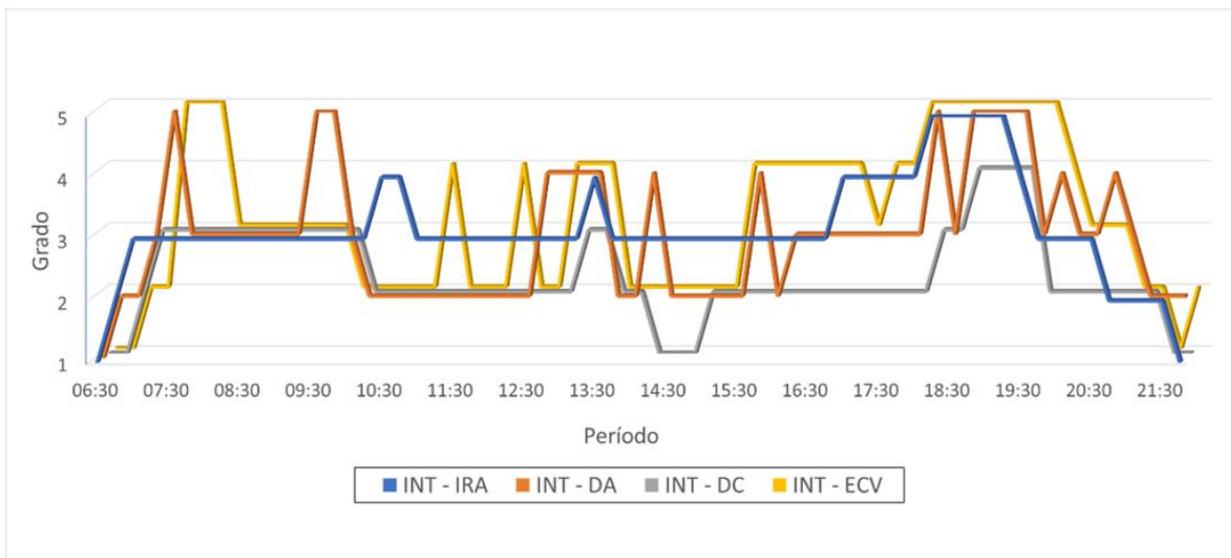


Figura N°5-2 Grado de congestión en eje Pedro de Valdivia, según automóviles, en día laboral.

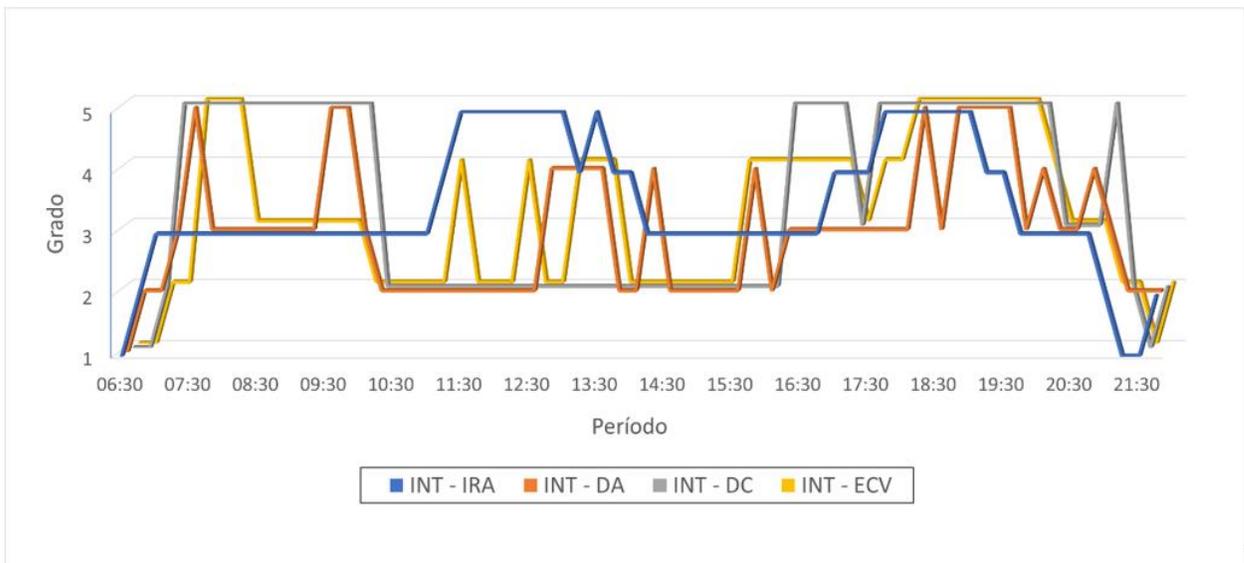


Figura N°5-3 Grado de congestión en eje Pedro de Valdivia, según buses, en día laboral.

En términos generales se aprecia que no existen grandes diferencias en las tendencias halladas en buses y automóviles. Sin embargo, cuando existen discrepancias los buses se encuentran en una situación mucho más crítica, como se observa en la intersección con José Domingo Cañas en punta mañana e Irarrázaval promediando el mediodía; situaciones que requieren una mirada profunda para hallar la raíz de estas diferencias, y entonces conviene mirar de manera más desagregada el problema. Las Figuras 5-4, 5-5, 5-6 y 5-7 muestran las curvas de grado de congestión según modo de manera individual.

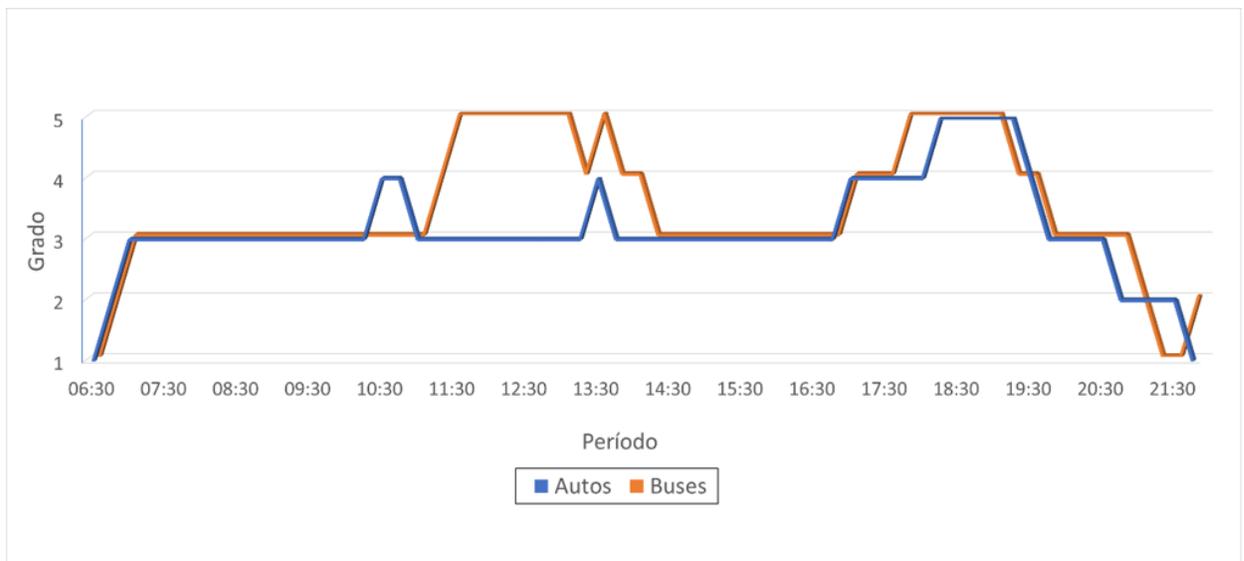


Figura N°5-4 Grado de congestión en Pedro de Valdivia esquina Irarrázaval en día laboral.



Figura N°5-5 Grado de congestión en Pedro de Valdivia esquina Dublé Almeyda en día laboral.



Figura N°5-6 Grado de congestión en Pedro de Valdivia esquina José Domingo Cañas en día laboral.



Figura N°5-7 Grado de congestión en Pedro de Valdivia esquina Castillo Velasco en día laboral.

Queda en evidencia la variedad de situaciones de tráfico que existen en intersecciones consecutivas. Mientras que en las intersecciones de Pedro de Valdivia con Castillo Velasco y Dublé Almeyda los buses y automóviles muestran un comportamiento idéntico en cuanto a grados de congestión en la intersección de Pedro de Valdivia con José Domingo Cañas los buses presentan un grado de congestión sostenidamente más alto que el de los automóviles, lo cual podría delatar que hay una condición operacional que perjudica en mayor medida a este modo.

Además de la comparación entre modos, la perspectiva temporal aporta evidencia para detectar períodos críticos por intersección y focos de congestión que son los que, en definitiva, generan efectos en cadena. Así, la permanencia sobre un umbral definido en torno al grado de la intersección dictaminará qué intersecciones son prioritarias dentro de la red. En este contexto, también resulta muy relevante decidir a qué modo de transporte se atenderá con mayor urgencia, puesto que las condiciones de tráfico entre ellos varían sustancialmente entre tramo-períodos. En el ejemplo de la Figura 5-3 la intersección prioritaria entre 6:30 y 10:30 es Dublé Almeyda, mientras que la que presenta menor congestión es Irrázaval, tendencia que se invierte en los períodos siguientes (de 10:30 a 14:00).

En definitiva, todas estas aristas a considerar dan cuenta de la complejidad del problema y de sus múltiples dimensiones. Resulta imprescindible trabajar de manera conjunta con la categorización de intersecciones y con el nivel de congestión por acceso; la primera para identificar y etiquetar las distintas situaciones que despierten una alarma y el segundo para focalizar aquellos períodos en los cuales es posible intervenir y generar una solución acorde a la realidad de la intersección. En este caso existe un gran número

de intersecciones que permanecen en Grado 3, el cual en el papel representa aquella situación con el mayor potencial de mejora, aunque en la realidad todo dependerá de las condiciones propias de la intersección.

Esta herramienta apunta a la detección de puntos y períodos críticos en los cuales una intersección pueda mejorar el nivel de servicio a través de una intervención sencilla. Como se mencionó anteriormente, un cambio en la programación de semáforos podría ser una alternativa valiosa para minimizar colas y demoras en los accesos que se encuentran en peor estado porque es una de las soluciones más fáciles de implementar.

En síntesis, este instrumento tiene un gran potencial para, entre otros alcances:

- Identificar y jerarquizar las intersecciones de acuerdo al grado de congestión que presenten.
- Determinar el (o los) período punta dentro de una red o un subconjunto de esta.
- Determinar el margen de acción en una determinada intersección de acuerdo a su grado. Este margen es mayor en intersecciones cuyos accesos más cargados están en una misma dirección que en el caso contrario.
- Crear un mapa de intersecciones según su estado para identificar patrones espacio-temporales de aquellas intersecciones que requieren un mayor nivel de intervención, para generar soluciones a mediano plazo que impliquen modificaciones profundas sobre el sistema de transporte del área de influencia.
- Identificar aquellas intersecciones en las que el nivel de servicio de automóviles sea sustancialmente mejor que el que presentan los buses, con el objeto de evaluar la implementación de medidas de gestión de tránsito que beneficien a los buses del transporte público.
- En el largo plazo, generar una aplicación en tiempo real que, a partir de un registro histórico de niveles de servicio de intersecciones, monitoree situaciones anormales, efectos de medidas de gestión de tránsito, modificaciones estructurales, cambios en programaciones de semáforos, etc.

6. COMPARACIÓN DE TIEMPOS DE VIAJE POR MODO

6.1. MARCO DE ANÁLISIS

Anteriormente se hallaron con claridad tres regímenes presentes a lo largo de un día a partir del estudio de los tiempos de viaje. En un extremo, períodos con tiempos de viaje muy altos, asociados a un estado de congestión significativa; en el otro, períodos con tiempos de viaje de bajos a moderados y estables, asociados a escenarios sin congestión. En el primero, se encontró que el tiempo de viaje de los autos y el tiempo de viaje neto de los buses tienden a igualarse, mientras que, en el segundo, hay una diferencia sistemática y estable en favor de los autos. El tercer régimen es de convergencia de un estado hacia el otro. En función de aquello, el propósito es estudiar la red y particionar la base de datos según las situaciones de congestión presentes, que se designarán como *Niveles*. Para tales efectos, se considerarán los tramo-períodos de manera individual y la variable de estudio será la diferencia de tiempo de viaje neto entre automóviles y buses (DifTVN).

El problema de asociar tramo-períodos a niveles es complejo, ya que existe una gran dispersión en los datos (Figura 6-1). Hay condiciones distintas según la perspectiva que se adquiera (automóvil o bus), pero es necesario determinar un criterio para particionar la base de datos. Dicho esto, se emplearán los datos de automóviles como referencia porque son directos; en cambio, el tiempo de viaje neto de buses tiene una componente estimada (la demora en paraderos) mediante un modelo que no asegura precisión para cada tramo-período.

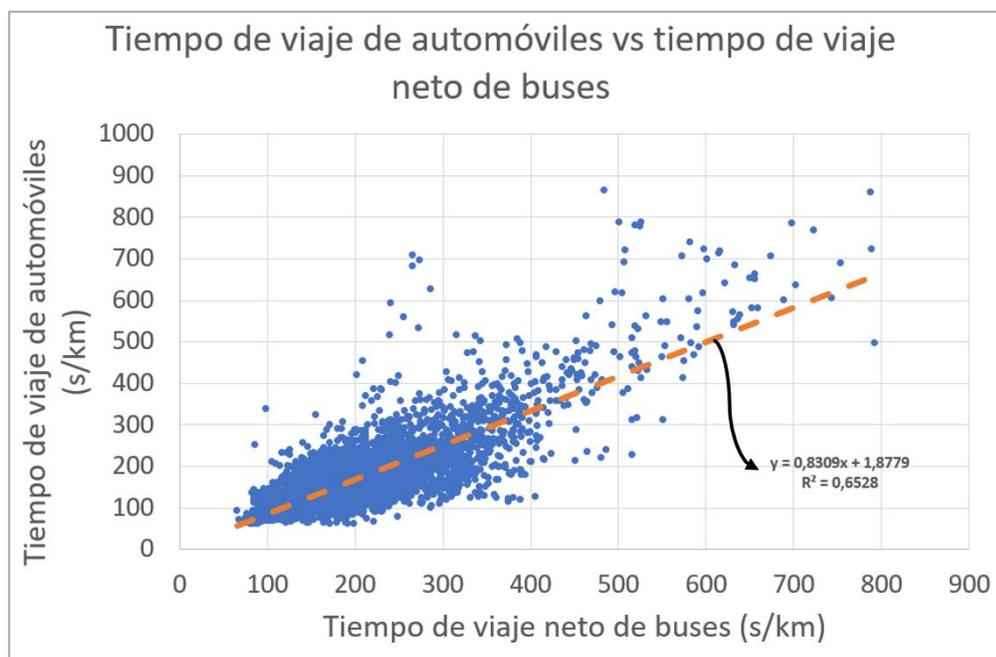


Figura N°6-1 Tiempo de viaje de automóviles vs tiempo de viaje neto de buses en la red.

Dado que, cuando hay congestión, el tiempo de viaje está directamente relacionado con la cantidad de vehículos en circulación y la capacidad de la red, es posible distinguir estados o niveles del tráfico y caracterizarlos de acuerdo a intervalos del tiempo de viaje. Como los tramos son relativamente homogéneos, la distribución del tiempo de viaje de automóviles podría representar como varía el mismo en un tramo promedio. Así, se construyó un histograma de frecuencia de tiempos de viaje en automóviles para determinar la conformación de los niveles de congestión (Figura 6-2).

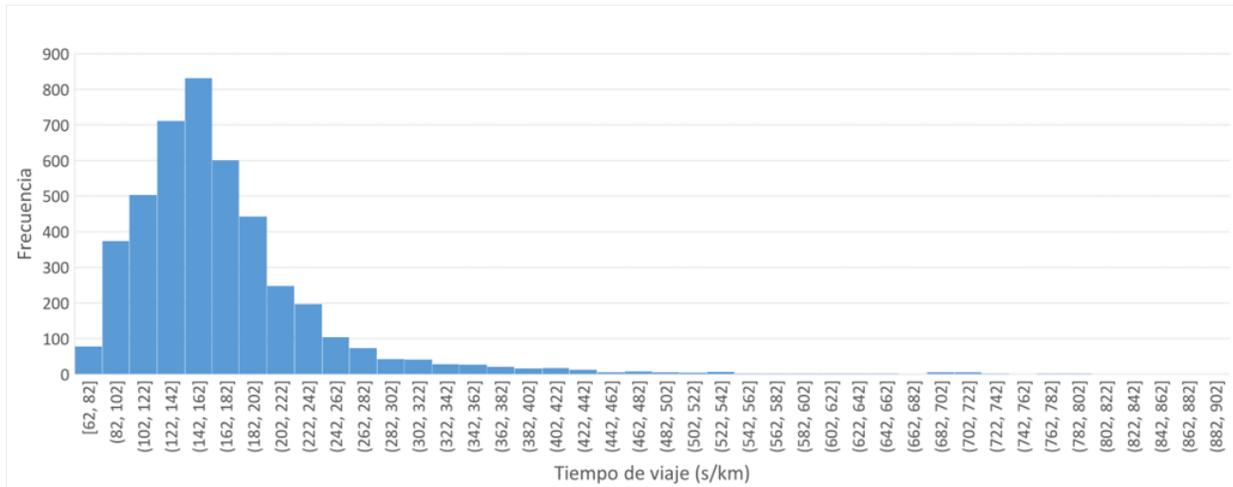


Figura N°6-2 Histograma de tiempos de viaje de automóviles.

El comportamiento del histograma es útil para determinar cuándo empiezan las situaciones de congestión y cuándo ésta se hace significativa. En la Figura 6-2 se aprecia que existe un quiebre en la simetría de la distribución y un cambio en la pendiente de la misma a partir del intervalo de los 162-182 s/km, sugiriendo un cambio en las condiciones de circulación vehicular. Además, 180 s/km es equivalente a una velocidad de 20 km/h, la cual si se consideran las diversas detenciones es razonable como límite para un nivel en el que no existe congestión apreciable. Por otro lado, en el entorno del intervalo 222-242 s/km se observa un comportamiento que adquiere una forma exponencial, es decir, sugiriendo el inicio de fenómenos no lineales. 240 s/km equivale a una velocidad de 15 km/h, otro valor típico para identificar una condición límite; sin embargo, este valor se validará con el análisis subsiguiente.

La propiedad fundamental del nivel asociado a congestión significativa que se encontró en el análisis previo es que la diferencia de tiempo de viaje neto entre autos y buses tiende a anularse en promedio. Si se considera como límite los 240 s/km, el promedio de la diferencia de tiempo de viaje neto entre automóviles y buses (DifTVN) en el intervalo que comprende desde dicho umbral hasta el valor máximo del tiempo de viaje de automóviles es de 0,5 s/km, es decir, satisface la condición de una diferencia de DifTVN prácticamente nula.

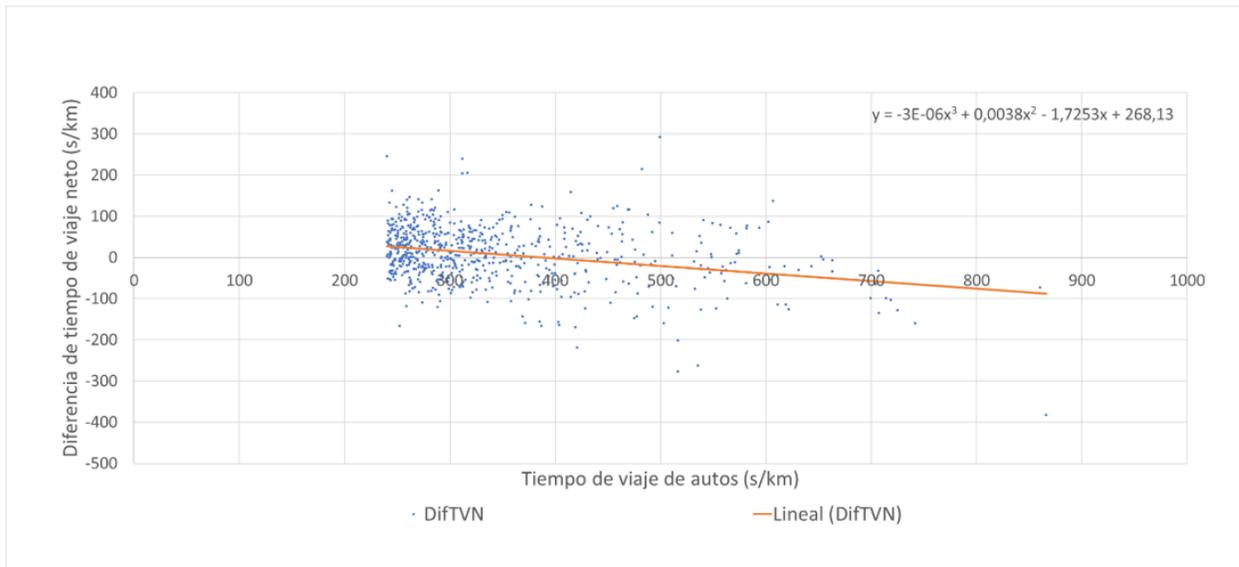


Figura N°6-3 Diferencia de tiempo de viaje neto en función del tiempo de viaje total de automóviles, para tiempo de viaje de autos (TVA) mayor a 240 s/km.

En la Figura 6-3 se observan valores negativos de DifTVN, lo que se explica fundamentalmente por la utilización de tiempo de detención por congestión para realizar transferencia de pasajeros en el nivel más alto.

En virtud de lo anterior, se determinaron 3 niveles de congestión o estados del tráfico para particionar los tramo-períodos de la red. Cada uno de estos se asigna a un nivel en función del respectivo tiempo de viaje de los autos. Los niveles quedan definidos como sigue:

- El Nivel 1 va desde 0 a 180 s/km y se caracteriza por encontrarse en un estado en el que no hay congestión apreciable.
- El Nivel 2 va desde 180 s/km a 240 s/km y es un estado intermedio en el cual la congestión es moderada.
- El Nivel 3 va desde los 240 s/km hasta los 870 s/km, que es el máximo valor registrado. Este nivel va desde situaciones en que la congestión se hace significativa hasta escenarios que presentan bloqueos severos.

6.2. CARACTERIZACIÓN DE LA DIFERENCIA DE TIEMPO DE VIAJE NETO EN LOS DISTINTOS NIVELES DE CONGESTIÓN.

Una vez determinada la partición de los datos según nivel de congestión, es de interés estudiar en detalle los fenómenos que dan lugar en cada uno de los regímenes antes definidos. Si bien existen nociones proporcionadas por el análisis de consistencia antes elaborado, es imprescindible determinar si efectivamente las tendencias halladas tienen

respaldo en el aspecto cuantitativo: hasta el momento se ha puesto énfasis en el aspecto cualitativo de los fenómenos ligados a la circulación vehicular, pero aún no se han examinado en profundidad las magnitudes asociadas a dichos fenómenos.

6.2.1. DEPURACIÓN DE LA BASE DE DATOS.

Antes de caracterizar los niveles de congestión es necesario definir qué datos se van a utilizar. Anteriormente se mencionó que la base de datos de buses fue sometida ya a un procedimiento de detección de outliers, pero se desconoce por completo cuál es el procedimiento al cual son sometidos los datos de automóviles provistos por Waze. Sin perjuicio de lo anterior, la validación de los datos de automóviles efectuada en el análisis de consistencia permite trabajar sobre una base única que incorpore tiempos de viaje de ambos modos, para lo cual nuevamente es necesario someter a un tratamiento los datos.

Previamente, se eliminaron todos los datos nulos, es decir, sin una magnitud asociada, así como los Tramos IP, dado que pese a no contar con paradero puede haber una componente de demora en paraderos proveniente desde una parada perteneciente a un tramo adyacente, influyendo en los tiempos de viaje. Luego, se aplicó sobre la base de datos un mecanismo de detección de singularidades, valores atípicos explicables de manera razonable a partir de fenómenos observables y, por otra parte, anomalías, valores alejados de una tendencia muy marcada cuyo origen es desconocido. Los valores anómalos se identificaron separadamente para cada modo.

Hasta aquí se trabajó con valores promedio por período del tiempo de viaje (total o neto) en la red para cada modo, pero ahora la variable relevante será la diferencia de tiempo de viaje neto para cada tramo-período. Es necesario revisar los datos para detectar posibles anomalías que puedan afectar de forma significativa los valores individuales de dicha diferencia, aunque no hayan tenido mayor efecto para el trabajo con promedios.

Una anomalía de este tipo se encontró en relación con la frecuencia de detenciones en paraderos (ndp). Esta variable presenta valores por sobre la cota admisible que dicta el sentido común: existen tramo-períodos que presentan un índice de frecuencia de detenciones en paraderos mayor a 4 det/km, lo que en la práctica podría llegar a suceder, pero es muy improbable. Estos valores improbables seguramente conducen a una sobreestimación de la demora en paraderos con el modelo empleado, ya que a cada detención se le asocia un tiempo perdido de magnitud importante (del orden de 13 s). Esto se traduciría en una subestimación relevante de la diferencia de tiempo de viaje neto. Por este motivo estos datos deben ser descartados.

Estos valores llaman a revisar el procesamiento de los datos de buses recibidos, aunque no se encontraron situaciones similares en los estudios previos de Schneider (2013) y Cubillos (2018). En ellos, los valores máximos eran algo inferiores a 4, que es el límite que se aplicó aquí. En la revisión debería prestarse atención a que la estimación de una

frecuencia de detenciones en paradero excesiva esté relacionada con la presencia de fenómenos de congestión en paraderos.

Adicionalmente, se restan del análisis los primeros períodos del día (entre 6:30 y 7:15 hrs), debido a que exhiben un comportamiento singular, el cual podría tener relación con la inyección de buses al sistema durante las primeras horas del día para regulación de frecuencias. Estos son períodos de nula o baja congestión pero que aportan una cantidad importante de datos que podrían alterar el análisis cuantitativo del respectivo nivel.

Por último, se extraen marginalmente nuevos valores anómalos detectados a partir del análisis de tendencias por nivel.

El Cuadro 6-1 presenta un resumen de las distintas etapas que contempló la depuración de la base de datos y las cantidades eliminadas en cada una de ellas.

Cuadro N°6-1 Detalle de proceso de depuración de base de datos – Etapa 3.

Etapa	Datos Iniciales	Datos Finales	Delta Datos	%BD extraída	%BD extraída acumulada
sin NDP>4	7114	6668	446	5,45%	18,52%
Remoción períodos (6:30 a 7:15)	6668	6331	337	4,12%	22,64%
Anomalías Niveles	6331	6283	48	0,59%	23,23%

6.2.2. CARACTERIZACIÓN DE NIVELES DE CONGESTIÓN

6.2.2.1 Rasgos generales.

Definida la base de trabajo y los límites entre niveles, es posible determinar la representatividad de cada uno de ellos período a período. El Cuadro 6-2 muestra la distribución de los tramo-períodos entre niveles y la Figura 6-4 la describe según hora del día.

Cuadro N°6-2 Distribución de los tramo-períodos

	Laboral		Fin de semana	
	N°	%	N°	%
Nivel 1	836	42,8	3655	84,4
Nivel 2	618	31,6	572	13,2
Nivel 3	499	25,6	103	2,4
Total	1953	100,0	4330	100,0

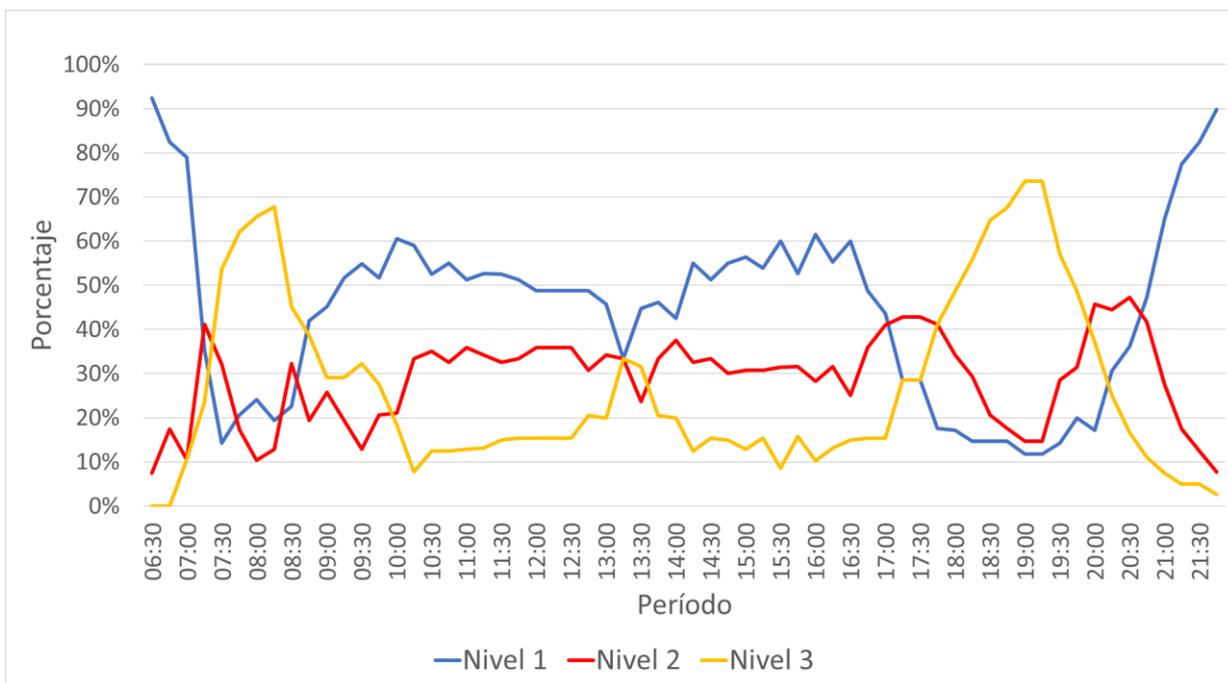


Figura N°6-4 Porcentaje de tramos en cada nivel por período en día laboral

En la Figura 6-4 destaca que en períodos comúnmente asociados a horas punta mañana y tarde predomina el Nivel 3, mientras que en los períodos fuera de punta domina en presencia el Nivel 1. El Nivel 2, por otra parte, representa menos del 50% de los tramos en todos los períodos, siendo estable su proporción en fuera de punta y muy inestable en períodos punta, al tratarse de un estado de transición entre los niveles adyacentes.

Para analizar las magnitudes características de cada nivel y comprender su variación, se han definido periodizaciones en día laboral, que se detallan a continuación:

- Punta mañana: Corresponde al intervalo comprendido entre las 7:15 hrs y las 10:00 hrs.
- Fuera de punta: Corresponde al intervalo comprendido entre las 10:00 hrs y las 17:30 hrs.
- Punta tarde: Corresponde al intervalo comprendido entre las 17:30 hrs y las 20:30 hrs.

En días de fin de semana no existe periodización debido a que no existen tendencias sistemáticas asociables a un período de tiempo en particular.

En los análisis subsiguientes el foco se centrará en el comportamiento de la diferencia de tiempo de viaje neto entre automóviles y buses (DifTVN) y en la proporción de tramos por nivel con datos válidos en cada período.

En primera instancia, se abordarán los niveles a partir del promedio de DifTVN y la proporción de tramos del nivel en cada período, con el objeto de caracterizar el cuadro global de la variación de DifTVN.

El Cuadro 6-3 muestra el rango de valores que abarca el promedio de DifTVN por período y la representatividad de los tramos en cada nivel, de acuerdo al tipo de día y la periodización definida anteriormente. En los períodos definidos como punta mañana y punta tarde predomina el Nivel 3, mientras que en el período fuera de punta predomina el Nivel 1, siendo esto consistente con los conceptos de hora punta y fuera de punta. Hay menor proporción de tramos en Nivel 3 en la punta mañana que en la tarde, seguramente por la aplicación de esquemas de gestión de tránsito en ejes importantes de la red en ese período.

El Nivel 2 tiene una representación similar en los tres períodos de día laboral, sin embargo, tiene un bajo porcentaje en fin de semana, dado que predomina con un 84.6% el Nivel 1, lo cual es razonable dado que el flujo vehicular es menor y en general no se origina congestión severa. Por otro lado, la magnitud del rango en el que se mueve DifTVN exhibe una tendencia creciente con el nivel.

Cuadro N°6-3 Caracterización de niveles de congestión

Nivel	Tipo de Día	Periodo	Rango DifTVN (s/km)	Proporción Tramos (%)
Nivel 1	Laboral	Punta Mañana	[9,1;36,3]	36,5
		Fuera de Punta	[14,2;48,5]	52,3
		Punta Tarde	[17,9;44,6]	18,5
	Fin de Semana	-	[30,1;48,2]	84,6
Nivel 2	Laboral	Punta Mañana	[19,5;46,3]	23,1
		Fuera de Punta	[22,2;53,9]	32,6
		Punta Tarde	[10,1;46,3]	31,1
	Fin de Semana	-	[1,5;52,9]	13,0
Nivel 3	Laboral	Punta Mañana	[-25,6;37,3]	40,4
		Fuera de Punta	[-37,5;44,8]	15,1
		Punta Tarde	[-30,9;21,2]	50,5
	Fin de Semana	-	[-101,8;161,0]	2,4

Por otra parte, el Cuadro 6-4 muestra el promedio de los tiempos de viaje neto por modo y su diferencia para cada nivel, según tipo de día y de tramo. Los promedios se obtienen de los datos individuales por tramo-período en cada categoría.

Cuadro N°6-4 Tiempo de viaje neto por modo y su diferencia (s/km)

	Tipo de Tramo	Con paradero			Sin paradero		
Tipo de Día	Nivel	TVA (s/km)	TVB neto (s/km)	DIF (s/km)	TVA (s/km)	TVB neto (s/km)	DIF (s/km)
Laboral	1	142,6	176,3	33,7	137,3	168,9	31,6
	2	207,1	237,9	30,8	208,1	237,6	29,5
	3	348,0	343,2	-4,8	377,5	380,5	3,0
Fin de semana	1	128,7	166,9	38,2	110,2	154,3	44,1
	2	200,6	227,6	27,0	198,5	229,6	31,1
	3	304,8	325,4	20,6	299,7	300,6	0,9

Aunque la cantidad de tramos sin paradero es muy inferior a la de tramos que lo tienen, los valores obtenidos presentan tendencias claras. Se aprecia, en primer lugar, que la asignación de tramo-períodos a niveles basada solo en tiempos de viaje de autos no tiene ningún efecto estructural en la variable DifTVN. Su comportamiento según niveles es muy similar para ambos tipos de día y de tramo. Este hecho conduce a otra comprobación importante: se ratifica que, en promedio, la estimación de la demora en paraderos tiene muy buen resultado en esta red ya que hay escasa diferencia de la variable entre tramos en que ella se aplica y no se aplica.

Otro rasgo consistente con lo visto anteriormente es que, en día laboral, DifTVN en los Niveles 1 y 2 es algo mayor en tramos con paradero lo que reflejaría el factor adicional de demora por pérdida de beneficios de coordinación debida a detenciones en paraderos. No se observa lo mismo en días de fin de semana, principalmente porque esa demora adicional es más que contrarrestada por la mayor reducción de tiempo de cruce que consiguen los autos en condiciones de bajo flujo.

Es también llamativo que en el nivel 2, de transición, cuyos límites quedan dados por los otros niveles hay notable estabilidad de los valores. Asimismo, DifTVN en el nivel 3 tiene valores muy cercanos a 0, que es la característica definitoria de ese nivel, salvo en una categoría con pocos datos y una particularidad que se explica más adelante. En conjunto, esto implica que los regímenes de circulación encontrados quedan bien descritos por los niveles aquí especificados.

A continuación, se hace un análisis más detallado de cada nivel con énfasis en lo cuantitativo.

6.2.2.2 Nivel 1.

El Nivel 1 se caracteriza por presentar una circulación libre de congestión apreciable y, por ende, existe en presencia de un grado de saturación no superior a un 80%. Para analizar el comportamiento de DifTVN durante el día en este nivel, se visualiza simultáneamente la diferencia de tiempo de viaje neto entre automóviles y buses por tipo de día y la proporción de tramos por período pertenecientes al Nivel 1 respecto del total de tramos con valores no nulos en cada período. (Figuras 6-5 y 6-6)

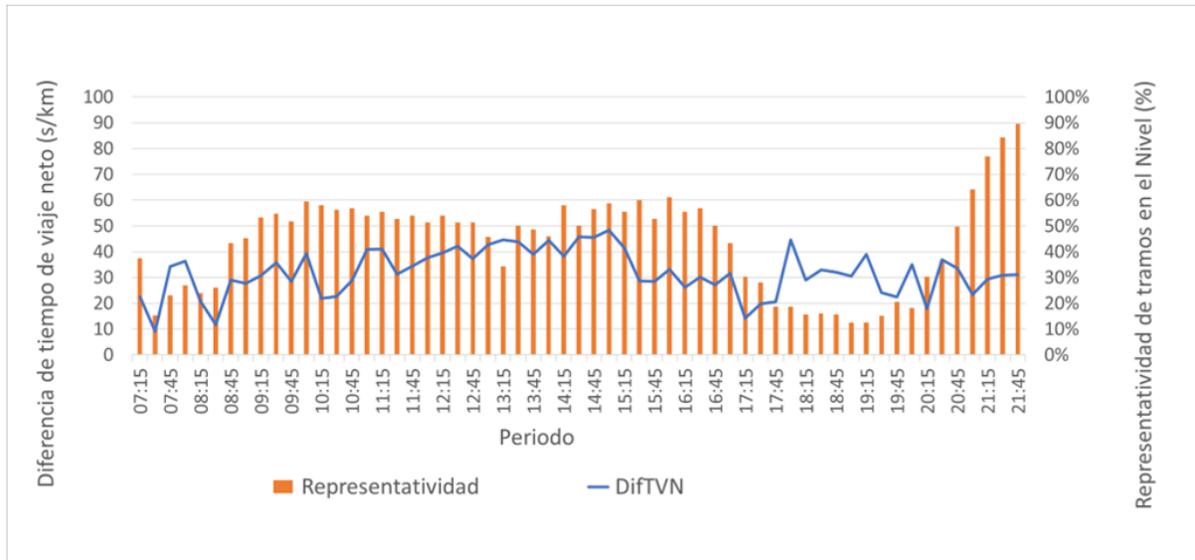


Figura N°6-5 Diferencia de tiempo de viaje neto entre automóviles y buses y representación de tramos en Nivel 1 en días laborales.

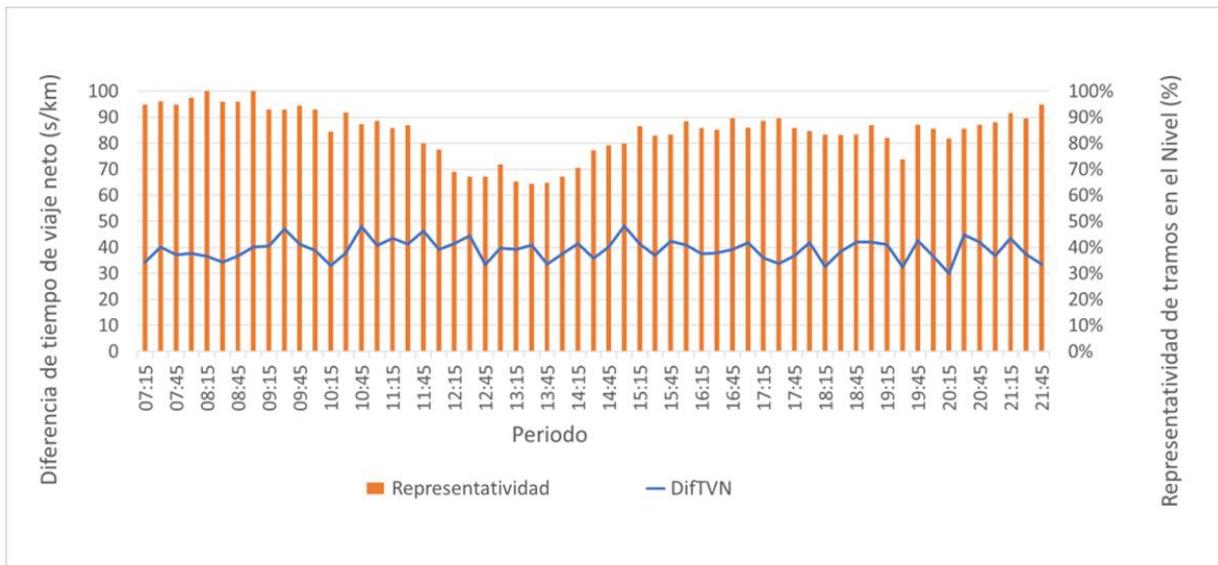


Figura N°6-6 Diferencia de tiempo de viaje neto entre automóviles y buses y representación de tramos en Nivel 1 en días de fin de semana.

En día laboral, DifTVN por período es bastante estable pese a la gran variabilidad que presentan los datos individuales. Un 57,6 % de los periodos está en el rango comprendido entre 25 y 40 s/km de diferencia.

Este nivel tiene una presencia importante en períodos fuera de punta, donde promedia un 52% de representación y la diferencia es todavía más estable que en los demás períodos. Por contraparte, en horas punta la representatividad se reduce a un 27% en promedio, lo cual es razonable si se toma en cuenta que estos períodos comúnmente se asocian a episodios de congestión severos. En ellos DifTVN tiene más variabilidad entre períodos contiguos, lo cual en horas de la mañana puede deberse a que rigen diversos esquemas de gestión de tráfico (como la reversibilidad en Irarrázaval y Alessandri).

En fines de semana, DifTVN es claramente más estable. Existen muchos más tramos en este nivel, teniendo una presencia de 85% en promedio durante el día y siendo el período más subrepresentado el de las 13:30, con un 64%. El rango en el que se mueven los valores de DifTVN es más acotado y alto que en día laboral, encontrándose un 78,0% de los periodos dentro del intervalo comprendido entre los 35 y 45 s/km. En fines de semana no se alcanzan valores tan bajos como los de día laboral, producto principalmente de que los tiempos de viaje de automóviles tienden a estar en la parte más baja de este nivel

6.2.2.3 Nivel 2.

Entre el estado congestionado del tráfico y el no congestionado existe un estado de transición que corresponde a aquel donde existe cierta congestión, pero la circulación se realiza en condiciones tolerables. El Nivel 2 comprende situaciones donde se perciben los primeros síntomas de la congestión hasta la fase previa a la congestión significativa.

Al igual que en la sección anterior, la caracterización del Nivel 2 se centrará en el análisis de la diferencia de tiempo de viaje neto (DifTVN) en días laborales y de fin de semana.

En día laboral, DifTVN por período presenta un comportamiento similar al del Nivel 1. Un 67,4 % está en el rango comprendido entre 25 y 40 s/km (Figura 6-7). Cabe destacar que en la punta tarde DifTVN es significativamente menor que en la punta mañana. Esto indica que los esquemas de reversibilidad implementados, que se aplican solo en la mañana, favorecen más a los autos que a los buses cuando hay congestión, aunque sea moderada.

En días de fin de semana (Figura 6-8) la presencia de Nivel 2 es de en promedio un 13%, e inferior al 10% durante gran parte de los períodos de la mañana, motivo por el cual éstos son excluidos de la representación gráfica. El rango de valores de DifTVN es más amplio que en días laborales y también lo es su variabilidad, mientras que su valor promedio es mucho menor al del Nivel 1 (28 s/km vs 39 s/km), ratificando que a mayor tiempo de viaje de automóviles la brecha en tiempo de viaje neto entre modos se reduce.

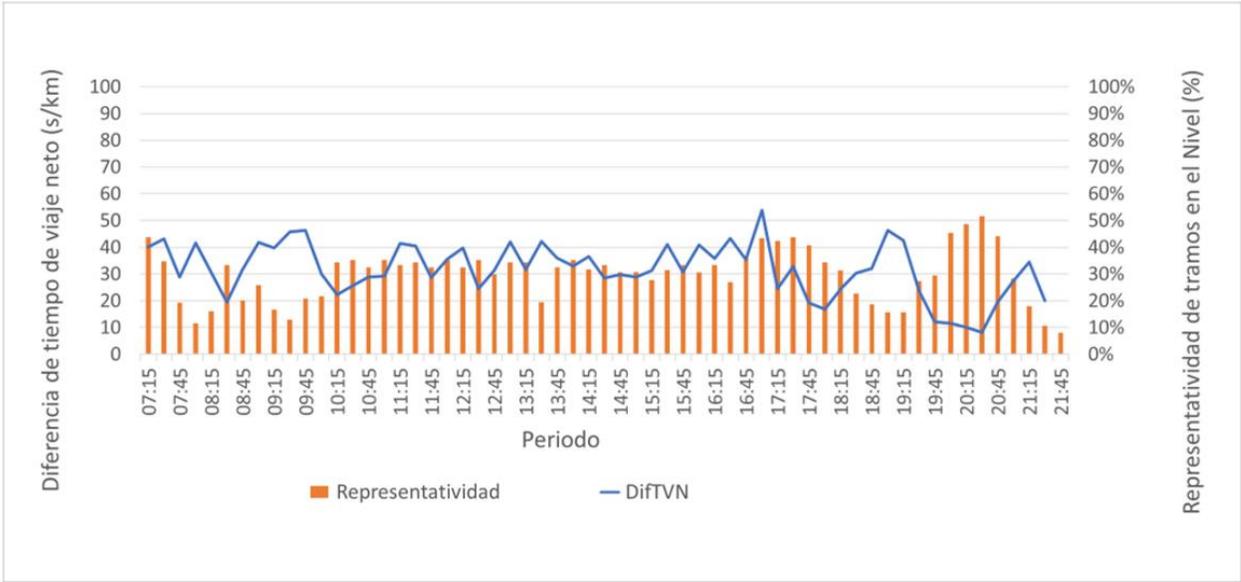


Figura N°6-7 Diferencia de tiempo de viaje neto entre automóviles y buses y proporción de tramos en Nivel 2 en días laborales.

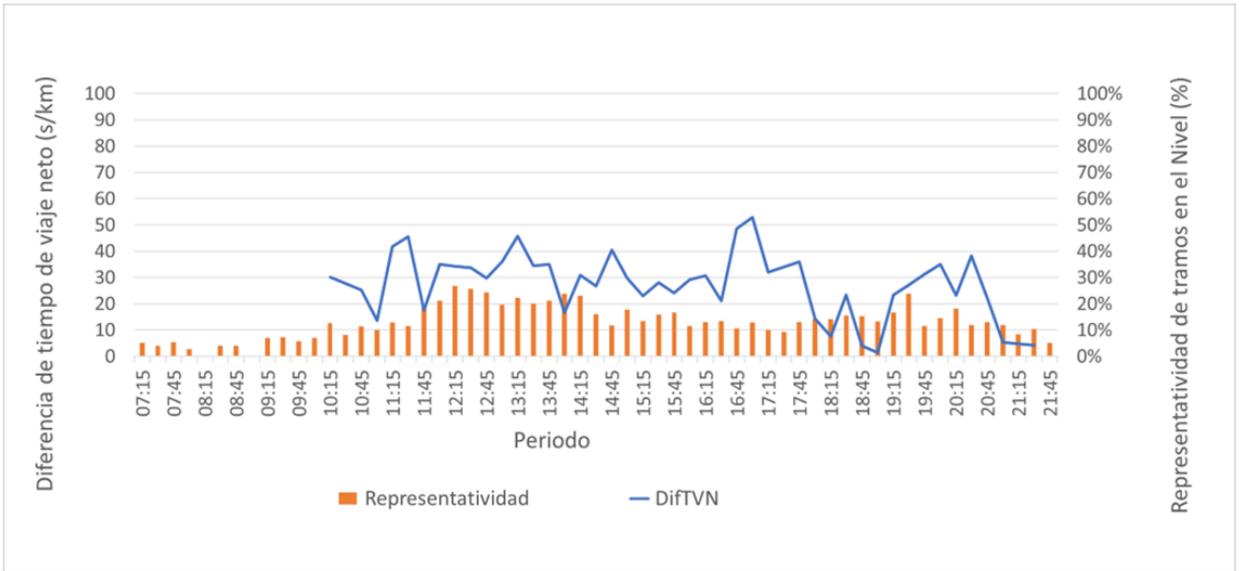


Figura N°6-8 Diferencia de tiempo de viaje neto entre automóviles y buses y proporción de tramos en Nivel 2 en días de fin de semana.

6.2.2.4 Nivel 3.

El Nivel 3 abarca desde aquel escenario en que la congestión deja de ser tolerable hasta situaciones extremas de bloqueos, es decir, cuando hay congestión severa. A diferencia de los Niveles 1 y 2, en esta sección se analizará sólo día laboral, puesto que en fines de

semana se dispone de apenas 103 registros, es decir, alrededor de 5 veces menos que en día laboral, donde existen 499 registros.

Si bien DifTVN tiende a anularse en promedio en este nivel, esta tendencia no se presenta de manera uniforme en todo el rango que cubre. La Figura 6-8 muestra los valores individuales pertinentes de DifTVN en relación con el tiempo medio de viaje de los autos y la línea de tendencia. Más allá de que hay alta variabilidad, esta línea no es horizontal. De hecho, parte de valores medios positivos que van disminuyendo hasta hacerse negativos.

Sucede que en este Nivel hay dos fenómenos vinculados a las demoras en paradero que no están considerados en los modelos empleados para estimarla. Uno es la congestión en paraderos no debida a condiciones de tráfico y el otro es el aprovechamiento de tiempo detenido por congestión de tráfico para la transferencia de pasajeros. Ambos tienen consecuencias sobre la estimación del tiempo de viaje neto de los buses y, por tanto, de DifTVN.

En el primer caso el tiempo total observado incluye la demora por congestión en paraderos (si existe) pero ella no se descuenta por no estar considerada en el modelo para la demora en paraderos. Esto conduce a sobreestimar DIFTVN⁵. En el segundo caso se da la situación contraria pues se descuenta del tiempo total observado una demora en paraderos que se estima como si fuera adicional al tiempo requerido para recorrer el tramo. Esto se traduce en una subestimación de DIFTVN, que incluso puede llegar a darle valores negativos.

En condiciones de circulación congestionada ambos fenómenos se pueden presentar, por lo que el efecto neto sobre DifTVN es variable. Ciertamente, en la región inicial del Nivel es mucho más probable que haya congestión en algunos paraderos, pero a mayor grado de congestión se hará predominante la indiferencia del tiempo de recorrido del tramo y la detención en paraderos. Esto contribuye a explicar la tendencia no horizontal que muestra la Figura 6-8. Sin embargo, no hay manera de explorar cuantitativamente estos fenómenos con los datos pasivos disponibles.

La Figura 6-9 muestra la evolución de DifTVN y de la representatividad del Nivel 3 por período, en día laboral. Hay un rango de variación claramente mayor que en los otros niveles y se alternan períodos con valores negativos y positivos. Los primeros corresponden principalmente a períodos punta, con alta representación de tramos en Nivel 3. Probablemente, la mayor variabilidad tiene que ver con la combinación de la tendencia básica a igualar tiempos de viaje neto de buses y auto con el balance de los otros fenómenos antes analizados. En todo caso, la diferencia promedio de tiempo de

⁵ El efecto sobre DIFTVN no sería unívoco en el caso de datos con frecuencia de detenciones en paradero inusualmente alta. Si ella responde a congestión en el paradero habría que ver el balance entre la sobrestimación del tiempo perdido por detenciones y la demora efectiva por congestión no incorporada en el modelo con que se estima la demora en paraderos. Esta incertidumbre se ha evitado aquí al eliminar esos datos de la base.

viaje neto en día laboral en este Nivel es en promedio de 3 s/km, muy pequeña como se esperaba.

En cuanto al fin de semana, si bien hay pocos datos para este Nivel es relevante observar los valores promedio de DifTVN correspondientes para tramos con y sin paradero del Cuadro 6-4. Para tramos sin paradero, donde no se dan los fenómenos comentados, la diferencia es 0,9 s/km: prácticamente nula. Con paradero, la diferencia es de 20,6 s/km: no tan pequeña, aunque representa solo un 6 % del tiempo medio de viaje neto en este Nivel. Teniendo en cuenta que los datos están en la parte baja del Nivel, por lo antes dicho es presumible que haya una diferencia positiva imputable a congestión en paraderos.

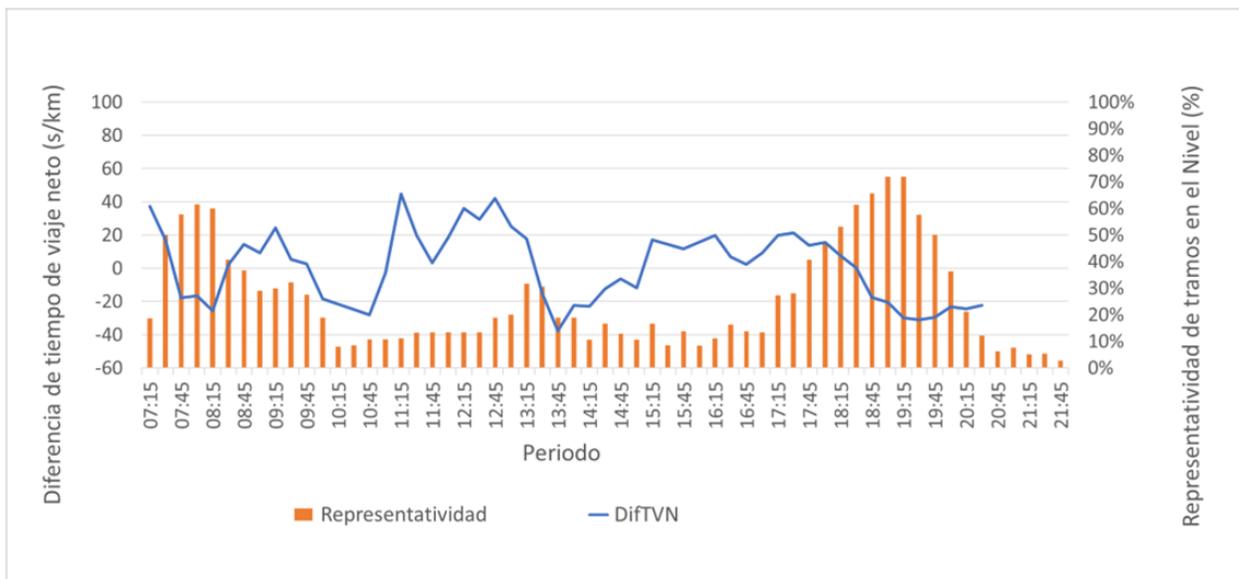


Figura N°6-9 Diferencia de tiempo de viaje neto entre automóviles y buses y proporción de tramos en Nivel 3 en días laborales.

6.2.3. SÍNTESIS

Pese a que hay mucha variabilidad en los tiempos de viaje por tramo-período tanto de autos como de buses, el examen de cada Nivel por separado corrobora las tendencias identificadas en el Capítulo 4, donde se trabajó con los valores promedio para todos ellos en cada período. Además, no se aprecia que lo que sucede con esos tiempos en cada Nivel sea influenciado de manera significativa por la existencia de tramos ubicados en otros Niveles en el período respectivo. Esto valida el criterio de particionar la red con un enfoque espacio-temporal (tramo-períodos asociados a niveles) en vez de uno solo temporal (del tipo punta – fuera de punta). Como los Niveles se definen basándose en el tiempo de viaje observado, la indudable interacción que impone la congestión en tramos adyacentes se reflejará, cuando ella exista, en la distribución de tramos por Nivel antes

que en las características de la circulación en cada Nivel. Es, precisamente, en la distribución de tramos por nivel que se observa una predominancia de tramo-períodos en Nivel 1 en horarios fuera de punta y una presencia dominante de éstos en Nivel 3 en períodos punta.

En los Niveles 1 y 2 hay una diferencia en el tiempo de viaje neto a favor del auto, cuya magnitud promedio por período y tipo de día se mueve dentro de un rango bastante acotado en cada caso. Se observa que dicha magnitud tiende a ser mayor en fin de semana que en día laboral.

El Nivel 3 tiene mayor complejidad por la presencia en él de fenómenos relacionados con la demora en paraderos que, como se ha expuesto, afectan la estimación del tiempo de viaje neto de los buses. Sin embargo, es evidente que hay una tendencia central a que se anule su diferencia con el de los autos. De hecho, en los tramos sin paradero esta diferencia es, en promedio, de apenas 3 s/km o menos. El análisis cualitativo de los mencionados fenómenos muestra que tienen impacto de sentido opuesto en relación con la tendencia central, lo que hace explicable que en los tramos con paradero la diferencia promedio sea también pequeña e incluso de signo negativo (-5 s/km) en día laboral.

En suma, hay buena base para afirmar que la especificación de los tres Niveles aquí formulada permite describir correctamente los regímenes de circulación identificados. Asimismo, que en los Niveles 1 y 2 el tiempo de viaje neto de los buses es sistemáticamente mayor al de los autos, en magnitud promedio variable, pero de rango muy acotado. En cambio, en el Nivel 3 predomina la equiparación de los tiempos de viaje de ambos modos.

6.2.4. ANÁLISIS DE LA DIFERENCIA DEL TIEMPO DE VIAJE NETO DE BUSES Y AUTOS

El Cuadro 6-5 presenta los valores característicos de la diferencia en cada Nivel, distinguiendo por tipo de día y periodización. Los promedios se obtienen de los valores individuales contenidos en cada categoría. Se incluye el tiempo de viaje de los autos respectivo y el porcentaje de él que representa la diferencia estimada, para darle contexto a esta cifra.

Cuadro N°6-5 Magnitudes características de DifTVN según niveles de congestión

Nivel	Tipo de Día	Período	DifTVN		TVA* (s/km)	DifTVN/TVA %
			Media (s/km)	Desv. Est. (s/km)		
Nivel 1	Laboral	Punta Mañana	28,1	38,0	141,9	19,8
		Fuera de Punta	35,7	26,9	142,6	25,0
		Punta Tarde	27,6	31,2	140,8	19,6
	Fin de Semana		39,1	32,6	125,7	31,1
Nivel 2	Laboral	Punta Mañana	37,0	59,2	204,1	18,1
		Fuera de Punta	34,1	40,1	206,4	16,5
		Punta Tarde	21,8	41,9	213,4	10,2
	Fin de Semana		27,6	43,7	200,3	13,8
Nivel 3	Laboral	Punta Mañana	0,6	70,9	377,5	0,2
		Fuera de Punta	3,7	48,4	325,2	1,1
		Punta Tarde	-11,6	54,9	365,0	-3,2
	Fin de Semana		19,3	63,1	304,5	6,3

*TVA: tiempo de viaje de automóviles.

Cabe destacar que el tiempo de viaje de los autos varía muy poco entre períodos al interior de cada Nivel, lo que confirma la independencia de éstos con respecto a la condición general de la red. Queda también de manifiesto la alta variabilidad de DifTVN: la desviación estándar es, como mínimo, un 75% de la media y esta relación crece fuertemente con el Nivel.

La diferencia media al interior de cada nivel en día laboral es bastante estable por período. Se observa que, en general, ella es algo mayor en fuera de punta, aunque el tiempo de viaje de los autos difiere muy poco con el de los períodos punta. Es probable que esto se deba a que los autos sacan más partido de la reducción de tiempo de ciclo en las intersecciones que se produce fuera de punta.

En fines de semana, la situación respecto del día laboral varía con el Nivel. En el primero, la diferencia es claramente mayor, lo que es consistente con que el tiempo de viaje de los autos es significativamente menor. Y también hay menores tiempos de ciclo en la red. En el Nivel 2, el tiempo de viaje de los autos es similar al del día laboral y la diferencia entre buses y autos tiene un valor mayor que el de la punta tarde pero menor al de punta mañana en día laboral. Esto podría explicarse porque en el fin de semana no se aplican esquemas de reversibilidad en la mañana. El caso del Nivel 3 se comentó anteriormente.

La magnitud de la diferencia de tiempo de viaje neto varía muy poco entre los Niveles 1 y 2, lo que podría parecer contradictorio con la definición de los Niveles. Esto se despeja al considerar la diferencia en relación con el respectivo tiempo de viaje de los autos, que es su base. En el Nivel 1 el tiempo de viaje neto de los buses es mayor que el del auto en un 20 a 25% en día laboral y 31% en fin de semana. En el Nivel 2, el rango es entre

10 y 18% y muy cercano a 0 en el Nivel 3. Con esta perspectiva, es clara la condición de transición del Nivel 2.

6.3. MODELACIÓN.

Una vez que se ha caracterizado el comportamiento de la diferencia de los tiempos de viaje neto entre automóviles y buses corresponde estudiar su origen. ¿A qué se debe la magnitud de las diferencias en cada nivel? ¿Tienen sentido estas magnitudes? Para dar respuesta a estas interrogantes la modelación puede aportar pistas a través de la descomposición de ellas. Lógicamente, esta tarea compete a los Niveles 1 y 2, en los que hay diferencia relevante.

Como se trata del tiempo de viaje neto, la diferencia solo puede provenir del tiempo de cruce y de la demora en intersecciones. Sin duda, hay muchos factores que pueden influir sobre estas componentes, pero al trabajar con datos pasivos, es muy limitada la información disponible sobre ellos. Esto, junto a la alta variabilidad de los datos, condiciona la formulación y estimación de modelos. No obstante, la estabilidad que muestra el promedio de DifTVN y el hecho que tiene solo dos componentes dan fundamento a esta tarea.

6.3.1. MODELACIÓN DEL NIVEL 1.

En este Nivel, como se ha expuesto previamente, la variación del tiempo de viaje responde esencialmente a tendencias lineales. Se especificará entonces un modelo de regresión lineal.

Para la diferencia en el tiempo de cruce no se tienen variables explicativas a las cuales recurrir, quedará asociada al término libre del modelo. El aumento detectado en el fin de semana se puede capturar con una variable muda.

Para la demora en intersecciones, la variable explicativa disponible es la densidad de intersecciones semaforizadas del tramo. Además, en el análisis previo se ha encontrado evidencia de un efecto diferencial en dicha demora: la pérdida de beneficios de coordinación de los semáforos para los buses ocasionada por la detención en paraderos. Esto puede recogerse con el dato disponible de frecuencia de detenciones en paradero en el tramo.

Así, la variable explicada es la diferencia de tiempo de viaje neto entre automóviles y buses (DifTVN) en un tramo-período, en s/km, y las variables dependientes son:

- a) nis: densidad de intersecciones semaforizadas (int/km)
- b) ndp: frecuencia de detenciones en paraderos (det/km)
- c) dummyFDS: 1 si es día de fin de semana, 0 en día laboral

El modelo está dado por la siguiente ecuación:

$$DifTVN = c_1 + c_2 * nis + c_3 * ndp + c_4 * dummyFDS$$

Donde c_1 , c_2 , c_3 y c_4 son parámetros por estimar. El Cuadro 6-6 muestra el resultado de la estimación.

Cuadro N°6-6 Modelo de diferencia de tiempo de viaje neto para el Nivel 1

	Estimador	Error estándar	t value	Pr(> t)	Significancia
c_1 (s/km)	12,5	1,8	7,1	$1,8 * 10^{-12}$	***
c_2 (s/int)	3,1	0,3	11,4	$< 2 * 10^{-16}$	***
c_3 (s/det)	5,5	0,4	12,4	$< 2 * 10^{-16}$	***
c_4 (s/km)	6,5	1,2	5,5	$5,1 * 10^{-8}$	***
Códigos de significancia: 0 '***'					
Ajuste R^2 : 0,05					

Como era de esperar, el modelo tiene un ajuste global bajo producto de la altísima variabilidad de los datos. No obstante, todas las variables explicativas tienen un alto valor de significancia.

El valor del intercepto es asociable a la diferencia en tiempo de crucero, que en este caso es de 12,5 s/km en día laboral y de 19 s/km en fines de semana. Como referencia se tiene el tiempo de crucero base obtenido por Cubillos para los buses (137 s/km, en día laboral). Que los autos tengan un tiempo de crucero 9% inferior está en línea con los usos de la práctica. Lo mismo aplica para el aumento de la diferencia en fin de semana, la que se explica porque los autos disponen de más grados de libertad para aprovechar el menor flujo vehicular.

El valor de la diferencia ligado a las detenciones en paraderos viene dado por el promedio de detenciones por kilómetro multiplicado por el parámetro del modelo, de modo que se tiene un valor por tipo de día:

$$DifTVN_{ndp-L} = ndp_L * c_3 = 1,3 \text{ det/km} * 5,5 \text{ s/det} = 7,2 \text{ s/km}$$

$$DifTVN_{ndp-FDS} = ndp_{FDS} * c_3 = 1,1 \text{ det/km} * 5,5 \text{ s/det} = 6,1 \text{ s/km}$$

A este respecto hay una referencia relevante (Gibson et al., 2015). A partir del modelo de Schneider (2013) se hizo una estimación de la pérdida de beneficios por coordinación en esa red. El valor obtenido está en un rango de 5 a 7 s/km por tramo-período, con una frecuencia media de detenciones de 1,2 det/km. Hay una notable coincidencia que

permite atribuir a esa causa esta componente de la diferencia. Debe tenerse presente que ella contribuye a la demora en intersecciones, aunque se origina en los paraderos.

El parámetro restante corresponde a la diferencia en demora en intersecciones distinta de la anterior. Ella puede deberse básicamente a una diferencia en la frecuencia de detenciones en intersecciones y en el tiempo perdido en cada una de ellas. Sobre la primera, y más importante, no hay datos. La segunda se puede estimar en unos 3 a 4 s/det. El valor de la componente es del orden de 14 s/km ya que la densidad de intersecciones es cercana a 4,5 int/km. En este contexto, la cifra cuadraría si la frecuencia de detenciones de los buses es superior a la de los autos en algo menos de 1 det/km, lo que parece razonable. En todo caso, el hecho de que la estimación de las otras componentes de DifTVN esté bien fundada es un argumento para la credibilidad del parámetro c_2 .

Cuadro N°6-7 Descomposición de DifTVN en el Nivel 1

Componente de DifTVN	Día laboral	Día de fin de semana
Diferencia por tiempo de cruce (s/km)	12,5	19,0
Diferencia por pérdida de beneficios de coordinación (s/km)	7,2	6,1
Diferencia por demora en intersecciones (s/km)	13,6	14,3

6.3.2. MODELACIÓN DEL NIVEL 2.

A diferencia del Nivel 1, en el Nivel 2 existen condiciones congestionadas que, aunque moderadas, pueden apartarse de la linealidad, sobre todo en la región superior del Nivel. Esto genera problemas para estimar un modelo lineal solamente del Nivel 2 que produzca resultados confiables ya que no se dispone de variables que puedan dar cuenta de congestión de tráfico o en paraderos.

Sin embargo, tiene sentido modelar de manera conjunta los Niveles 1 y 2 y ver en qué dirección varían los parámetros respecto del modelo de Nivel 1.

El modelo conjunto es el mismo del Nivel 1, solo se espera que cambien los parámetros, y está dado por

$$DifTVN = c_5 + c_6 * nis + c_7 * ndp + c_8 * dummyFDS$$

El resultado de la estimación se muestra en el Cuadro 6-8.

Cuadro N°6-8 Modelo de diferencia de tiempo de viaje neto conjunto para Niveles 1 y 2.

	Estimador	Error estándar	t value	Pr(> t)	Significancia
c_5 (s/km)	14,6	1,7	8,4	$< 2 * 10^{-16}$	***
c_6 (s/int)	2,7	0,3	10,1	$< 2 * 10^{-16}$	***
c_7 (s/det)	3,4	0,4	8,0	$1,7 * 10^{-15}$	***
c_8 (s/km)	6,5	1,1	6,1	$9,7 * 10^{-10}$	***
Códigos de significancia: 0 '***'					
Ajuste R^2 : 0,03					

Como es de esperar, los estadígrafos del ajuste tienen las mismas características de los del modelo del Nivel 1.

Recordando que DifTVN en promedio difiere poco entre ambos Niveles, el resultado interesante es que hay una disminución significativa de los parámetros vinculados a la demora en intersecciones. Especialmente, de la pérdida de beneficios de coordinación. Al incluir datos en condiciones de mayor grado de saturación, la capacidad de diferenciación entre modos en esta demora se reduce. Este efecto es más fuerte, lógicamente, en los beneficios por coordinación.

El aumento de la diferencia base en tiempo de crucero de 2 s/km con respecto al Nivel 1 solo, seguramente es producto de efectos de congestión en el Nivel 2 que sobrecompensan la reducción esperable de esa variable. La especificación del modelo obliga a que tales efectos, de existir, se imputen al tiempo de crucero. Que el parámetro adicional correspondiente para fin de semana se mantenga inalterado avala esta interpretación. Los resultados ratifican que, pese a las limitaciones, la descomposición de la diferencia realizada tiene solidez tratándose de valores promedio.

Estos modelos son poco precisos en su capacidad predictiva a pequeña escala por la alta dispersión de la variable. Su utilidad reside en identificar cuantitativamente los factores sobre los cuales habría que actuar si se quiere reducir la diferencia de tiempo de viaje neto.

6.4. COMPARACIÓN GLOBAL

Los resultados presentados muestran que el tiempo de viaje neto de los buses excede en porcentajes relevantes el de los autos en los Niveles 1 y 2, que constituyen una fracción significativa de la red en día laboral y casi su totalidad en fines de semana y festivos (asimilables). Solo en condiciones de congestión significativa o peor (Nivel 3) se logra una equiparación.

En términos absolutos, esta diferencia se mueve, en promedio, entre 30 y 40 s/km según tipo y hora del día de la semana. A partir del modelo del Nivel 1 se puede hacer una descomposición de ese monto, estimando cada componente mediante los parámetros del modelo y el valor promedio pertinente de las variables explicativas. El resultado se presenta en el Cuadro 6-7.

En día laboral, predomina la diferencia vinculada a intersecciones y en fin de semana, ella se equilibra con la de tiempo de crucero. Por lo visto, en el Nivel 2 debe reducirse en cierta medida el peso de la componente atribuible a demora en intersecciones. Esta descomposición puede variar entre tramo-períodos específicos o conjuntos reducidos de ellos. Lamentablemente, para un análisis más desagregado será necesario abordar la variabilidad de los datos. En todo caso, estos valores dan un orden de magnitud del campo de opciones de reducción de las componentes si se quiere disminuir la diferencia de tiempo de viaje neto. Ahora bien, desde el punto de vista de la competitividad de los buses lo que importa es la diferencia del tiempo de viaje total con los autos. Para ello, en los tramos con paradero hay que añadir la demora en ellos. Para tener un panorama completo de la situación de competitividad es útil calcular esa diferencia (DifTVT) para las diversas categorías de nivel de congestión, tipo de día y período empleadas, distinguiendo también entre tramos con y sin paradero. El Cuadro 6-9 muestra los valores de DifTVT y su relación porcentual con el tiempo de viaje de los automóviles pertinente.

Cuadro N°6-9 Diferencia del tiempo de viaje total de buses y automóviles

Nivel	Tipo de Día	Período	DifTVT		TVA (s/km)	DifTVT/TVA	
			Con paradero (s/km)	Sin paradero (s/km)		Con paradero %	Sin paradero %
Nivel 1	Laboral	Punta Mañana	64,0	25,2	141,9	45,1	17,8
		Fuera de Punta	66,6	32,8	142,6	46,7	23,0
		Punta Tarde	61,0	28,7	140,8	43,3	20,4
	Fin de Semana		61,2	44,1	125,7	48,7	35,1
Nivel 2	Laboral	Punta Mañana	76,0	66,9	204,1	37,2	32,8
		Fuera de Punta	75,4	23,7	206,4	36,5	11,5
		Punta Tarde	57,5	3,6*	213,4	26,9	1,7*
	Fin de Semana		56,5	31,1	200,3	28,2	15,5
Nivel 3	Laboral	Punta Mañana	45,6	20,7	377,5	12,1	5,5
		Fuera de Punta	53,3	-0,9	325,2	16,4	-0,3
		Punta Tarde	31,8	-0,1	365,0	8,7	0,0
	Fin de Semana		60,5	1,0	304,5	19,9	0,3

*: hay solo 4 datos

Se observa que, como es lógico, en los tramos sin paradero las diferencias en el tiempo de viaje total son muy similares a las diferencias en el tiempo de viaje neto estimadas para el conjunto de los tramos. Hay excepciones que se explican por escasez de datos en la categoría.

En los tramos con paradero, DifTVT es sustancialmente mayor que DifTVN: aumenta en 30 a 40 s/km en todos los Niveles, producto de la demora en paraderos. La magnitud de DifTVT se sitúa en un rango estrecho de 65 ± 10 s/km, prácticamente en todos los casos. Es decir, alrededor de 1 minuto por kilómetro. En términos relativos al tiempo de viaje de los autos, la diferencia total es de 45% en el Nivel 1, 30 a 35% en el Nivel 2 y 10 a 20% en el Nivel 3. La tendencia decreciente de ella con el Nivel se mantiene, pero con valores más altos que en los tramos sin paradero.

En números gruesos, en tramos con paradero la demora en ellos es responsable de la mitad de la diferencia con los autos en los Niveles 1 y 2. La otra mitad se descompone como se ha expuesto. Las cifras presentadas configuran un complejo panorama para la competitividad de los buses considerando que gran parte de la red está en los Niveles 1 y 2, tanto en día laboral como en fin de semana.

7. ESQUEMAS DE PRIORIDAD

La medida seguramente más usada para mejorar la situación de los buses en la circulación son los denominados esquemas de prioridad. En la red de estudio, como se ha comentado, hay dos de ellos y es de sumo interés saber cómo el análisis comparativo se comporta en estos casos. Los esquemas presentes corresponden a la pista solo bus en Av. J. P. Alessandri, en ambos sentidos, y el sentido único al poniente en Av. Irarrázaval. Este último convierte a la calzada norte en el equivalente a una pista solo bus y se aplica solo en día laboral, de 7.30 a 10 de la mañana. Cabe destacar que en este mismo tipo de día y horario la calzada poniente de J.P. Alessandri se destina solo a los autos en sentido SN así que no operan buses en ese sentido.

Estos esquemas están concebidos para dar prioridad a los buses en la circulación vehicular; no hay razones para esperar que tengan efectos sobre la demora en paraderos. Corresponde entonces enfocar el análisis en el tiempo de viaje neto. Por otra parte, es de suponer que los beneficios son crecientes con el grado de congestión, lo que, como se ha visto, limita severamente el uso de modelación de esa variable con los datos disponibles. El camino que se ha elegido es identificar y cuantificar diferencias con respecto a elementos de la red que tienen características similares y en que no hay esquemas de prioridad en aplicación. Los procedimientos son análogos a los empleados en el capítulo anterior.

7.1 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA PISTA SOLO BUS

Es razonable esperar de una pista solo bus que en ella los buses circulen a mayor velocidad que en tráfico mixto y, especialmente, que logren aventajar a los autos con que comparten la vía. Ambas condiciones son objeto del análisis comparativo de tiempo de viaje neto: solo de los buses para la primera y la diferencia entre ellos y los autos para la segunda. Se ha elegido como referencia para contrastar con Alessandri (que cuenta con pista solo bus) el eje Pedro de Valdivia. Este va en la misma dirección, es de tráfico mixto y tiene un flujo de buses similar. La diferencia más relevante radica en que Pedro de Valdivia tiene 2 pistas por sentido en comparación con las 3 de Alessandri.

7.1.1. TIEMPO DE VIAJE NETO DE LOS BUSES

Se estudia primero el comportamiento del tiempo de viaje neto solamente de los buses en ambos ejes. Se emplea la base de datos utilizada para la modelación de la Sección 6.3, reincorporando los valores extraídos por constituir singularidades en relación con los autos. Así, se cuenta con 2555 datos, de los cuales 1165 corresponden a Alessandri y 1390 a Pedro de Valdivia, es decir, la proporción de datos entre ejes es equitativa.

Se comienza revisando la tendencia comparativa en fin de semana, ya que virtualmente no existe congestión y la cantidad de pistas, por sí sola, no debería ser relevante. Las Figuras 7-1 y 7-2 muestran el tiempo de viaje de buses (TVB) neto de ambos ejes en sentido NS y SN, respectivamente, en tanto que las correspondientes diferencias promedio de TVB neto aparecen en el Cuadro 7-1.

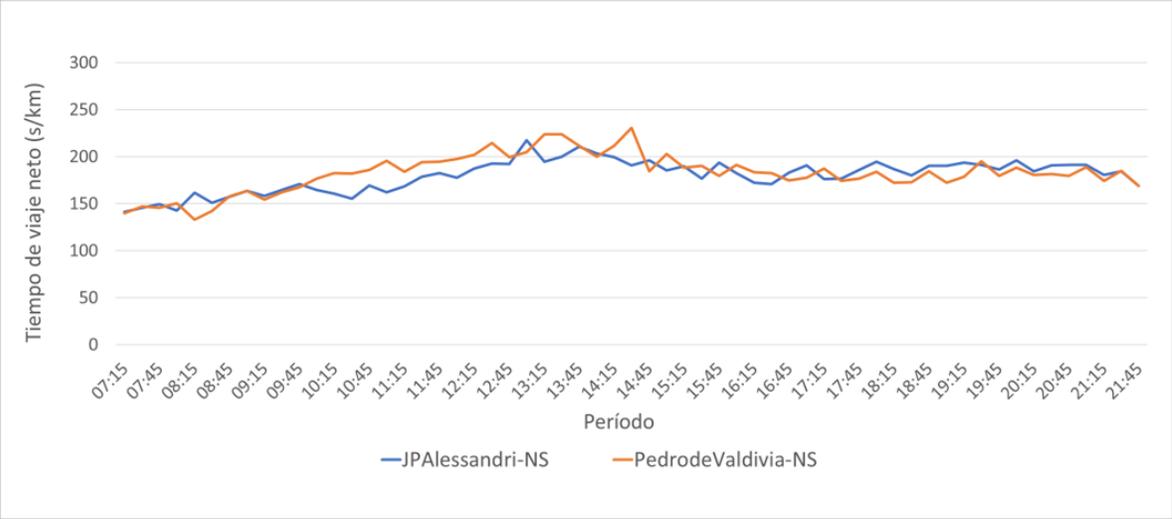


Figura N°7-1 Comparación de TVB neto en ejes de Alessandri NS y Pedro de Valdivia NS en día de fin de semana.

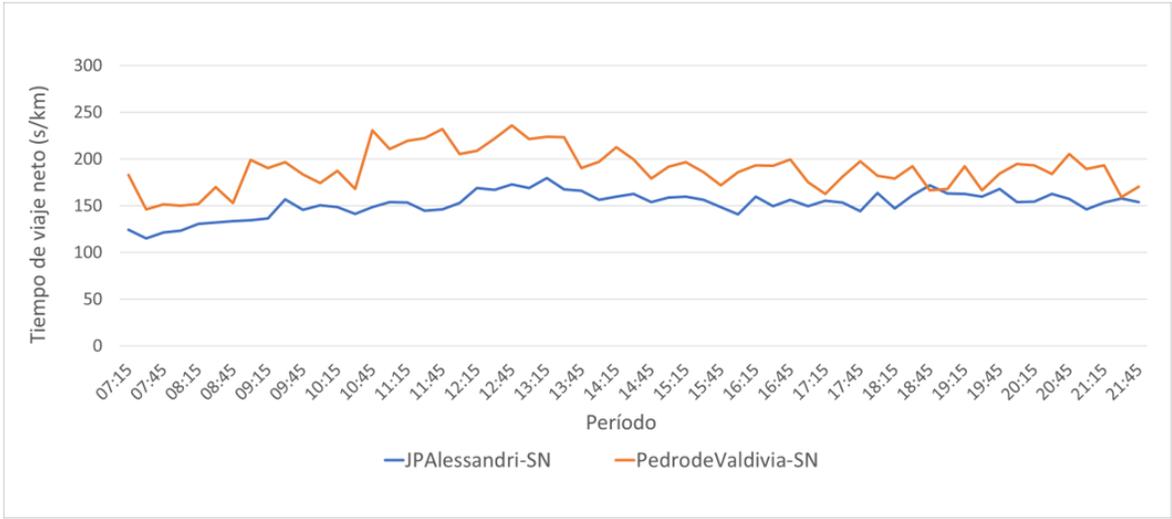


Figura N°7-2 Comparación de TVB neto en ejes de Alessandri SN y Pedro de Valdivia SN en día de fin de semana.

Cuadro N°7-1 Resumen comparación de tiempo de viaje neto de buses en ejes con pista solo bus y tráfico mixto en fin de semana

Sentido	TVB neto Alessandri (s/km)	TVB neto Pedro de Valdivia (s/km)	DifTVB neto (s/km)
NS	180	183	-3
SN	152	190	-38

En sentido NS (Figura 7-1) los tiempos de viaje neto de buses en ambos ejes son similares en gran parte del día, con excepción de algunos períodos cercanos al mediodía, donde Pedro de Valdivia exhibe tiempos levemente superiores. La diferencia de tiempos de viaje se mueve en un rango bastante acotado (entre -44 s/km y 24 s/km) y en promedio es prácticamente nula. Por otro lado, en sentido SN (Figura 7-2) aunque los tiempos de viaje son estables en cada eje hay una consistente diferencia en favor de Alessandri que en promedio es de 38 s/km (Cuadro 7-1). Se verifica que la pista solo bus ofrece una mejor o igual condición de circulación.

En relación con el efecto del número de pistas, se observa en el Cuadro 7-1 que en 3 de los 4 casos el TVB neto tiene casi el mismo valor (180 a 190 s/km) pese a la diferencia en dicho número. Esto indica que la cantidad de pistas por sí sola no tiene un papel determinante en condiciones no congestionadas.

A diferencia del fin de semana, en día laboral se distinguen claramente tres períodos con comportamiento distinto, que son los que fueron definidos anteriormente como punta mañana, fuera de punta y punta tarde. Producto de lo anterior, el análisis del efecto de la pista sólo bus se hará de acuerdo a la periodización definida. Las Figuras 7-3 y 7-4 muestran el TVB neto de ambos ejes en sentido NS y SN, respectivamente, en tanto que las correspondientes diferencias promedio de TVB neto, por período, aparecen en el Cuadro 7-2.

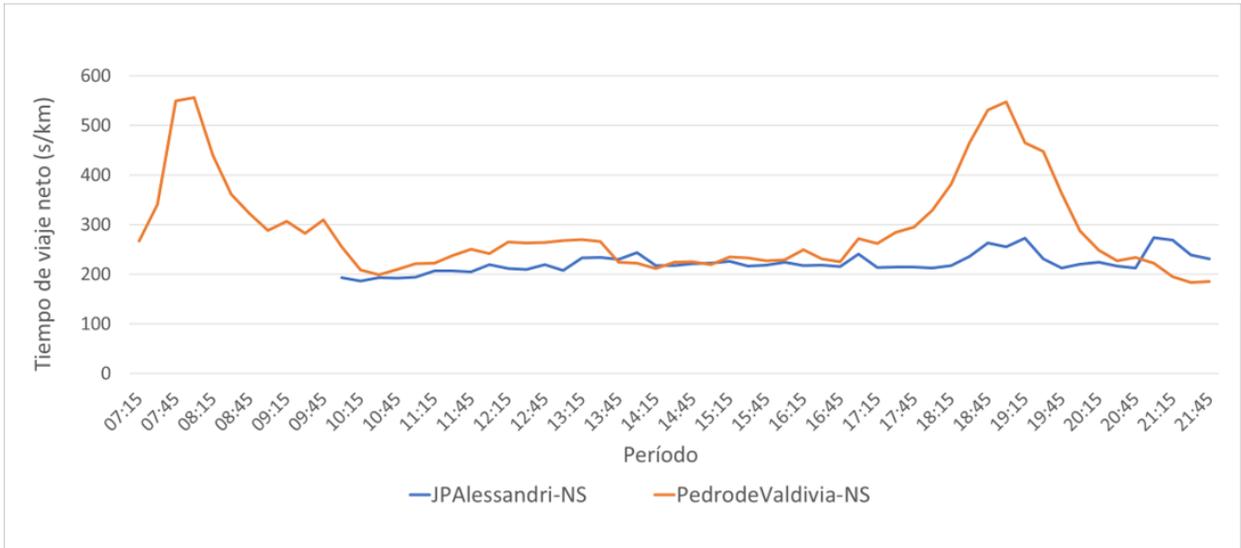


Figura N°7-3 Comparación de TVB neto en ejes de Alessandri NS y Pedro de Valdivia NS en día laboral.

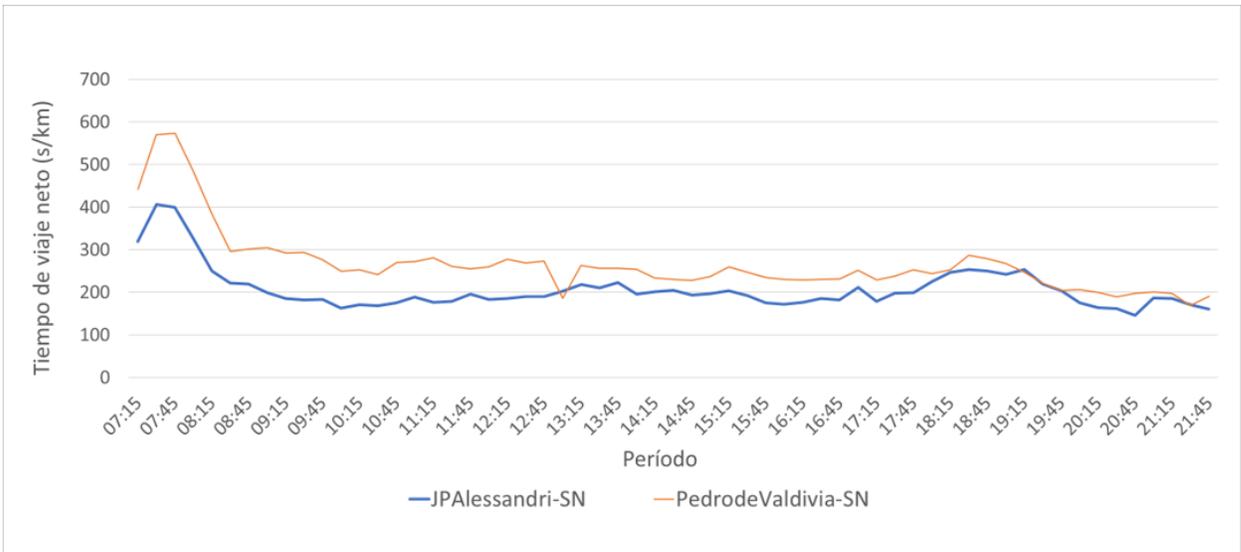


Figura N°7-4 Comparación de TVB neto en ejes de Alessandri SN y Pedro de Valdivia SN en día laboral.

Cuadro N°7-2 Resumen comparación de TVB neto en ejes con pista solo bus y tráfico mixto en día laboral

Sentido	Período	TVB neto Alessandri (s/km)	TVB neto PdV (s/km)	DifTVB neto (s/km)
NS	Punta mañana	-	366	-
	Fuera de punta	215	238	-23
	Punta tarde	230	377	-147
SN	Punta mañana	263	384	-121
	Fuera de punta	190	248	-58
	Punta tarde	219	242	-23

Excepto en los períodos punta, TVB neto muestra un comportamiento estable en ambos ejes, tal como en fin de semana. Eso sí, su valor es más alto y la pista solo bus siempre reporta un ahorro en ambos sentidos. Este ahorro es de 10 a 20% en ausencia de congestión y crece a un 30 a 40% en los períodos congestionados.

En suma, se confirma que la pista solo bus representa una mejora en las condiciones de circulación para los buses, con mucho mayor incidencia cuando hay congestión.

7.1.2. DIFERENCIA DE TIEMPO DE VIAJE NETO DE BUSES Y AUTOS

Si bien se determinó que la pista solo bus tiene un efecto positivo en los tiempos de viaje de buses, resta analizar qué tan relevante es el beneficio que se obtiene en comparación con los automóviles, que es uno de los objetivos centrales de esta tesis. Para ello, se analizará la diferencia de tiempo de viaje neto entre buses y automóviles (DifTVN) en los ejes Alessandri y Pedro de Valdivia, utilizando la base de datos depurada de la Sección 6.2.1. Con ello, existen 2512 registros de DifTVN, de los cuales 1137 pertenecen a Alessandri y 1375 a Pedro de Valdivia.

Primero se analizan los días de fin de semana, que es donde no existe congestión perceptible (Figuras 7-5 y 7-6).

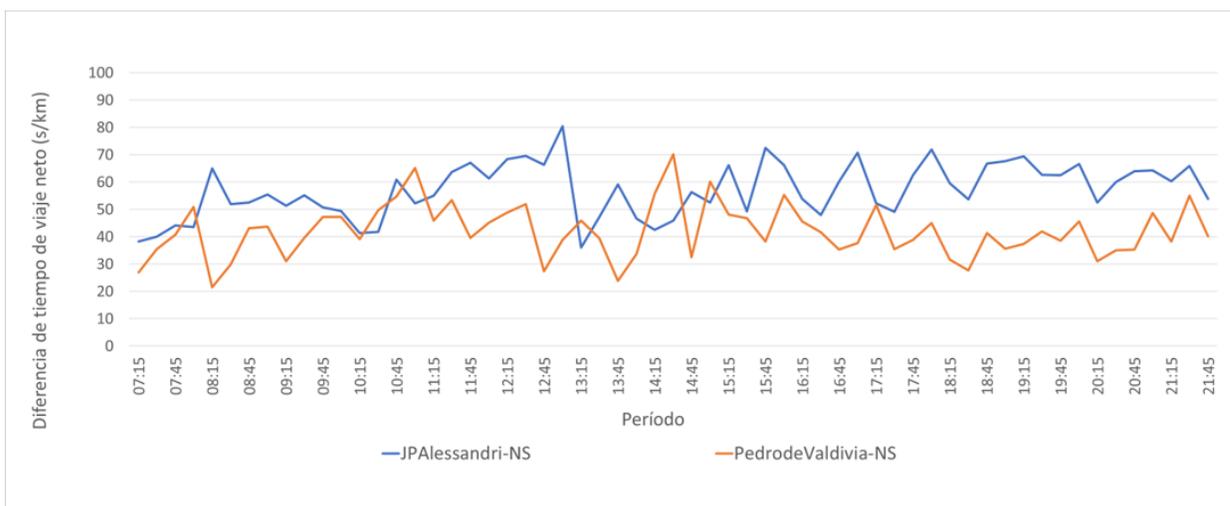


Figura N°7-5 Comparación de DifTVN en ejes Alessandri NS y Pedro de Valdivia NS en día de fin de semana.

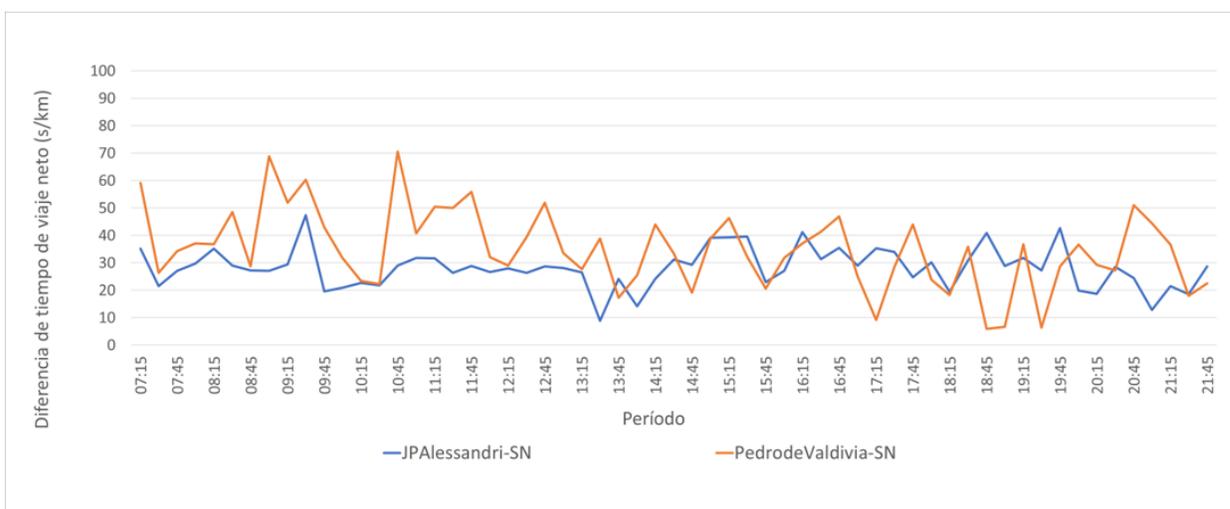


Figura N°7-6 Comparación de DifTVN en ejes Alessandri SN y Pedro de Valdivia SN en día de fin de semana.

En ambos sentidos se observan valores similares de DifTVN a lo largo del día. En sentido NS existe gran variabilidad de DifTVN, sin embargo, en Alessandri es predominantemente mayor por un margen de en promedio 15 s/km.

Por otro lado, en sentido SN también se observa gran variabilidad en los datos, pero los rangos en los que se mueve DifTVN son similares a los del sentido NS, siendo esta vez la diferencia promedio mayor en el caso de Pedro de Valdivia por 7 s/km.

El Cuadro 7-3 resume las magnitudes principales de la comparación de DifTVN en fines de semana.

Cuadro N°7-3 Resumen comparación de DifTVN en ejes con pista solo bus y tráfico mixto en fin de semana

Sentido	DifTVN Alessandri (s/km)	DifTVN PdV (s/km)	DifTVN A - DifTVN PdV (s/km)
NS	57	42	15
SN	28	35	-7

Es llamativo que, en fines de semana, la existencia de una pista solo bus no tiene un efecto definido sobre la diferencia de tiempo de viaje neto con los autos: posee alta variabilidad temporal y puede ser, en promedio, negativo o positivo.

A continuación, se analiza DifTVN en días laborales (Figuras 7-7 y 7-8).

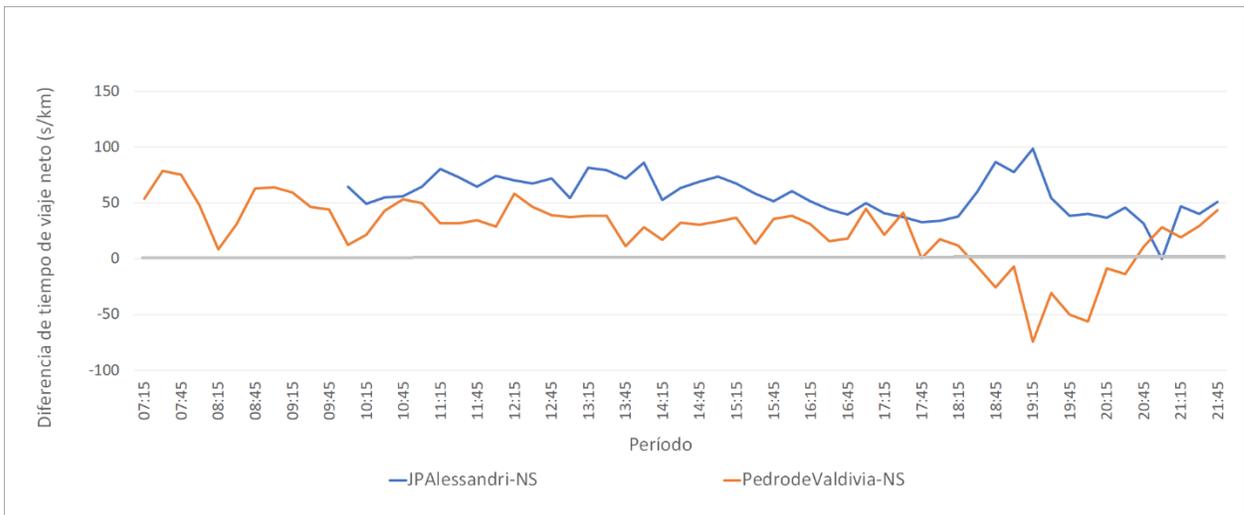


Figura N°7-7 Comparación de DifTVN en ejes Alessandri NS y Pedro de Valdivia NS en día de laboral.

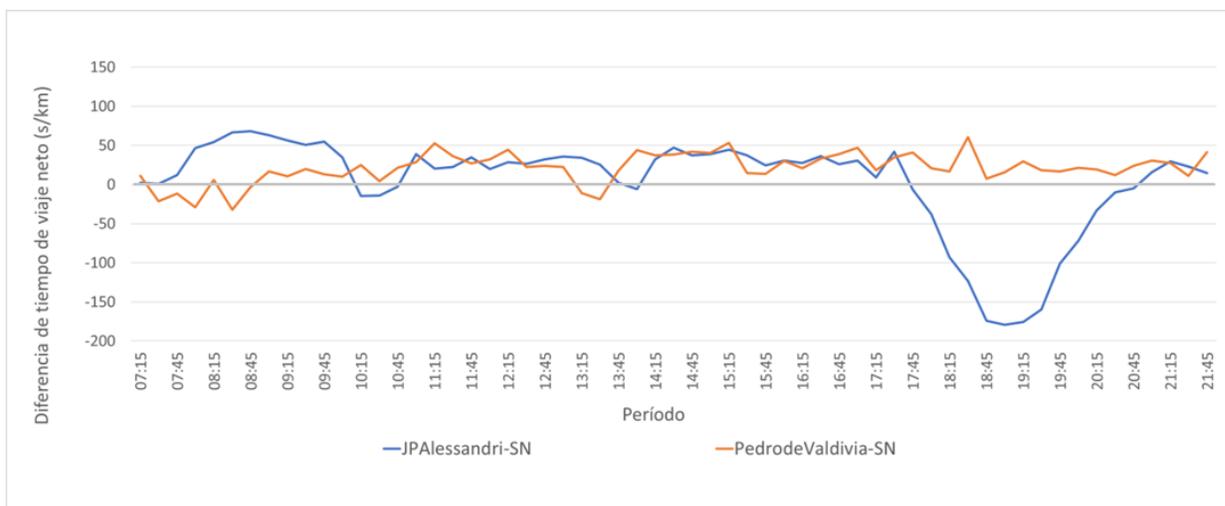


Figura N°7-8 Comparación de DifTVN en ejes Alessandri SN y Pedro de Valdivia SN en día laboral.

En abierto contraste con lo visto al estudiar el tiempo de viaje solo de los buses, la diferencia de este con el de los autos se comporta de manera muy diversa entre sentidos. En el sentido NS, DifTVN es sistemáticamente mayor en Alessandri, algo inesperado, mientras en el sentido SN hay variadas situaciones. En fuera de punta, la diferencia es muy parecida en ambos ejes, pero en cada período punta es mayor en un eje distinto. La mayor diferencia en Alessandri en la punta mañana se debe a que en ese horario se aplica reversibilidad en ese eje, lo que favorece a los autos, y a la obstrucción de la pista solo bus generada por un colegio. En la punta tarde, sin factores como estos, se aprecia un beneficio muy significativo de la pista solo bus.

El Cuadro 7-4 resume las magnitudes principales de la comparación de DifTVN en día laboral.

Cuadro N°7-4 Resumen comparación de DifTVN en ejes con pista solo bus y tráfico mixto en día laboral

Sentido	Período	DifTVN Alessandri (s/km)	DifTVN PdV (s/km)	DifTVN A - DifTVN PdV (s/km)
NS	Punta mañana	-*	52	-
	Fuera de punta	63	32	31
	Punta tarde	53	-16	69
SN	Punta mañana	43	-2	45
	Fuera de punta	25	27	-2
	Punta tarde	-93	25	-118

*: en este período no hay flujo en sentido NS en Alessandri, por aplicarse reversibilidad

Ciertamente, no es posible afirmar que la pista solo bus contribuye a mejorar la situación comparativa de los buses con respecto a los autos. Tampoco puede afirmarse lo contrario. Todo indica que el efecto de la pista solo bus en DifTVN depende de condiciones particulares, sobre todo en situaciones de congestión.

Resumiendo, hay sólida evidencia de que la pista solo bus conduce a una disminución del tiempo de viaje neto de los buses y le aporta estabilidad a lo largo del día, laboral o fin de semana, un resultado que es recurrente al analizar el comportamiento de la velocidad de los buses en pistas solo bus. Sin embargo, no hay evidencia semejante de que contribuya a mejorar su diferencia con el tiempo de viaje de los autos.

7.2. ESQUEMA DE IRARRÁZAVAL

El otro esquema existente en la red estudiada que tiene un componente de prioridad a buses es el del eje Irarrázaval. En día laboral, entre las 7:30 y 10:00 hrs. todo el flujo vehicular circula hacia el poniente, en dos calzadas de dos pistas segregadas por una mediana. La calzada norte opera como pista solo bus, de modo que este caso es útil para complementar los análisis previos.

Es adecuado desarrollar el mismo tipo de análisis comparativo realizado para la pista solo bus. Por las características del esquema no cabe comparar con otro eje, pero tiene sentido hacerlo con el mismo eje en las horas de día laboral en que no rige el esquema. Las variables por considerar son el tiempo de viaje neto de los buses (TVB neto) y la diferencia de este tiempo con el de los autos (DifTVN). En la Figura 7-9 se grafican ambas variables a lo largo de un día laboral en Irarrázaval OP. El área sombreada corresponde al período en el cual se aplica el esquema. El Cuadro 7-5 resume las magnitudes características de los períodos con y sin esquema.

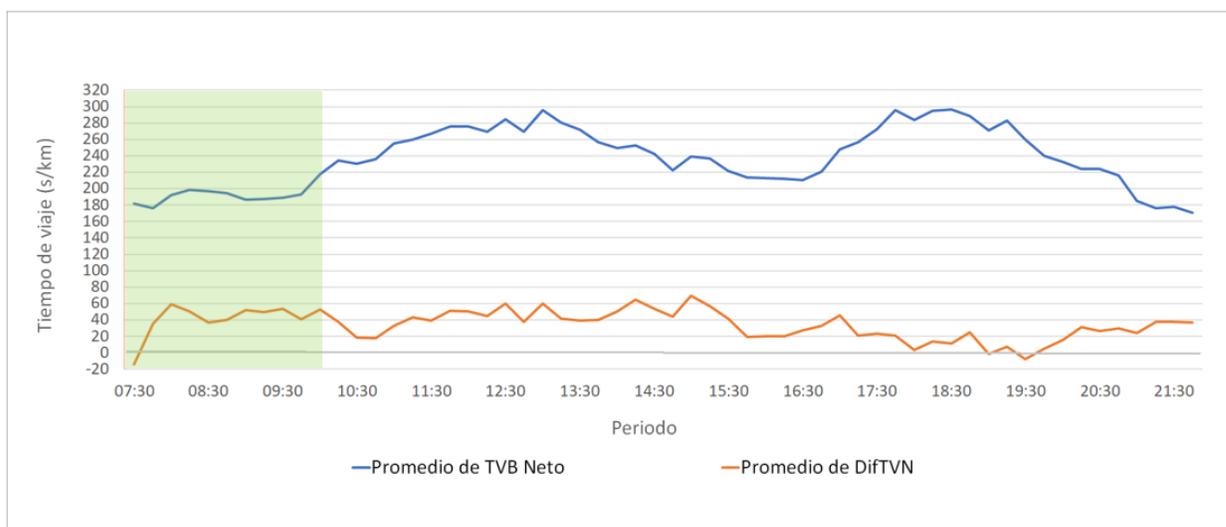


Figura N°7-9 Tiempo de viaje neto de buses y diferencia de tiempo de viaje neto en Irarrázaval OP, día laboral.

Cuadro N°7-5 Magnitudes características Irarrázaval O-P

Período	TVB neto (s/km)	DifTVN (s/km)
Punta mañana (con esquema)	189,3	40,5
Fuera de punta	247,2	41,2
Punta tarde	270,3	12,4

En cuanto a TVB neto, el esquema logra el valor más bajo del día pese a que se trata de un período punta. En cambio, DifTVN tiene un valor tan alto como en fuera de punta y muy superior al de la punta tarde, períodos sin el esquema. Sin duda, el aumento de capacidad para los autos que involucra la reversibilidad les favorece más que la pista solo bus en una calzada a los buses. Es decir, el esquema es exitoso si se mira solamente el tiempo de viaje de los buses, pero no lo es en términos de competitividad con los autos.

El resultado es similar al encontrado en el análisis de la pista solo bus de J.P. Alessandri y no es precisamente alentador en lo referente a la diferencia con los autos. Cabe preguntarse si el enfoque adoptado, para ambos esquemas, de comparar con una referencia pertinente puede ser muy reduccionista para reflejar los efectos buscados. Para tener una perspectiva más amplia en lo referente a DifTVN se ha recurrido al modelo formulado en la Sección 6.3.

7.3. MODELACIÓN

La idea es capturar el efecto de ambos esquemas en el marco de toda la red a través de incorporar variables específicas en el modelo para los Niveles 1 y 2 antes estimado. Esto implica ignorar el efecto en los períodos con congestión significativa, dado que la modelación en ellos no es viable con los datos disponibles. Cabe recordar que, según se ha visto, en tales períodos claramente hay resultados en absoluto unívocos. Entonces, tiene sentido explorar si hay tendencia definida en los otros niveles, que tienen una presencia muy mayoritaria en los ejes con esquemas de prioridad.

Los esquemas se incorporan al modelo mediante tres variables mudas: *IOP* para el esquema de Irarrázaval, que vale 1 en su día y período de aplicación y 0 en otro caso; *psb_{sn}* y *psb_{ns}* para la pista solo bus de Alessandri en sentido SN y NS, respectivamente, que valen 1 para los tramos de ese eje y sentido y 0 para el resto. Se agregan las variables *psb_{sn} * dummyFDS* y *psb_{ns} * dummyFDS* para recoger un eventual efecto diferencial de la pista en fin de semana. Con esto, el modelo queda:

$$DifTVN = c_9 + c_{10} * nis + c_{11} * ndp + c_{12} * dummyFDS + c_{13} * IOP + c_{14} * psb_{sn} + c_{15} * psb_{ns} + c_{16} * psb_{sn} * dummyFDS + c_{17} * psb_{ns} * dummyFDS$$

donde c_9 a c_{17} son los parámetros por estimar. Se ha mantenido la denominación de los que ya figuran en el modelo de la Sección 6.3 para facilitar la comparación de sus estimadores con los obtenidos aquí. El resultado de la estimación se presenta en el Cuadro 7-6.

Cuadro N°7-6 Modelo de diferencia de tiempo de viaje neto con PSB para los Niveles 1 y 2.

	Estimador	Error estándar	t value	Pr(> t)	Significancia
c_9 (s/km)	15,2	1,7	8,8	$< 2 * 10^{-16}$	***
c_{10} (s/int)	2,5	0,3	9,4	$< 2 * 10^{-16}$	***
c_{11} (s/det)	2,2	0,4	5,1	$3,2 * 10^{-7}$	***
c_{12} (s/km)	7,7	1,2	6,6	$4,3 * 10^{-11}$	***
c_{13} (s/km)	9,8	5,5	1,8	0,1	.
c_{14} (s/km)	-0,1	3,0	0,0	1,0	
c_{15} (s/km)	28,7	3,5	8,2	$< 2 * 10^{-16}$	***
c_{16} (s/km)	-8,6	3,4	-2,5	0,0	*
c_{17} (s/km)	-8,6	3,9	-2,2	0,0	*
Códigos de significancia: 0 '***' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1					
Ajuste R^2 : 0,06					

En primer lugar, los valores de los parámetros básicos del modelo (c_9 a c_{12}) son muy similares a los estimados previamente. En día laboral, los esquemas de Irrayazaval y Alessandri NS producen un aumento de DifTVN con respecto a los demás ejes de la red; en Alessandri SN la variación no es significativa (incluso el estimador es casi 0). En fines de semana, el efecto de la pista solo bus en ambos sentidos es idéntico y representa una disminución de DifTVN que prácticamente anula el aumento de esta variable que se experimenta en los demás ejes con respecto al día laboral. Es decir, no hay evidencia de impacto favorable para los buses de estos esquemas en día laboral pero sí la hay en fin de semana para la pista solo bus.

Para contrastar el efecto de los esquemas de prioridad aquí estimado con el determinado en el análisis comparativo con el eje Pedro de Valdivia realizado previamente, es preciso considerar que en el modelo solo se están considerando los datos de Niveles 1 y 2. En cambio, en el análisis comparativo se trabaja con los datos de los 3 niveles en cada día o período de él. Por lo tanto, lo razonable es contrastar los estimadores obtenidos aquí con las diferencias de tiempo de viaje neto calculadas antes para fin de semana y en fuera de punta para el día laboral, situaciones en que predominan fuertemente los Niveles 1 y 2.

Para el esquema de Irarrázaval, que opera solo en punta mañana de día laboral, hay escasos datos de Nivel 1 y 2. No es recomendable entonces hacer comparaciones con el análisis previo. Sin perjuicio de lo anterior, hay coincidencia en el sentido que no se detecta un efecto beneficioso para los buses con respecto a los autos.

Para la pista solo bus, en el período fuera de punta de día laboral se encontró que DifTVN era 31 s/km mayor en sentido NS y 2 s/km menor en sentido SN, con respecto a Pedro de Valdivia. Esto coincide muy bien con los valores estimados con el modelo (28,7 y -0,1, respectivamente). En fines de semana, los valores correspondientes de DifTVN eran 15 y -7 s/km; con el modelo son 27,8 y -0,9 s/km. Teniendo en cuenta que en el primer caso hay datos de Nivel 3 – si bien porcentualmente bajos por ser fin de semana- considerados en el cálculo de DifTVN y que en ellos esta variable disminuye, hay razonable cercanía.

Se concluye que el modelo corrobora los resultados del análisis comparativo con Pedro de Valdivia en el espacio en que cabe contrastar ambas herramientas. En particular, que los efectos de la pista solo bus son claramente distintos en cada sentido de circulación.

7.4. SÍNTESIS

Al examinar tiempos de viaje neto de buses, se muestra que la pista solo bus representa un ahorro en el tiempo de viaje respecto de un eje sin este esquema de gestión de tránsito, siendo este de entre un 10 a un 20% en escenarios no congestionados y entre un 30 y un 40% en presencia de congestión. Sumado a lo anterior, la pista solo bus aporta regularidad a la curva de velocidades de los buses durante los períodos del día, lo que es consistente dado que se trata de un resultado habitual de la implementación de pistas solo bus.

Al cambiar de óptica y situar el marco referencial respecto del modo automóvil, se observa que la pista solo bus no siempre contribuye a establecer una mejora de la competitividad del bus respecto del automóvil y que el efecto depende de condiciones locales. En este sentido, cabe destacar que medidas de gestión que se apliquen en simultáneo, como la reversibilidad, pueden provocar que la brecha bus – automóvil se acentúe aún más, sugiriendo que el foco a adoptar para la implementación de este tipo de medidas debiese considerar de manera integral al bus y al automóvil, replanteando el propósito del cambio que se busca generar. ¿Basta sólo con mejorar los tiempos de viaje de ambos modos? Ciertamente, representa un desafío posicionar al bus como el modo prioritario para este tipo de decisiones. No se puede asumir que la sola implementación de un esquema de prioridad causará los efectos deseados; si se pretende reducir los tiempos de viaje de los buses y simultáneamente darles una ventaja relativa respecto de otros modos debe haber un diseño y gestión acorde a las condiciones locales, utilizando datos de tiempo de viaje de automóviles y buses.

8. CONCLUSIONES.

Contar con datos de tiempos de viaje de buses y automóviles provenientes de distintas fuentes abre un abanico de oportunidades para la exploración y creación de nuevas herramientas tecnológicas que permitan mejorar los niveles de servicio de la infraestructura vial en una ciudad, desde el diagnóstico oportuno de situaciones problemáticas hasta la creación de soluciones a corto y largo plazo. En este contexto, esta investigación centró sus esfuerzos en abordar desde un punto de vista comparativo el análisis de la diferencia en los tiempos de viaje que existe entre automóviles y buses, para posteriormente sentar las bases para la creación de instrumentos sistemáticos que detecten situaciones anómalas del tráfico, con lo cual un tomador de decisiones podría aplicar la solución que mejor se adecúe al problema.

En primer lugar, se analizaron los valores promedio del tiempo de viaje de ambas bases de datos por tramo-período para toda la red por tipo de tramo y de día, para validar el uso de los registros de Waze en automóviles, lo cual entregó las primeras luces sobre el uso de los datos como herramienta de diagnóstico. Se halló que en tramos sin paradero existe una buena concordancia en la evolución durante el día del tiempo de viaje, por tramo-período, entre automóviles y buses. Además, la estimación de la demora en paraderos por tramo-período aplicada mediante el modelo de Cubillos (2018) entregó valores apropiados para esta red, ya que las diferencias en tiempo de viaje de buses en tramos con paradero (descontando la demora en paraderos) y tramos sin paradero hacen sentido.

Al examinar ambas bases de datos en conjunto se determinaron una serie de situaciones que fueron delatadas por diferencias poco usuales entre los tiempos de viaje de automóviles y buses. Si se tratase de un evento que afectara de igual manera a ambos modos el problema podría identificarse con cualquiera de las bases de datos. No obstante, se exhibieron una serie de casos en los cuales la situación estaba ligada sólo a buses, como en el caso de la pista solo bus de Alessandri próxima a un colegio, o sólo a automóviles, como el viraje a la izquierda en un tramo de Irarrázaval, de modo que si contara con datos de un solo modo hubiese sido posible diagnosticar una de las dos situaciones, pero en ningún caso ambas. Esto indica que el contar con una sola base de datos es bastante útil como herramienta de diagnóstico para el modo del cual se disponen registros y, en algunos casos, para identificar situaciones no asociadas a ningún modo en específico; pero se estaría omitiendo información relevante para analizar situaciones que sólo afectan a un modo en particular mediante el contraste de bases de datos.

La detección de situaciones atípicas en los registros de tiempos de viaje conduce a otra interrogante: ¿Son situaciones aisladas o se producen de manera sistemática en el tiempo? Evidentemente, las últimas son más relevantes dado que es posible actuar sobre ellas de modo preventivo, por lo que resulta esencial generar una distinción entre un valor que se escapa de una tendencia sin motivo aparente (anomalía) y un evento que tiene

una duración prolongada y cuyo origen es observable y demostrable en terreno (singularidad). En este contexto, se identificaron umbrales aplicables a esta red a partir de los cuales se arroja una alarma que delata un comportamiento atípico en las tendencias y que, al complementarlo con información externa, es posible determinar si efectivamente corresponde a una singularidad.

La diferencia de tiempo de viaje neto, definida como la diferencia entre el tiempo de viaje neto de los buses y el tiempo de viaje total de los automóviles, cuantificada en promedio de los tramos de la red en cada período, tiene un comportamiento claramente distinguible según el grado de congestión en el período. Cuando no hay congestión apreciable, la diferencia favorece a los autos en una magnitud relevante y bastante estable. A partir del punto en que existe congestión significativa, la diferencia tiende a anularse. Entre ambas situaciones hay una transición. Así se identifican tres regímenes diferentes o niveles del tráfico, que se pueden caracterizar a partir de rangos de tiempo de viaje que cubren diferencias típicas entre automóviles y buses en cada uno. Así, se obtienen valores típicos para los límites que dividen a estos regímenes a partir de la distribución de frecuencia de tiempo de viaje de automóviles, con lo cual se analizaron y cuantificaron las magnitudes características de cada uno de estos niveles.

A raíz de la definición de los niveles de congestión se generó una herramienta para analizar las intersecciones de la red en base a la comparación de los tiempos de viaje en los arcos cuyo fin se encuentra en dicha intersección. Esto resulta útil para jerarquizar las intersecciones de acuerdo al nivel de congestión que presentan, determinar los períodos punta en una red y poder implementar medidas para mejorar los niveles de servicio, sentando las bases para generar una aplicación o algoritmo que permita detectar situaciones anómalas en torno a registros históricos, efectos de medidas de gestión de tránsito mediante el contraste del antes y después, entre otros.

Para entender las magnitudes detrás de las diferencias en tiempo de viaje neto, se realizó un modelo para el Nivel 1 y un modelo conjunto para los Niveles 1 y 2, previo tratamiento de la base de datos para descartar singularidades y valores anómalos. En el modelo de Nivel 1 los parámetros resultaron ser muy consistentes con aquellos obtenidos por los trabajos que antecedieron esta investigación (Cubillos, 2018 y Schneider, 2013), lográndose descomponer de manera satisfactoria la diferencia de tiempo de viaje neto. Se determinó que en día laboral predomina la diferencia vinculada a intersecciones y en fines de semana, ella se equilibra con la de tiempo de crucero. En contraparte, el modelo conjunto de Niveles 1 y 2 se reduce el peso de la componente atribuible a demora en intersecciones. Si bien los modelos arrojaron resultados consistentes, la descomposición puede variar a nivel local o al considerar un subconjunto de la red producto de la alta variabilidad de los datos, limitándolos en su capacidad predictiva. Sin embargo, los modelos aportan directrices para analizar la variación de los parámetros en regímenes de distinto grado de congestión, entregando órdenes de magnitud para ver sobre cuáles factores se debe actuar para reducir la brecha de tiempo de viaje neto entre automóviles y buses.

Por último, se cuantificaron los beneficios de la pista solo bus en términos de tiempo de viaje neto para los buses y también de manera relativa respecto de los automóviles, a partir del análisis comparativo de un eje con este esquema de prioridad frente a uno de tráfico mixto. Se determinó que la pista solo bus cumple su objetivo al reducir los tiempos de viaje de los buses respecto de un esquema sin prioridad, siendo este beneficio mayor en escenarios congestionados, además de mantener los tiempos de viaje neto de buses estables durante el día. Sin embargo, en la perspectiva comparativa respecto de los usuarios de automóviles, se determinó que no existe un efecto sistemático de la pista solo bus. Al examinar un eje en el que coexisten en simultáneo dos medidas como la reversibilidad y la pista solo bus, se halló que, si bien ambos modos se ven beneficiados, el modo automóvil obtiene mucha más ventaja en términos de competitividad. Por ende, para evaluar la implementación de medidas de gestión de tránsito se debe adoptar una mirada amplia del conjunto bus – automóvil, además de prestar atención a condiciones locales, como el diseño de la vialidad y a factores externos, como la estructura de flujos.

8.1. SÍNTESIS

Esta investigación entrega los cimientos para el desarrollo de una herramienta sofisticada destinada al diagnóstico de situaciones del tráfico sólo observando tiempos de viaje de buses y automóviles, es decir, sin la necesidad de observar los fenómenos de manera presencial. Si bien en este trabajo se utilizó una red pequeña dentro de la ciudad de Santiago, la metodología y el razonamiento empleado es aplicable a una red muchísimo más grande, inclusive, del tamaño de una ciudad.

Se mostró estadísticamente que los tiempos de viaje neto de buses y automóviles tienden a converger en presencia de congestión significativa, mientras que sin ella los automóviles tienen una ventaja sistemática sobre los buses.

Se caracterizó la diferencia de tiempo de viaje neto entre modos, determinando las magnitudes características de cada nivel y el origen detrás de las mismas, destacando el efecto de la pérdida de beneficios por coordinación, el cual se pudo cuantificar en Nivel 1 mediante un modelo de regresión lineal que arrojó parámetros muy consistentes con las investigaciones predecesoras a ésta. No obstante, los modelos tienen un ajuste muy bajo, producto de la alta variabilidad de los datos, la cual no sólo existe entre tramo- períodos, sino que también dentro de un mismo tramo-período. Esta condición es bastante restrictiva para actuar de manera focalizada en un sector particular de la ciudad, limitando su uso más bien al diagnóstico e identificación del problema, requiriéndose otro tipo de herramientas para encontrar la solución que más se adecúe a cada situación. Sin embargo, uno de los aspectos positivos a destacar es que los datos se generan de manera continua, ampliando las posibilidades para actuar de manera pronta.

Se cuantificó el beneficio de la pista solo bus a través de un análisis comparativo de dos ejes de la red, estableciéndose que su efecto no era sistemático y que, pese a generar un beneficio sobre el tiempo de viaje neto de los buses, no disminuye la brecha bus – automóvil en términos de tiempo de viaje neto. Este resultado indica que aún queda mucho trabajo en lo que respecta a mejorar la competitividad de los buses frente a los automóviles, ya que aún en presencia de un esquema que es en el papel ventajoso para el bus, la brecha de tiempo de viaje neto no se reduce. Además de esta gran diferencia que existe en cuanto al tiempo de viaje neto, los usuarios del bus tienen además una componente de tiempo de acceso y otra de tiempo de espera, dejando entrever que existe un desafío titánico por posicionar al bus como una verdadera alternativa frente al automóvil.

8.2. LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES DE TRABAJO FUTURO

En el análisis de consistencia de los datos de automóviles se determinó la confiabilidad de los datos para ser empleados en herramientas de diagnóstico en la red. Sin embargo, al considerar los datos individuales por tramo-período de buses y automóviles, la diferencia entre ellas tiene alta variabilidad en casi todo el rango. No ha sido posible encontrar una explicación sólida para esto con la información disponible, y, por lo tanto, se recomienda investigar este tema. En este mismo apartado, una limitante relevante es el hecho de no conocer la metodología de la obtención de los datos de tiempos de viaje de automóviles, los cuales pudieron haber sido obtenidos a partir de modelos de inferencia de tiempos de viaje y no directamente a partir de pulsos GPS.

Para futuras investigaciones sería de gran utilidad contar con pulsos de GPS en intervalos más cortos (por ejemplo, cada 5 segundos), para reducir la interpolación, que podría ser responsable de exagerar, en ocasiones, las diferencias de tiempo de viaje estimadas entre automóviles y buses. Además, se sugiere trabajar con datos granulares y no agregar los datos en día laboral y de fin de semana, para ver si existen comportamientos distintos en cada día, y en particular, en el viernes, ya que se desplaza la punta tarde.

Por otra parte, en la estimación de la demora en paraderos existen dos problemas con los datos para el modelo, pensando en otras aplicaciones. Uno es que el parámetro del tiempo de servicio es sensible al nivel de evasión y si este difiere mucho del que había cuando se estimó el modelo de Cubillos, la validez de la estimación de la demora en paraderos es cuestionable. El otro es que, en la generación de los datos, hay que revisar el procedimiento de identificación de las detenciones pues se encontraron valores demasiado altos en esta red. En esa revisión se recomienda considerar la hipótesis de que el problema esté asociado a la existencia de congestión en paraderos. De ser así, se sugiere incorporarla en la estimación de la demora en paraderos, dado que este indicador jugaría un rol clave en la implementación de mejoras en el transporte público.

También hay que refinar la definición de los extremos de los tramos para evitar que las demoras en paraderos de un cierto tramo puedan afectar al tiempo de viaje del tramo precedente (Tramos con Influencia de Paraderos).

Otra limitante importante es el costo de manejar bases de datos con este nivel de desagregación a gran escala, de modo que se recomienda en primera instancia utilizar esta herramienta para analizar áreas acotadas de una ciudad.

Por último, para generar una herramienta de diagnóstico en una red es recomendable contar con la programación de los semáforos, para analizar el rol que juegan en aquellas intersecciones donde tan sólo uno de los accesos se encuentra congestionado y, en base a ello, plantear soluciones a nivel local y de red en conjunto con la Unidad Operativa de Control de Tránsito.

9. BIBLIOGRAFÍA.

- Arriagada, J., Gschwender, A., Munizaga, M.A., Trépanier, M. (2019). Modeling bus bunching using massive location and fare collection data. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations* 23 (4), 332–344.
- Arriagada, J., Munizaga, M., Guevara, C. y Prato, C. (2022). Unveiling route choice strategy heterogeneity from smart card data in a large-scale public transport network. *Transportation Research C* 134 (2022).
- Bertini, R. y A. El-Geneidy. Modeling Transit Trip Time Using Archived Bus Dispatch System Data (2004). *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 130, No. 1, pp. 56–67.
- Cortés, C., Gibson, J., Gschwender, A., Munizaga, M., y Zúñiga, M. (2011). Commercial bus speed diagnosis based on gps-monitores data. *Transportation Research C*, 19, 695-707.
- Cubillos, R. (2018). Modelo general para la evaluación de infraestructura prioritaria para buses a partir de datos masivos.
- Devillaine, F., Munizaga, M., Palma, C. y Zúñiga, M. (2013). Towards a Reliable Origin-Destination Matrix from Massive Amounts of Smart Card and GPS Data: Application to Santiago. Zmud, J., Lee-Gosselin, M., Munizaga, M. and Carrasco, J.A. (Ed.) *Transport Survey Methods*, Emerald Group Publishing Limited, Bingley, pp. 695-710.
- Diker, A. C., y Nasibov, E. (2012). Estimation of traffic congestion level via fn-dbscan algorithm by using gps data.
- Durán Hormazábal, E. y Tirachini Hernández, A. (2016-11). Estimation of travel time variability for cars, buses, metro and door-to-door public transport trips in Santiago, Chile.
- Gibson, J., Munizaga, M., Schneider, C. y Tirachini, A. (2015). Median Busways versus Mixed-Traffic: Estimation of Bus Travel Time under Different Priority Conditions with Explicit Modelling of Delay at Traffic Signals. *TRB 94th Annual Meeting Compendium of Papers*.
- Gibson, J. (2019) Definición y estimación de demora por congestión. Informe no publicado, elaborado en el marco del proyecto “Piloto de la plataforma de monitoreo de congestión vial”.
- Gschwender A., Munizaga, M. y Simonetti, C. (2016). Using smart card and GPS data for policy and planning: The case of Transantiago. *Research in Transportation Economics*, Volume 59, 2016, 242-249.
- Kong, X., Xu, Z., Shen, G., Wang, J., Yang, Q., y Zhang, B. (2015). Urban traffic congestion estimation and prediction based on floating car trajectory data. *Future Generation Computer Systems*.

- Ma, Z.-L., Ferreira, L., Mesbah, M., & Hojati, A. T. (2015). Modeling Bus Travel Time Reliability with Supply and Demand Data from Automatic Vehicle Location and Smart Card Systems. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2533, 17–27.
- Munizaga, M y Palma, C. (2012) Estimation of a disaggregate multimodal public transport Origin Destination matrix from passive smart card data from Santiago, Chile. *Transportation Research C*, 24:9_18.
- Pattara-atikom, W., Pongpaibool, P., y Thajchayapong, S. (2006). Estimating road traffic congestion using vehicle velocity.
- Porikli, F., y Li, X. (2004). Traffic congestion estimation using hmm models without vehicle tracking. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*.
- Ranjitkar, P., Tey, L.-S., Chakravorty, E., & Hurley, K. L. (2019). Bus Arrival Time Modeling Based on Auckland Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 036119811984062.
- Sananmongkhonchai, S., Tangamchit, P., y Pongpaibool, P. (2008). Road traffic estimation from multiple gps data using incremental weighted update.
- Schneider, C. (2013). 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.
- Shankar, H., Raju, P. L. N., y Rao, K. R. M. (2011). Multi model criteria for the estimation of road traffic congestion from traffic flow information based on fuzzy logic. *Journal of Transportation Technologies*.
- Surprenant-Legault, J. y El-Geneidy, A. (2011). Introduction of Reserved Bus Lane. Impact on Bus Running Time and On-Time Performance. *Transportation Research* N°2218.
- Tirachini, A., Camus, L. y Cruz, D. (2015). Modelación de tiempos de detención de buses en paraderos de Santiago y Valparaíso-Viña del Mar. *Ingeniería de Transporte* Vol. 19, N° 02 103-116
- Yang, Y., Xu, Y., Han, J., Wang, E., Chen, W., y Yue, L. (2017). Efficient traffic congestion estimation using multiple spatio-temporal properties. *Neurocomputing*.