



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

EFFECTOS DE EXPANSIÓN DE CAPACIDAD VIAL EN CONGESTIÓN Y SU INTERACCIÓN CON OTRAS POLÍTICAS URBANAS

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

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

IGNACIO TOMÁS RIQUELME CARRASCO

PROFESORES GUÍA:
LEONARDO BASSO SOTZ
HUGO SILVA MONTALVA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LUIS RIZZI CAMPANELLA
ALEJANDRO TIRACHINI HERNÁNDEZ

Este trabajo forma parte del proyecto Fondecyt numero 1130133

SANTIAGO DE CHILE
2016

Resumen

El propósito de este trabajo es el estudio de los efectos de una inversión en capacidad vial, analizando en detalle dos relevantes aristas. En primer lugar, estudiar las consecuencias en los costos generalizados asociados a los modos disponibles. Un importante objetivo de esta primera parte es el análisis de la veracidad de la paradoja de Downs-Thomson y la búsqueda de las variables principales que determinan la existencia de esta hipótesis. En segundo lugar, estudiar el beneficio social de aumentar la capacidad vial, tanto en ausencia como en presencia de otras políticas urbanas para combatir la congestión. El objetivo principal de esta tesis es obtener conclusiones que permitan entregar recomendaciones sobre políticas de transporte.

Para esto, se utiliza un modelo donde la demanda de viajes totales es sensible a cambios en los precios y tiempos de viajes. Específicamente el modelo es caracterizado por dos períodos de viaje, el transporte público y privado son sustitutos y existe congestión cruzada entre ambos modos. El estudio se basa en la extensión del modelo microeconómico de equilibrio parcial de Basso y Silva [2014], quienes modelan las decisiones de los usuarios junto con las decisiones de los operadores del servicio público y políticas urbanas en decisión del planificador. En este estudio se simulan escenarios tomando datos de la ciudad de Londres en donde se analiza la eficiencia de invertir en capacidad vial en condiciones normales de tráfico mixto. Además se compara su eficiencia con otras políticas como dedicación exclusiva de buses, tarificación por congestión, subvención al transporte público y combinaciones entre éstas.

De este estudio se desprenden dos resultados principales. Una primera conclusión es que en la mayoría de los escenarios analizados, la paradoja de Downs-Thomson no se cumple debido a la consideración de un modelo de demanda con sustitutos imperfectos (hipótesis expuesta en Basso y Jara-Díaz [2012]) y a la congestión presente, la cual genera que la curva de costo generalizado del transporte público no sea siempre decreciente. Un segundo resultado principal es que en términos de eficiencia, los resultados muestran que en una situación urbana altamente congestionada (tráfico mixto), la capacidad del sistema de transporte público, en particular de su cuello de botella, los paraderos de buses, son fundamentales. La mejora gradual de este sistema abrirá el camino a utilizar políticas de gestión (vías exclusivas) y de precios (subsidios y tarificación por congestión) en lugar de grandes expansiones de capacidad vial para reducir la congestión. Esto se traduce en que en un marco de análisis de costo-beneficio estricto para solucionar la congestión, se debe tomar en cuenta las consecuencias en nivel de congestión de la política a implementar y no el grado de congestión presente.

Agradecimientos

En estos momentos es completamente necesario hacer una pausa para agradecer a todas las personas que me acompañaron en esta hermosa aventura que fue mi estadía en la Universidad de Chile. Una etapa llena de vivencias que serían imposibles de reflejar en sólo una página.

Quiero, en primer lugar, agradecer a mi hermosa familia, que apoyó cada una de mis locuras desde el momento cero, y entendió que mi felicidad radica en, valga la redundancia, ir en la búsqueda continua de mi felicidad. A mi padre, por ese incansable esfuerzo por cada uno de nosotros, esa interminable preocupación, por esa eterna disposición a que no nos falte nunca nada aunque él no lo tuviera. A mi madre, fuente infinita de amor, de esfuerzo, de trabajo, de preocupación por los demás, de unión. Un ángel y un pilar de amor que cualquier familia de esta tierra quisiera. A mi hermano, mi amigo, mi confidente, mi segundo padre, mi ejemplo a seguir, mi profesor, mi ayudante, mi consejero, mi compañero. Difícilmente sería la persona que soy en estos momentos si no hubieras estado presente tu. Ejemplo de inteligencia, superación y de lucha por hacer lo que uno quiere. Ejemplo de valores, de moral, de conciencia social. A ustedes, a cada uno, los amo y nada de este viaje sería igual sin su eterna ayuda. En segundo lugar, quería agradecer a mi segunda familia, esa familia que uno elige, a mis amigos, marcados principalmente por dos grupos. Mis eternos y amados KL2, presentes siempre, en las buenas y en las malas, en cada cumpleaños, eternos compañeros de juegos e historias. Personas que son capaces de llevar al borde mis aptitudes, sin siquiera ser conscientes de ello. Niños y niñas que con el pasar del tiempo se han convertido en hombres y mujeres, forjando futuros, deseos y sueños con humildad, trabajo y esfuerzo. A todos y cada uno de ustedes, los tengo siempre presentes en mi corazón. Un segundo grupo selecto de amigos lo ha forjado mi pasión desde los 4 años, el básquetbol. Hermoso deporte que me ha entregado valores, disciplina, responsabilidad, pero por sobretodo, amigos. Gladiadores, enfermos mentales como en algún momento nos denominaron, que día a día dejan la vida entrenando, sacrificando amigos, vacaciones, celebraciones, entretención, por el sólo hecho de intentar ser el mejor en tu pasión. A todo ustedes, amigos, eternas gracias por el compartir, por la ayuda, por la comprensión, por las risas, por hacer de esa hermosa naranja, un real estilo de vida. Agradezco también a Don Oscar, quien prácticamente se convirtió en un padre para mí en la U, quien me soportaba absolutamente todos los días en el gimnasio, prestándome cosas, retándome, aconsejándome, felicitándome, entre otros. Su humildad, entrega y vocación de servicio por los demás no la olvidaré jamás. Por último, te doy las gracias a ti, por presentarte en esta etapa de mi vida, y hacer que la perfección no sea una palabra inalcanzable. Gracias por el apoyo, por la comprensión y por todo esto que siento dentro de mí. A todos ustedes, les dedico esto, que estoy seguro que no es más que el principio de un nuevo gran viaje. Eternas Gracias. Finalmente, agradezco al Departamento de Postgrado y Postítulo de la Vicerrectoría de Asuntos Académicos por el financiamiento del programa *Ayuda para estadías cortas de Investigación destinadas a estudiantes tesistas de Doctorado y Magister de la Universidad de Chile*.

Tabla de Contenido

Tabla de Contenido	IV
Índice de figuras	VI
Índice de cuadros	VIII
Lista de definición de símbolos	IX
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estructura de la tesis	3
2. Revisión Bibliográfica	4
2.1. Modelos Empíricos	6
2.2. Modelos Teóricos	7
3. Modelo y extensiones	14
3.1. Modelo Basso-Silva	14
3.1.1. Demanda	15
3.1.2. Tiempos de Viaje	16
3.1.3. Costos	18
3.1.4. Problema de Optimización	19
3.2. Parámetros	22
3.3. Extensiones	23
4. Paradoja de Downs-Thomson	27
4.1. Tráfico separado	27
4.1.1. Resultado Base	28
4.1.2. Análisis de sensibilidad: funciones de congestión y modelo de demanda	30
4.1.3. Análisis de sensibilidad: otros parámetros	33
4.2. Adición políticas urbanas	35
4.2.1. Subsidio	35
4.2.2. Tarifación por congestión	39

4.3. Tráfico mixto	41
5. Eficiencia y Sustitución de Políticas	49
5.1. Efectos de la inversión de capacidad vial en políticas	50
5.1.1. Base	50
5.1.2. Inversión en capacidad	53
5.2. Interés de inversión en capacidad	60
5.2.1. Análisis de sensibilidad: costo capacidad adicional	63
6. Conclusiones y Líneas Futuras de Investigación	68
6.1. Síntesis y conclusiones	68
6.2. Líneas futuras de Investigación	72
Bibliografía	74
A. Anexos	77

Índice de figuras

2.1. Hipótesis de Downs-Thomson	5
2.2. Paradoja de Downs-Thomson	5
2.3. Modelo de red general	7
2.4. Congestión y Expansión de Capacidad, Romilly [2004]	9
2.5. Basso y Jara-Díaz [2012]	12
2.6. Basso y Jara-Díaz [2012], caso 1	12
2.7. Basso y Jara-Díaz [2012], caso 2	13
3.1. Arbol de decisión	15
4.1. Tráfico separado, Capacidad Sistema Baja	36
4.2. Subsidio al Transporte Público, Capacidad Sistema Baja	36
4.3. Tráfico separado, Capacidad Sistema Media	37
4.4. Subsidio al Transporte Público, Capacidad Sistema Media	38
4.5. Tarificación por congestión, Capacidad Sistema Baja	40
4.6. Tarificación por congestión, Capacidad Sistema Media	40
4.7. Tráfico mixto, Capacidad Sistema Baja	43
4.8. Tráfico mixto, Capacidad Sistema Media	43
4.9. Subsidio, Capacidad Sistema Baja	45
4.10. Subsidio, Capacidad Sistema Media	46
4.11. Tarificación por congestión, Capacidad Sistema Baja	47
4.12. Tarificación por congestión, Capacidad Sistema Media	47
5.1. Aumento de Bienestar Social desde caso Base, Resultados Basso y Silva [2014]	51
5.2. Aumento de Bienestar Social por aplicación de Políticas urbanas	53
5.3. Expansión de capacidad Vial y interacción con otras políticas urbanas	54
5.4. Ganancias en Bienestar social de políticas urbanas con Capacidad Sistema de Paraderos Media	55
5.5. Bienestar social, Políticas urbanas, Capacidad Sistema Baja	61
5.6. Bienestar social, Políticas urbanas, Capacidad Sistema Media	62
5.7. Aumento de BS, Inversión 16,67 %, Capacidad Sistema Baja	64
5.8. Aumento de BS, Inversión 16,67 %, Capacidad Sistema Media	65
5.9. Aumento de BS, Inversión 33,33 %, Capacidad Sistema Baja	65

5.10. Aumento de BS, Inversión 33,33 %, Capacidad Sistema Media	66
---------------------------------------------------------------------------	----

Índice de cuadros

3.1. Parámetros ciudad de Londres	23
3.2. Tiempos de transferencia	25
4.1. Situación actual y con Expansión de capacidad	29
4.2. Costos Generalizados, Período Peak	29
4.3. Costos Generalizados, Período Off-Peak	29
4.4. Costos Generalizados, Capacidad Sistema Baja	31
4.5. Costos Generalizados, Capacidad Sistema Media	31
4.6. Costos Generalizados, Capacidad Sistema Alta	32
4.7. Costos Generalizados, Capacidad Sistema Irrestringida	32
4.8. Velocidades modales, Período Peak, Capacidad Sistema Baja	42
4.9. Velocidades modales, Período Off-Peak, Capacidad Sistema Baja	42
5.1. Resultados, expansión de 16,67 %	56
5.2. Resultados, expansión de 33,33 %	58
5.3. Costos Construcción y uso del espacio por km	67

Lista de definición de símbolos

1. Variables

f	Frecuencia	[buses/h]
f_q	Frecuencia del período q	[buses/h]
k	Capacidad buses	[pax]
n	Fracción de la capacidad dedicada a los buses	[]
p	Número de paraderos equiespaciados por km	[]
P_{qa}	Cobro por congestión al automóvil en el período q	[\$/km]
P_{qb}	Tarifa bus en el período q	[\$/km]
Y_{qa}	Demanda modo auto en el período q	[pax/km]
Y_{qb}	Demanda modo bus en el período q	[pax/km]

2. Funciones

b	Factor de equivalencia bus-auto
$cost_{qb}$	Costo de un viaje en bus
$cost_{qa}$	Costo de un viaje en auto
t_{acc}	Tiempo de acceso modo bus
t_e	Tiempo de espera modo bus
t_b^q	Tiempo de viaje modo bus en el período q
t_a^q	Tiempo de viaje modo auto en el período q
cg_b^q	Tiempo de viaje generalizado modo bus en el período q
cg_a^q	Tiempo de viaje generalizado modo auto en el período q
t_q	Demoras por colas
t_{ad}^q	Demora por aceleración y frenado
t_d	Tiempo de detención
B	Tamaño de Flota
BS	Bienestar Social
EC	Excedente de los consumidores
EP	Excedente de los productores
CO	Gasto de operación del sistema de buses
U_{qm}	Utilidad modo m en el período q
ϵ	Fracción del tiempo de operación en paraderos que perciben los automóviles

3. Parámetros

a	Tasa de ocupación vehículo particular	[pax/veh]
c_{0a}	Costo de operación de un automóvil	[\$/km]
t_p	Tiempo de despeje más tiempo muerto en paraderos	[seg]
t_{sb}	Tiempo marginal de subida al bus	[seg/pax]

l	Largo de viaje promedio	[km]
Q	Capacidad de la vía	[veh/h]
H^q	Número de horas del período q	[h]
V_c	Velocidad de caminata	[km/h]
λ	Utilidad marginal del ingreso	[Utiles/\$]
θ	Fracción asociada al tiempo de espera	[]
β_{qm}	Utilidad marginal del tiempo para el modo m en el período q	[Utiles/min]
θ_{qm}	Constante modal modo m en el período q	[Utiles]
μ	Grado de sustitución entre los períodos	[]
$cmfp$	Costo marginal de los fondos públicos	[%]
η	Costo de aplicar y operar la tarificación por congestión	[%]
CA	Costo adicional de implementación y operación de pistas sólo bus	[\$/día-km]
C_{cap}	Costo de adicionar capacidad vial	[\$/día-km]

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Es de común acuerdo que en la actualidad la congestión vehicular es uno de los grandes problemas que existen en zonas urbanas, tanto de países desarrollados como en los países en vías de desarrollo. La congestión del tráfico crea un número considerable de costos adicionales al aumento del tiempo de viaje, entre los cuales se consideran el costo psicológico, el costo de oportunidad de cada usuario, el gasto de combustible extra por mayores detenciones y, aún más, los costos ambientales y sociales asociados con la contaminación acústica y atmosférica generada. Como ejemplo, Downs [2005] muestra que el Instituto de Transporte de Texas estima que en esta misma ciudad los costos de congestión son superiores a 101 millones de dólares en 75 áreas metropolitanas durante el año 2010 debido a los retrasos de tiempo (4,8 mil millones de horas) y de combustible consumido (1,9 mil millones de galones adicionales). Es por esto que se hace imprescindible tener una visión de largo plazo respecto al desarrollo de soluciones factibles en ciudades urbanas en estos ámbitos y analizar de qué forma se abordan este tipo de problemas.

En este contexto, existen dos tipos de políticas para lidiar con la creciente congestión urbana. Un primer enfoque es mejorar el uso de la infraestructura vial existente, aumentar la eficiencia del uso del espacio (priorizar el uso del transporte público por sobre el transporte privado), promover otros medios de transporte y generación de viajes en horarios fuera de punta. En este camino se puede optar por medidas como carriles exclusivos de buses, diseños espaciales eficientes para buses, subsidios al transporte público, intermodalidad entre buses y bicicletas, tarifificar óptimamente el transporte privado, entre otros. El segundo enfoque es simplemente aumentar la capacidad vial existente. Este segundo camino es usualmente señalado como el más lógico a seguir, pero a través del tiempo, investigaciones han planteado que esta decisión puede conducir a un equilibrio desfavorable.

Con respecto al primer enfoque, la forma en que se ha estudiado en la literatura las consecuencias de una decisión de esta tendencia, es optimizando las variables de diseño de servicio agregando de la forma más realista posible las políticas que se quieran implemen-

tar. Trabajos que consideren de manera completa, en un modelo conjunto, tarificación vial, vías exclusivas, subsidios y optimización de servicios programados de transporte público, prácticamente no se han desarrollado. Sí existen investigadores que han estudiado diferentes aspectos de este enfoque, sin embargo muy pocos de ellos considera la integración de todas las variables del problema. En cuanto al segundo enfoque, uno de los grandes aportes en esta línea se detalla en Mogridge [1997], donde se explicita que en una ciudad bajo condiciones de congestión, un aumento en la capacidad vial para los autos genera un escenario peor que el inicial para todos los usuarios, tanto de automóvil como de transporte público, situación conocida como la paradoja Downs-Thomson. Sin embargo, los supuestos bajo los que sucede esta paradoja conviven en comportamientos de los usuarios que difieren de la realidad, como son la consideración de modelos de demanda con sustitutos perfectos, inelasticidad entre períodos, entre otros. Un número importante de investigadores han tanto validado como refutado esta hipótesis en términos empíricos, manteniendo abierta aún la discusión sobre la veracidad de la paradoja.

De esta manera, existen modelos teóricos simplificados y variados estudios empíricos que intentan responder las consecuencias que tiene sobre un sistema de transporte la expansión de la capacidad vial cuando se está en presencia de congestión urbana. Para esto, es clave poder capturar ambas tendencias aplicadas a un modelo microeconómico robusto.

Este trabajo tiene por objetivo estudiar los efectos de la inversión en capacidad vial en un entorno con la demanda de viajes imperfectamente elástica y donde el transporte público y privado son sustitutos imperfectos. Este documento también estudia la interacción entre los dos enfoques, es decir, se compara la eficiencia de otorgar exclusividad de uso vial a los buses, tarificar a los autos por congestión, subvencionar el transporte público y expandir la capacidad vial en cada uno de estos escenarios, para luego investigar las complementariedades entre estas medidas si es que están presentes.

1.2. Objetivos

Objetivo General

Estudiar los efectos de expansión de capacidad vial junto con otras políticas (de primer mejor) asociadas a combatir la congestión vial tales como: Tarificación por congestión, subsidio al transporte público y vías exclusivas, robusteciendo el modelo teórico microeconómico de Basso y Silva [2014] e implementándolo computacionalmente. Es objetivo también estudiar la veracidad de la paradoja de Downs-Thomson, y clarificar las variables determinantes que hacen que se sostenga o no en los diferentes escenarios. En este análisis, se irá en búsqueda de conocer óptimos sociales, ventajas y desventajas para los diferentes actores involucrados y de variables que indican el nivel de servicio asociados al sistema de transporte tales como velocidades comerciales, frecuencias, tamaño de bus, número de paraderos, entre otros.

Objetivos Específicos

- Adaptar y mejorar el modelo microeconómico desarrollado en Basso y Silva [2014], de forma de poder estudiar los efectos que genera una expansión de capacidad vial.
- Definir escenarios para ser simulados con el objetivo de evaluar y comparar los efectos de los diferentes elementos del modelo en presencia de un aumento de capacidad.
- Analizar variables y parámetros más sensibles del modelo de forma de encontrar bajo qué circunstancias la paradoja de Downs-Thomson es válida y bajo cuáles no.
- Recomendar acerca de la implementación de políticas de expansión vial en conjunto con otras políticas urbanas para combatir la congestión vial.

1.3. Estructura de la tesis

En la primera parte de este documento se encuentra una revisión de la literatura reciente que tiene relación directa con esta investigación. En esta revisión, se consideran aportes desde los años 60, que fue cuando comenzaron a generarse las primeras interrogantes referentes a este tema, hasta contribuciones de esta década. A partir de la literatura revisada en esta sección, se identifican elementos que son esenciales a considerar en el estudio.

Posterior a la revisión, en el capítulo 3, se presenta el modelo expuesto en Basso y Silva [2014] junto con las extensiones realizadas en esta tesis que permiten hacer el análisis deseado. Junto con esto, se presentan los parámetros asociados a la ciudad de Londres para la simulación de los escenarios considerando el modelo adoptado.

En el capítulo 4, se detallan los resultados obtenidos alusivos a la paradoja de Downs-Thomson, en el cual se da a conocer las variables determinantes de su existencia y una exposición gráfica de los diferentes escenarios considerados, comparándolos en diferentes casos.

Los resultados obtenidos referidos al segundo objetivo de esta tesis, esto es, el estudio de cómo afecta la existencia de políticas urbanas en la implementación de una política de expansión de capacidad vial, se presenta en el capítulo 5. En esta sección se muestra un análisis de eficiencia y sustitución en cada uno de los escenarios en términos de bienestar social. Junto con esto, se realiza un análisis de las variables de optimización determinantes en los resultados finales de cada escenario.

En el último capítulo de este documento, se presentan las conclusiones generales más importantes junto con la descripción de las líneas futuras de investigación más relevantes que se desprenden de esta tesis.

Capítulo 2

Revisión Bibliográfica

La literatura existente sobre los efectos que puede llegar a tener una inversión de capacidad vial en un sistema de transporte data de Downs [1962] y Thomson [1977], y algo que hoy se conoce como la paradoja de Downs-Thomson (presentado por Mogridge [1997]). La idea esencial tras la paradoja es que el aumento de capacidad vial para los autos generará atraer a la gente al abandono del transporte público, que a su vez tendrá que disminuir su calidad de servicio debido a la cantidad de usuarios reducida, en particular, densidad de rutas y frecuencias. Esto volverá a empujar a la gente de tránsito a los vehículos particulares, induciendo más congestión y un sistema de transporte público peor. En consecuencia, una situación peor causada por el tráfico inducido. La Figura 2.1, CGa representa el costo generalizado de un viaje en automóvil de un conductor. Debido a la congestión, esta función aumenta con el número de usuarios que optan por este modo. Por otro lado, CGb es el costo generalizado para un usuario que viaja en transporte público, función que disminuye con el aumento de usuarios en este modo debido al efecto Mohring, es decir, el aumento de pasajeros induce un aumento en la frecuencia, lo cual disminuye el tiempo de espera de todos los usuarios. Si la demanda total de los viajes es Y , entonces la hipótesis de Downs-Thomson establece que la intersección determinará el reparto modal, ya que ningún consumidor puede disminuir unilateralmente su tiempo de viaje. La paradoja de Downs-Thomson es explicada gráficamente en la Figura 2.2 donde un aumento en la capacidad vial desplazará la curva de la congestión de los autos tal que para un igual número de conductores, el costo generalizado es menor. Esto genera un incentivo a la gente a abandonar el sistema de transporte público, lo que lleva a un nuevo equilibrio peor que antes.

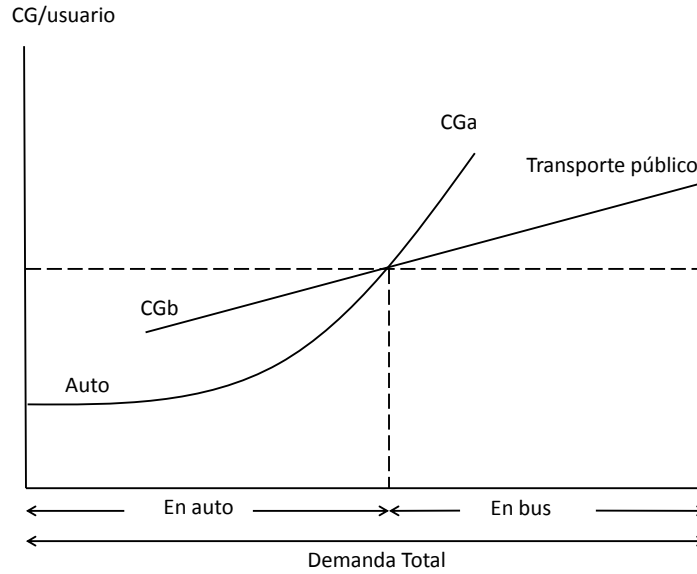


Figura 2.1: Hipótesis de Downs-Thomson

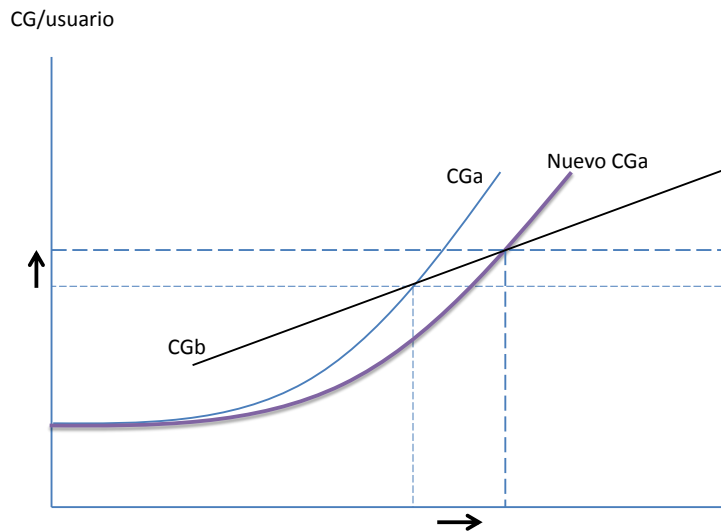


Figura 2.2: Paradoja de Downs-Thomson

Detractores, sin embargo, argumentan que la relación Capacidad vial-Tráfico no es clara. Si se continuase con el argumento de la Paradoja, la capacidad vial óptima resultante tendería a cero, lo cual sería algo irracional. De hecho, en la práctica, se tiene que en la

mayoría de las ciudades, siempre existe un cierto aumento en la capacidad vial a lo largo del tiempo. ¿Serán todas estas decisiones ineficientes?

2.1. Modelos Empíricos

En Mogridge [1997] se expone una detallada revisión en donde se presentan significativos aportes en investigación referente a condiciones de tráfico urbano bajo expansiones de capacidad. En este contexto, un número importante de investigaciones consideran estudios empíricos, donde, en base a estadísticas, se obtienen resultados que indican el comportamiento del sistema. En esta revisión también se detallan resultados de investigadores que presentan una contraposición de lo expuesto por Downs y Thomson, argumentando que el tráfico en una red de vías congestionadas establece un equilibrio en el nivel de rendimiento máximo que la red puede mantener, y que esto reducirá al mínimo el tiempo total del viaje para una demanda determinada. Estos argumentos conviven en supuestos levemente diferentes a los expuestos por Downs-Thomson pero interesantes de notar. Teniendo en cuenta estas diferentes conclusiones de la revisión, Mogridge llega a la conclusión que la mejor política para aumentar las velocidades (disminuir el costo generalizado) de los modos en una zona urbana es la inversión en calidad del servicio de transporte público.

Otro de los significativos aportes en el marco de modelos empíricos se presenta en Duranton y Turner [2011] donde en un estudio basado en el comportamiento de sistemas de transporte de diferentes ciudades de Estados Unidos, con avanzadas técnicas de econometría y estadística se obtiene como resultado una relación unívoca entre la expansión de capacidad vial y la intensidad del tráfico en un largo plazo, hipótesis llamada *The fundamental law of road congestion*. En este estudio se considera un equilibrio de largo plazo teniendo en cuenta variables que no han sido considerada en modelos teóricos como relocalización de hogares, cambios de ruta en los viajes, entre otros. El indicador semejante considerado para poder comparar los resultados de esta investigación con la hipótesis de Downs y Thomson son los vehículos kilómetros recorridos (VKT). Considerando un horizonte determinado de tiempo se concluye que la elasticidad entre VKT y la capacidad vial presente es igual a uno para vialidades interestatales y menor a uno para otro tipo de vialidad debido principalmente a la migración, los aumentos en la conducción de los residentes actuales y los aumentos en el tráfico comercial (camiones). Por otra parte, Hsu y Zhang [2014] encuentran evidencias empíricas en rutas interurbanas de Japón que la elasticidad entre estas variables es siempre al menos igual a uno, obteniendo elasticidades entre 1,24 y 1,34, resultados que distan de mantener el tráfico en las mismas condiciones que antes de una expansión, si no mas bién un aumento mayor de la demanda inducida y por consiguiente un escenario con velocidades menores. En resumen, en estos trabajos se estudia la veracidad de la ley fundamental descrita por Downs [1962] sobre la base de su relación de la elasticidad vial con respecto al tráfico. Sin embargo, investigadores como Hsu, Zhang, entre otros, afirman que la validez de esta ley fundamental se puede inferir con mayor firmeza mediante el estudio de la relación entre las velocidades de desplaza-

miento, tiempo y capacidad de las vías en un modelo integrado. La investigación en esta dirección es la deseable para alcanzar un mejor entendimiento de la ley fundamental y otros temas relacionados con la congestión del tráfico.

2.2. Modelos Teóricos

Otra forma de conocer el comportamiento de un sistema de transporte bajo una expansión de capacidad es mediante modelaciones teóricas en donde existen dos marcadas tendencias de abordar este problema por los investigadores. El primero considera un análisis con modelos de colas, suponiendo tasas de llegada y redes simplificadas que modelan la elección entre diferentes modos de transporte y variables asociadas a una congestión dinámica. Una segunda tendencia de investigación es con modelos microeconómicos de comportamiento de los agentes involucrados, en donde se explicitan funciones de costos, tiempo, bienestar social, contextualizado en un escenario con congestión estática, considerando en un equilibrio el comportamiento tanto de los operadores como de los usuarios.

En esta primera tendencia, Afimeimounga et al. [2005] y Guo et al. [2014] utilizan modelos simples con sistemas de cola, funciones de costos de capacidad lineal y usuarios semejantes para el análisis de la respuesta del sistema frente a aumentos de capacidad. En la siguiente figura se muestra un modelo de red tipo que se ocupa en este marco de investigaciones donde se asumen procesos Poisson independientes en la llegada de parámetros λ , distribución exponencial asociada con un promedio $\frac{1}{\mu}$, colas Q , probabilidades de elección P y finalmente R y T definiendo los medios de transporte disponibles, en este caso privado y público repectivamente.

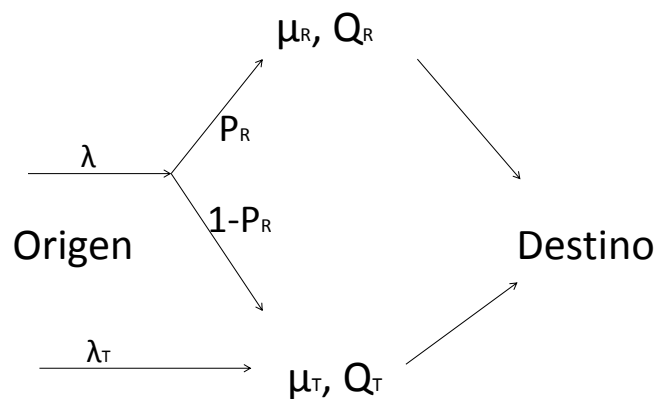


Figura 2.3: Modelo de red general

En este contexto, se tiene que en un análisis de la paradoja de Downs-Thomson, bajo los mismos parámetros de un escenario, no existe un equilibrio único. Junto con esto, se sostiene que esta paradoja es causada por la presencia de economías de escala en el servicio de transporte público en conjunto con la condición de autofinanciamiento. Si bien esta es una versión en teoría de colas de la paradoja, es importante notar que algunos de los resultados de esta arista de investigación, diferente a la que se propone en esta tesis, son semejantes a resultados obtenidos en otro tipo de análisis, como lo expresado en David y Foucart [2014], referente a la multiplicidad de equilibrios bajo un mismo escenario. Sin embargo, los resultados obtenidos en esta línea de investigación carecen de diseño de variables de servicio (consideración de tiempos de viaje con funciones simplistas y comportamiento proporcionales con variables como frecuencias, número de paraderos, entre otros), presumen comportamientos con esperanzas en las demoras, sus funciones de costos son simples, lineales, no existe efectos cruzados entre los modos disponibles y los efectos de adición de capacidad son integrados en los parámetros por lo cual se presupone un comportamiento que hasta el día de hoy no es completamente determinado con exactitud.

La segunda tendencia de investigación en este marco teórico involucra muchas y diferentes modelaciones referentes a los efectos y consecuencias que tiene una expansión de la capacidad vial que deja en claro la importancia que tiene este hecho en el desarrollo de los sistemas de transporte en las ciudades.

Resultados interesantes en este segmento se presentan en David y Foucart [2014] con una modelación teórica microeconómica de teoría de juegos en donde muestran que la combinación de la congestión cruzada entre los modos disponibles y externalidades de la red con usuarios heterogéneos puede llevar a diferentes equilibrios. En este contexto, se identifican dos fuentes de ineficiencias. La sub-utilización de transporte público implica que, en el margen, más viajeros deben utilizar el transporte público. Esta ineficiencia se puede resolver fácilmente. La falla de coordinación sugiere que los viajeros combinan en un mal, el equilibrio Pareto dominado. En presencia de estos equilibrios múltiples, la decisión de coordinación puede ser imposible de mejorar por el planificador social. Su incapacidad proviene del hecho mismo de que la función es maximizar el bienestar total. Si las creencias son tales que los pasajeros están encasillados en un mal equilibrio, su mejor respuesta es tomar la decisión política que maximiza el bienestar total dado las decisiones de los viajeros. Por lo tanto, no se trata sólo de las decisiones de un planificador social que influyen en la forma en que las personas viajan en una ciudad, también es la forma en que las personas viajan, y lo más importante la forma en que esperan que otros viajan, que determina las decisiones de política.

En la práctica, la congestión del tráfico no es un problema en los horarios fuera de punta, por lo que la demanda de viajes está por debajo de la capacidad vial y el concepto de restricción de capacidad en estos períodos es redundante. En este sentido, Romilly [2004] propone un modelo considerando solo el horario Peak, incluyendo la capacidad como una variable de optimización restringida por una demanda que cubre siempre la nueva

capacidad, suponiendo que en un largo plazo siempre se vuelve a un escenario de costos semejantes. En un corto plazo, los planificadores de transporte toman la decisión de construir más capacidad vial para reducir la congestión del tráfico y aumentar las velocidades. Este aumento de la capacidad genera en un plazo indeterminado llegar nuevamente a una condición del sistema similar a la anterior a la expansión aún con más tráfico por vialidad, en particular autos, negando así el propósito de un proyecto de este tipo lo cual se expresa gráficamente en la siguiente figura.

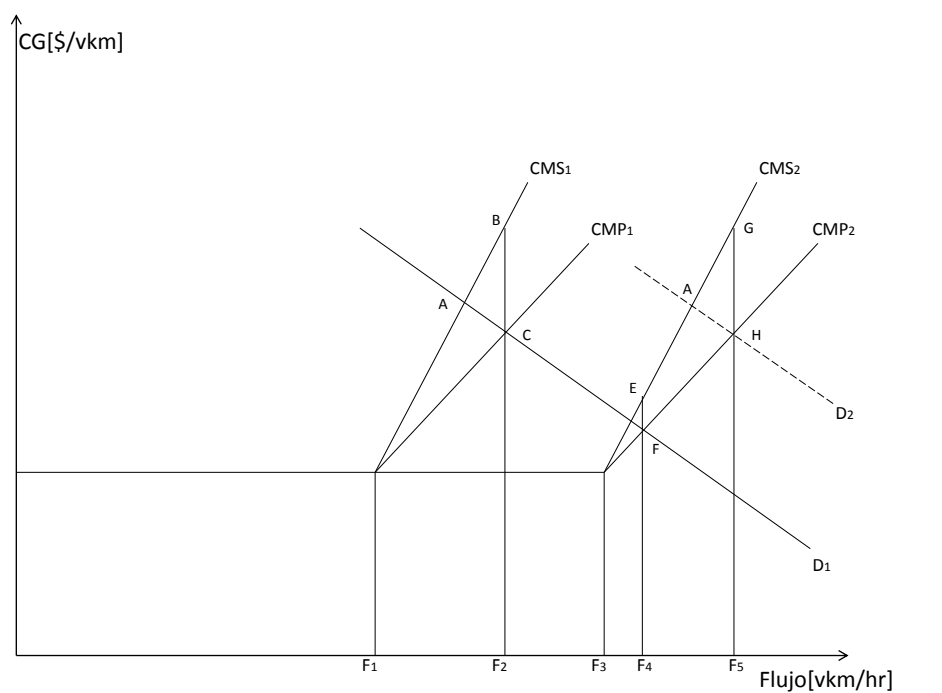


Figura 2.4: Congestión y Expansión de Capacidad, Romilly [2004]

Por simplicidad se asume que la congestión es la única externalidad. La externalidad de congestión comienza a producirse mas allá de un flujo F_1 de tráfico, por lo que el costo marginal social es mayor que el costo marginal privado. El flujo del tráfico en equilibrio es F_2 y el costo marginal externo por congestión es BC . Esta externalidad podría ser compensada mediante el establecimiento de un impuesto a la congestión apropiado para alcanzar el equilibrio en el punto A , pero las autoridades deciden ampliar la capacidad vial en un intento de reducir la congestión. El costo generalizado (CG) de viajar genera nuevas curvas de costos marginales (CMS_2 y CMP_2) por lo que el equilibrio esperado es un flujo de tráfico igual a F_4 y un costo marginal externo EF , donde $EF < BC$. Pero, es de común acuerdo que la expansión de capacidad vial trae consigo una expansión de la demanda, de modo que la curva de demanda de corto plazo se desplaza a D_2 . El flujo de equilibrio se expande a F_5 y el costo marginal externo aumenta a GH , donde $GH = BC$. En este contexto de demanda inelástica, este modelo microeconómico, ocupando paráme-

tros calibrados de específicas condiciones de tráfico de una ciudad, genera simulaciones que concluyen que los métodos standard de análisis costo-beneficio para los proyectos que consideran aumentos de capacidad con el fin combatir la congestión sobreestiman los beneficios de este tipo de políticas. Aun más, si nos encontramos bajo un escenario de tarificación por congestión óptima, la sobreestimación es de un 24 % en período peak. No considerando la optimización de esta tarificación, la sobreestimación es mayor que este valor.

Otra investigación significativa en esta segunda tendencia se presenta en Zhang et al. [2014], donde se analiza y estudia el cómo un operador de transporte público reacciona frente a la expansión de capacidad vial bajo diferentes regímenes de funcionamiento reconociendo impactos combinados de la interacción entre las estrategias de respuesta del tráfico y ampliación de la vialidad cuando los dos modos son sustitutos imperfectos. Bajo esta modelación microeconómica de comportamiento, se determinan rangos en donde se cumple la paradoja de Downs-Thomson y donde no se cumple en función del costo operacional del transporte público y el parámetro que determina el grado de sustitución entre los modos disponibles. En estos resultados también se explicita los rangos en el cual estos equilibrios son estables y cuando no lo son. Generalmente, la presencia de sustitución imperfecta genera cambios en las utilidades de los usuarios de los dos modos alternativos que no siempre concuerdan entre sí. En este análisis se encuentra que en todos los escenarios los viajeros en automóvil tienen más probabilidades de obtener beneficios de la ampliación de capacidad vial en comparación con los pasajeros en transporte público, en donde estos últimos siempre tienden a disminuir su utilidad cuando la utilidad de los usuarios de automóvil disminuye. Paralelamente, las posibilidades de los resultados Pareto-eficiente (todos disminuyen sus costos generalizados), la ocurrencia de la paradoja de Downs-Thomson y otras situaciones de desequilibrio de bienestar social están estrechamente relacionados con el grado de sustituibilidad entre los modos de transporte. Para ser más específicos, los resultados de esta investigación indican que el aumento de la probabilidad de que el resultado sea Pareto-eficiente en todos los escenarios y el aumento de la posibilidad de ocurrencia de la paradoja de Downs-Thomson está determinado por la maximización de las utilidades del operador del transporte público. Este resultado es independiente del escenario en que se impone la maximización del bienestar social con o sin restricción presupuestaria. Es importante destacar que el motivo principal del decrecimiento de una curva de costo generalizado para el transporte público a medida que aumentan los usuarios en el servicio es debido al efecto Mohring. En este sentido, esta investigación depende única y exclusivamente de los costos del operador por lo que sus resultados no son del todo concluyentes debido a la ausencia de otros efectos que pueden ser significativos.

Sin embargo, en los modelos citados anteriormente existen limitaciones importantes en donde no es explícitamente incorporado la optimización de todas las variables que definen el servicio de transporte público, el modelo de demanda supuesto en la paradoja no es del todo real y no existe interacción entre los modos de transporte disponibles. Existen tam-

bién análisis de los efectos de forma independiente y no siempre de manera conjunta. En este contexto, en Basso y Jara-Díaz [2012] se intenta reponder lo explicitado por Mogridge [1997] referente a que la paradoja de Downs-Thomson tiene dos importantes limitaciones. Primero, la frecuencia y la capacidad de los buses no es incorporado explícitamente de manera que el diseño óptimo de las variables, que tiene un efecto sobre la demanda, permanece oculto detrás de los costos generalizados del transporte público. Segundo, la elección del modo implícito detrás del equilibrio es del tipo "todo o nada", es decir, si el costo generalizado de un modo es más pequeño que el otro, entonces todo el mundo va a elegir este modo. Sin embargo, los usuarios también tienen en cuenta en la elección de modo otros atributos aparte del precio y el tiempo, tales como impacto ambiental o condición social. Estos atributos juntos pueden representar algún tipo de atractivo intrínseco que se diferencian a través de la población, por lo que el número de usuarios de un modo puede disminuir a una tasa de cambio diferente a la que aumenta su costo generalizado. Basso y Jara-Díaz [2012] proponen un modelo teórico incluyendo en un problema de maximización del bienestar social, precios óptimos y diseño de servicio del transporte público en un contexto bimodal. La congestión del tráfico y el diseño del tránsito se introducen simultáneamente y los usuarios toman su decisión en función del costo que perciben. Bajo estos supuestos, en esta investigación se concluye que si se considera un modelo de elección mas realista, el equilibrio determinado por la Hipótesis de Down-Thomson de la figura (2.1) difiere de la intersección de las curvas de costo generalizado de los modos si no que está desplazado hacia el aumento de partición modal para el auto, como se muestra en la figura (2.5), determinando una nueva partición modal y nuevos costos generalizados. Esto se interpreta como que a igualdad de condiciones en costos observables, existe una cantidad de usuarios de transporte privado que optan por este modo por preferencias subjetivas de cada uno de estos incluso cuando su costo generalizado de optar por el auto sea mayor al del bus.

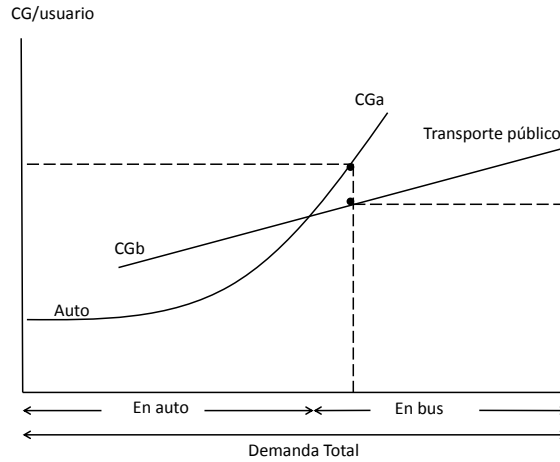


Figura 2.5: Basso y Jara-Díaz [2012]

En efecto, en este escenario, dependiendo de la convexidad de las curvas, no es posible determinar cual es la condición para los usuarios de transporte privado post expansión de capacidad, hechos que demuestran que no siempre se cumpliría la paradoja y que se ve representado en las siguientes figuras:

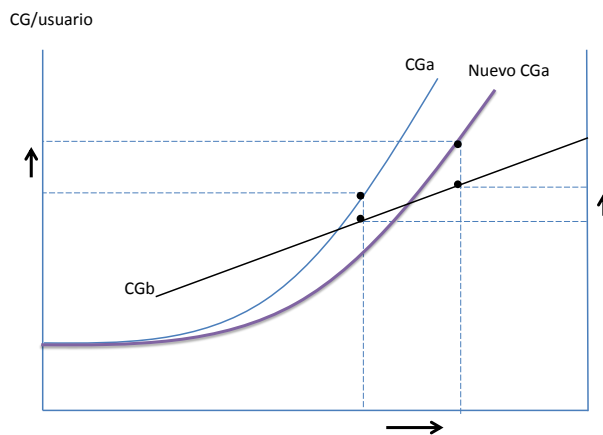


Figura 2.6: Basso y Jara-Díaz [2012], caso 1

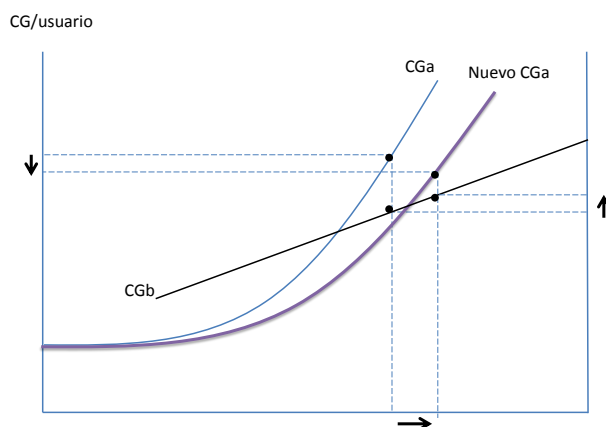


Figura 2.7: Basso y Jara-Díaz [2012], caso 2

Finalmente, los investigadores que estudian este tipo de fenómenos en general no consideran separación de períodos, ni demanda elástica, ni efectos cruzados de congestión entre los modos disponibles. Los pocos modelos que estudian este último efecto lo hacen de manera aislada por lo que consecuencia de ello, su aplicabilidad a los casos de la vida real es discutible. Con este fin, el modelo microeconómico expuesto en Basso y Silva [2014] agrupa estas variables de forma conjunta de manera de obtener desde un problema de optimización con la mirada de un planificador social, variables optimizadas derivadas de la maximización del bienestar social en distintos escenarios considerando distintas políticas urbanas. Junto con este planteamiento teórico, se ocupan datos de dos ciudades estereotipos (Santiago y Londres) de manera de combinar los dos caminos tanto de un modelamiento teórico en conjunto con datos representativo de la realidad. Si bien este último modelo no incluye un planteamiento de expansión de capacidad, el modelo incluye importantes aspectos no considerados de un sistema considerando el comportamiento de los usuarios como de operadores en conjunto.

Capítulo 3

Modelo y extensiones

En el presente capítulo se muestra en primer lugar el modelo microeconómico propuesto en Basso y Silva [2014], que constituye la base del modelo utilizado en el análisis de esta tesis. La exposición es breve y resume los aspectos principales del modelo. Para una exposición más detallada se aconseja leer el trabajo original detallado en la sección de referencias bibliográficas. Luego, en la sección 3.2, se exponen los parámetros de la ciudad de Londres que se consideran para las simulaciones. Finalmente, en la sección 3.3, se detallan las extensiones adoptadas de forma tal de poder estudiar los efectos a corto plazo que genera una expansión de capacidad vial en diferentes escenarios.

3.1. Modelo Basso-Silva

Para muchos modelos teóricos, inclusive el que se presenta en este capítulo, es prácticamente imposible poder representar la realidad completa de una ciudad, principalmente por la dimensión espacial y lo complejo que tendría que ser el modelamiento de la red. Es por esto que tradicionalmente se ha modelado la dimensión espacial del problema de manera simplificada.

El modelo considera un kilómetro representativo de una red vial urbana donde se analiza un día de operación del sistema y existen dos modos disponibles de transporte: transporte público y automóvil. Este modelo, considera un problema de maximización del bienestar social que consta de 13 variables y 11 restricciones. Incorpora el modelamiento del comportamiento de los agentes, recorriendo secciones sobre teoría del consumidor, función de gasto de los operadores y medidas del bienestar social, especialmente, del excedente de los consumidores. Un aspecto importante de este modelo microeconómico es que considera complejidades que en la mayoría de los modelos de la literatura no se han considerado en conjunto tales como: congestión estática, separación de períodos, demanda total elástica, optimización de variables de diseño, consideración del costo marginal de los fondos públicos, existencia de políticas urbanas y análisis de bienestar.

En esta modelación, los usuarios deben elegir entre viajar en horario peak, horario off-peak o no viajar. Después de su primera elección, si ésta fuese viajar (independiente del período), cada usuario debe decidir si realizar su viaje en auto o en bus. Teniendo esto en cuenta, un planificador puede optimizar las variables de diseño del sistema de transporte público como frecuencias [bus/h], capacidades [pax/bus], número de paraderos equidistantes [p] y tarifas [\$/km]. De forma de poder estudiar los efectos que tiene la política de ocupar pistas sólo bus, se considera que una fracción [n] de la capacidad total vial puede ser destinada exclusivamente para el transporte público. La inclusión de la política de tarificación por congestión (de primer mejor) se hace por medio de un cobro por viaje a cada usuario de transporte privado. En cuanto a la opción de subsidio al transporte público, se consideran distintas opciones de subvención desde un 100 % de los costos operacionales hasta un sistema completamente autofinanciado.

3.1.1. Demanda

El comportamiento de cada usuario se modela bajo una decisión secuencial como muestra la Figura 3.1, en donde se considera que cada individuo toma la decisión de manera racional, con información perfecta y maximizando alguna función de utilidad.

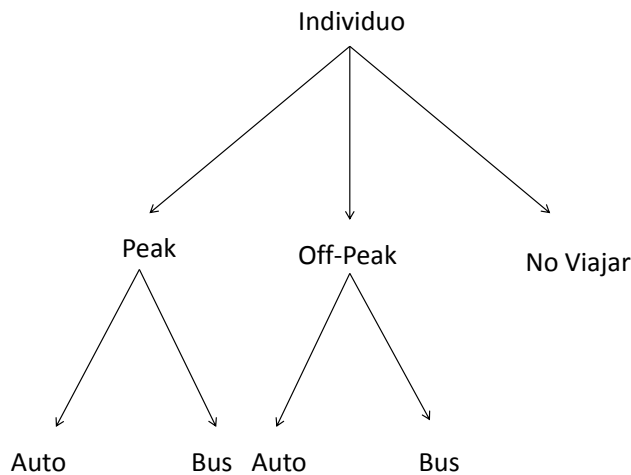


Figura 3.1: Arbol de decisión

La función de utilidad modelada se compone de una parte determinística y otra aleatoria de donde esta última se considera que se distribuye Gumbel lo cual implica que la elección modal esta determinada por un modelo logit, en este caso, binomial. El supuesto de distribución de la componente aleatoria es común en temas de transporte. Con

esta finalidad, este modelo considera un modelo logit binomial anidado introducido por Ben-Akiva [1973] en donde las personas toman una decisión secuencial en dos etapas. La función de utilidad considerada para cada individuo que viaja en el modo m en el período q está dada por :

$$U_{qm} = \Theta_{qm} + \lambda \cdot cost_{qm} + \beta_{qm} \cdot cg_{qm}, \quad (3.1)$$

donde Θ_{qm} es la constante modal , $cost_{qm}$ el costo monetario del viaje, cg_{qm} el costo generalizado del tiempo de viaje, λ y β_{qm} son las utilidades marginales del costo y del tiempo respectivamente. Del modelo logit binomial anidado se desprende que la proporción de usuarios que eligen viajar en modo m condicional en el período q esta dado por:

$$P_{m|q} = \frac{\exp(U_{qm})}{\sum_{t \in M_q} \exp(U_{qt})}, q \in \{Peak, Off - Peak\}, M_q = \{Auto, Bus\}. \quad (3.2)$$

En cuanto a la proporción de usuarios que eligen cada nido, se debe definir la utilidad esperada por cada uno de estos. Ben-Akiva [1973] muestra que esta esperanza esta dada por la siguiente expresión, usualmente llamada logsuma:

$$N_q = \ln\left(\sum_{t \in M_q} \exp(U_{qt})\right), q \in \{Peak, Off - Peak\}, \quad (3.3)$$

por lo tanto la proporción de usuarios que optan por cada período es:

$$P_q = \frac{\exp(u \cdot N_q)}{\sum_o \exp(u \cdot N_o)}, q \in \{Peak, Off - Peak, No - viajar\}, \quad (3.4)$$

donde $N_{no-viajar}$ se fija como constante y u es un parámetro de escala que representa el grado de sustitución entre los períodos. Un valor convergente a infinito del grado de sustitución teóricamente hace que el modelo de elección de períodos sea completamente determinístico y el nido con mayor utilidad es elegido por todos. Contrariamente, si este valor converge a 0, las probabilidades serán perfectamente aleatorias (la proporción de cada nido es 1/3). Finalmente, el número de personas que eligen viajar en el período q en modo m esta dado por:

$$Y_{qm} = Y^{Total} \cdot P_q \cdot P_{m|q}. \quad (3.5)$$

3.1.2. Tiempos de Viaje

En esta subsección se enuncian las funciones para los tiempos de viaje para cada modo en cada período que dependen también de las condiciones de tráfico (mixto o separado).

Estas variables forman parte del costo en tiempo de los usuarios por lo que tienen una implicancia directa en la utilidad, es decir, en la decisión de viaje de cada persona.

Tráfico mixto

En la literatura actual aún no se tiene un tratamiento de común uso para poder capturar todos los efectos de interacción entre los autos y los buses cuando comparten capacidad en función de las variables de diseño del servicio público (capacidad bus, distancia entre paraderos, frecuencia, entre otros). Sin embargo, este hecho ocurre y en este modelo se captura el efecto de interacción entre los buses y autos de manera simple y lógica de manera a fin de concluir sobre las implicancias que genera. Considerando el aumento de tiempo de viaje debido a la congestión en la vía y la demora que existe por la subida y bajada de pasajeros en los paraderos, se tiene que los tiempos de viaje en bus y en auto, por período y por kilómetro están dados por:

$$t_b^q = t_f \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{l \cdot Y_{qa}}{H^q \cdot a} + f^q \cdot b(k)\right)^\beta\right) + p \cdot \left(\frac{Y_{qb}}{H^q \cdot f^q \cdot p} \cdot t_{sb} + t_d\right) \quad (3.6)$$

$$t_a^q = t_f \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{l \cdot Y_{qa}}{H^q \cdot a} + f^q \cdot b(k)\right)^\beta\right) + \epsilon \cdot p \cdot \left(\frac{Y_{qb}}{H^q \cdot f^q \cdot p} \cdot t_{sb} + t_d\right), \quad (3.7)$$

donde $\epsilon(f^t) = 1 - 1,01^{-f^t}$ representa el tiempo adicional de viaje en auto por la operación de transporte público en los paraderos. Su forma analítica es arbitraria pero consecuente con los efectos que genera la frecuencia de buses en el sistema. t_f es el tiempo a flujo libre, f^t es la frecuencia de buses en el período q , l representa el largo de viaje promedio [km], α y β son parámetros de la función BPR asociados a la reducción de velocidad debido a la congestión, H^q es el número de horas del período q , C es la capacidad vial total, k es el número de personas por bus (capacidad), $b(k)$ es el factor de equivalencia entre buses y autos, a es la constante de ocupación del auto, t_{sb} es el tiempo promedio que demora un pasajero en subir o bajar del bus y t_d considera el tiempo perdido por el bus en detenerse, en las posibles demoras por cola y en la aceleración (más detalle de esta última variable se puede ver en el Apéndice). Cabe destacar que estas dos últimas variables tienen directa relación con la eficiencia del servicio público en los paraderos por lo que la tecnología y la gestión juegan un rol fundamental en la disminución de estos tiempos por pasajero.

Tráfico separado

En la condición con pistas sólo bus el término asociado al flujo en la vía es reducido ya que no existe la interacción entre buses y autos que había en tráfico mixto. En cuanto a la componente de demora por paraderos, sigue existiendo para los usuarios de transporte

público y desaparece para los usuarios de transporte privado debido a la segregación de los buses. Teniendo en consideración esto, los tiempos de viajes se pueden escribir como:

$$t_b^q = t_f \cdot (1 + \alpha \cdot (\frac{f^q \cdot b(k)}{n \cdot C})^\beta) + p \cdot (\frac{Y_{qb}}{H^q \cdot f^q \cdot p} \cdot t_{sb} + t_p + t_d) \quad (3.8)$$

$$t_a^q = t_f \cdot (1 + \alpha \cdot (\frac{\frac{l \cdot Y_{qa}}{H^q \cdot a}}{(1-n) \cdot C})^\beta). \quad (3.9)$$

3.1.3. Costos

El modelo considera que el costo generalizado de viajar de una persona consta de una parte monetaria y una parte asociada al tiempo que le toma viajar en uno u otro modo. En cuanto a los operadores del transporte público, existe sólo un costo monetario. El desglose de cada una de estas partes se muestra a continuación.

Monetario

Para los usuarios de transporte público, su costo monetario por período se define simplemente como la tarifa, es decir, $cost_{qb} = P_{qb} \cdot l$, donde P_{qb} es la tarifa por km. En cuanto a los usuarios de transporte privado, se supone que aparte de una posible tarifa que pueden pagar (dependiendo de la política implementada), hay costos operacionales asociados, por lo que el costo monetario de andar en auto se puede escribir como $cost_{qa} = \frac{(P_{qa} + c_{oa}) \cdot l}{a}$, donde c_{oa} es el costo operacional asociado y a el número de pasajeros promedio en un auto.¹

Tiempo

El costo asociado en tiempo para los usuarios de transporte público se compone de 3 partes: tiempo de acceso, tiempo de espera y tiempo de viaje en el vehículo. El primero está dado por $t_{acc} = \frac{1}{2 \cdot p \cdot V_c}$, suponiendo que las personas se distribuyen uniformemente a lo largo del corredor y donde V_c es la velocidad promedio de caminata. El tiempo de espera se define como $t_e^p = \frac{\theta}{f^p}$, considerando en este un intervalo efectivo de tiempo para tomar el bus. El tiempo de viaje, dependiendo de las condiciones, fue definido en la subsección anterior. Finalmente, el costo generalizado en tiempo para un usuario que viaja en bus en el período q está dado por $cg_{qb} = t_b^q \cdot l + \phi_1 \cdot t_e^q + \phi_2 \cdot t_{acc}$, donde $\phi_1 > 1$ y $\phi_2 > 1$ y equivalen al peso que se atribuye a cada tiempo en el costo generalizado, encontrados empíricamente.

En cuanto a los usuarios que optan por el transporte privado, el costo generalizado en tiempo que incurren en el período q es simplemente el tiempo de viaje en el vehículo y

¹El costo operacional incluye una depreciación por lo que considera en una parte un costo de la inversión

esta dado por: $cg_{qa} = t_a^q \cdot l$

Operación sistema de buses

Por el lado de los operadores, el costo operacional del sistema dado una flota de buses B por día y por km está dado por :

$$CO = \frac{C_b(k) \cdot B + \sum_q C_o(k) \cdot V_q}{l}, \quad (3.10)$$

donde $C_b(k)$ es el costo asociado al capital de tener un bus de capacidad k por día y $C_o(k)$ el costo operacional por Bus-km, donde las dos se suponen funciones lineales. V_q es el número de Bus-km por cada período q y junto con B dependen directamente de la frecuencia y tiempos de viaje.

3.1.4. Problema de Optimización

Los agentes principales en esta modelación son los usuarios y los operadores, que representan la demanda y la oferta que existe en el sistema respectivamente. De esta forma, falta definir las variaciones en excedentes de cada sector para poder enunciar la función objetivo principal considerando un kilómetro de un día de operación. En el caso de los usuarios que eligen si viajar o no y en que modo, el excedente del consumidor esta dado por una logsuma introducida por Anderson, de Palma y Thisse (1992), la cual para el caso de un modelo logit anidado esta dado por:

$$EC = \frac{1}{u} \cdot \frac{Y^{Total}}{-\lambda} \cdot \ln\left(\sum_q \exp(u \cdot N_q)\right), q \in \{Peak, Off - Peak, No - viajar\}, \quad (3.11)$$

El excedente de los productores está dado por :

$$EP = \left(\sum_p Y_{pb} \cdot P_{pb} \cdot l\right) - CO + \left(\sum_p \cdot P_{pa} \cdot \frac{l}{a}\right) \cdot (1 - \eta) - CA - C_{cap}, p \in \{Peak, Off - Peak\}, \quad (3.12)$$

donde η es el costo de aplicar y operar la tarificación por congestión y se expresa como fracción del ingreso por simplicidad. CA representa el costo adicional de implementación y operación de pistas solo bus. Ambos conceptos son incluidos dependiendo de la política implementada. C_{cap} representa el costo de adicionar capacidad vial con respecto al caso Base, parámetro que no es considerado en el planteamiento de Basso y Silva [2014]. Finalmente la función objetivo a maximizar expresada en un kilómetro representativo en un día de operación es el bienestar social quedando determinado por:

$$BS = EC + EP * cmfp, \quad (3.13)$$

donde $cmfp$ es el costo marginal de los fondos públicos y refleja el costo de cada unidad de los fondos públicos, teniendo en cuenta la pérdida de eficiencia de los impuestos adicionales. El valor de este parámetro se considera constante por simplicidad.

Restricciones

Para el estudio de los efectos y beneficios de diferentes políticas se construyen escenarios definidos por la maximización del bienestar social sujeto a diferentes restricciones. Cinco de estas restricciones son comunes en todos los escenarios. La primera restricción impone que la cantidad de pasajeros por bus (k), debe ser mayor o igual a la carga de pasajeros entregado por el modelo en los períodos. Debido a que el modelo no considera costos por hacinamiento ni tampoco beneficios por tener capacidad ociosa, la función objetivo es decreciente con el aumento de capacidad ociosa en los buses, y la restricción es siempre activa en el óptima quedando descrita por:

$$k = MAX_q \frac{Y_{qb} \cdot l}{f^q \cdot H^q} \quad (3.14)$$

La segunda restricción que está fija en todos los escenarios corresponde a la ecuación (3.5), y se considera como una restricción porque existe un problema de punto fijo en donde las demandas dependen del tiempo de viaje y viceversa. Incluir las demandas como variables de optimización y la ecuación (3.5) como restricción del problema, facilita la resolución del problema matemático.

Una tercera restricción está dada por la frecuencia, la cual no debe sobrepasar la capacidad de los paraderos de buses, donde esta última es una función que depende de los tiempos de bajada y subida de las personas, de la demanda, frecuencia y más variables de optimización. Más detalles de esta restricción se encuentra en el Apéndice.

La cuarta restricción es la igualdad de las tarifas² del servicio público para los períodos la cual esta dada por:

$$P_{pb} = P_{ob} \quad (3.15)$$

Una última restricción considera simplemente la no negatividad de las tarifas.

$$P_{qb}, P_{qa} \geq 0, \forall q \in \{Peak, Off - Peak\} \quad (3.16)$$

Teniendo esto, a continuación se definen las restricciones asociadas a cada escenario que se estudia.

²En Basso y Silva [2014] se considera un escenario la posibilidad de diferenciación de tarifas entre períodos que generan beneficios sociales pequeños por lo cual para este estudio se considera una restricción su igualdad

ESCENARIO BASE

Este escenario representa la ausencia de toda política que se quiere estudiar. Existe congestión cruzada entre los modos definidas por las ecuaciones (3.6) y (3.7) y las tarifas de los dos períodos se imponen iguales. La utilidad de este escenario es tener un punto de referencia para obtener el beneficio de aplicar las políticas tanto juntas como separadas. El problema de optimización asociado a este escenario queda descrito por :

$$\begin{aligned} & \max_{f^p, f^o, p, P_{pb}, P_{ob}, Y_{pb}, Y_{pa}, Y_{ob}, Y_{oa}, Y_{nt}} \text{BS} \\ \text{s.a } & \sum_q Y_{qb} \cdot P_{qb} \cdot l = CO; P_{qa} = 0; CA = 0; C_{cap} = 0, \forall q \in \{Peak, Offpeak\} \end{aligned}$$

ESCENARIO CON SUBSIDIO

La forma de aplicar esta política es imponiendo que la tarifa financie un $X\%$ del costo del operador. Con esto, el problema de optimización en este escenario queda descrito de la siguiente forma:³

$$\begin{aligned} & \max_{f^p, f^o, p, P_{pb}, P_{ob}, Y_{pb}, Y_{pa}, Y_{ob}, Y_{oa}, Y_{nt}} \text{BS} \\ \text{s.a } & \sum_q Y_{qb} \cdot P_{qb} \cdot l = CO \cdot \frac{100 - X}{100}; P_{qa} = 0; CA = 0, \forall q \in \{Peak, Offpeak\} \end{aligned}$$

ESCENARIO CON TARIFICACIÓN POR CONGESTIÓN

Para analizar el efecto de esta política, se debe relajar la restricción de tarifa nula para el auto quedando el problema de optimización de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} & \max_{f^p, f^o, p, P_{pb}, P_{ob}, Y_{pb}, Y_{pa}, Y_{ob}, Y_{oa}, Y_{nt}} \text{BS} \\ \text{s.a } & \sum_q Y_{qb} \cdot P_{qb} \cdot l = CO; CA = 0, \forall q \in \{Peak, Offpeak\} \end{aligned}$$

ESCENARIO CON TARIFICACIÓN POR CONGESTIÓN y SUBSIDIO

$$\begin{aligned} & \max_{f^p, f^o, p, P_{pb}, P_{ob}, Y_{pb}, Y_{pa}, Y_{ob}, Y_{oa}, Y_{nt}} \text{BS} \\ \text{s.a } & \sum_q Y_{qb} \cdot P_{qb} \cdot l = CO \cdot \frac{100 - X}{100}; CA = 0 \end{aligned}$$

ESCENARIO CON PISTAS SOLO BUS

³El modelo no supone ineficiencias en el sistema cuando se aplica la política de subsidio

Para el estudio de la política de exclusividad para los buses, se debe modificar el escenario base. Una de las modificaciones asociadas son las funciones de tiempo de viaje para ambos modos detallados en la ecuación (3.8) y (3.9). Adicionalmente, se incorpora a las variables de optimización la variable n definida anteriormente. Tomando esto en cuenta, este escenario (DL) queda descrito por:⁴

$$\begin{aligned} & \max_{f^p, f^o, p, P_{pb}, P_{ob}, Y_{pb}, Y_{pa}, Y_{ob}, Y_{oa}, Y_{nt}, n} \text{BS} \\ \text{s.a } & \sum_q Y_{qb} \cdot P_{qb} \cdot l = CO; n = \frac{1}{3}; P_{qa} = 0, \forall q \in \{Peak, Offpeak\} \end{aligned}$$

Los escenarios restantes, son similares a los primeros en que se consideró tráfico mixto. Estos últimos equivalen a las restantes combinaciones posibles entre las políticas en donde se considera las funciones con tráfico separado.

ESCENARIO CON SUBSIDIO y VÍAS EXCLUSIVAS

$$\begin{aligned} & \max_{f^p, f^o, p, P_{pb}, P_{ob}, Y_{pb}, Y_{pa}, Y_{ob}, Y_{oa}, Y_{nt}, n} \text{BS} \\ \text{s.a } & \sum_q Y_{qb} \cdot P_{qb} \cdot l = CO \cdot \frac{100 - X}{100}; n = \frac{1}{3}; P_{qa} = 0, \forall q \in \{Peak, Offpeak\} \end{aligned}$$

ESCENARIO CON TARIFICACIÓN POR CONGESTIÓN y VÍAS EXCLUSIVAS

$$\begin{aligned} & \max_{f^p, f^o, p, P_{pb}, P_{ob}, Y_{pb}, Y_{pa}, Y_{ob}, Y_{oa}, Y_{nt}, n} \text{BS} \\ \text{s.a } & \sum_q Y_{qb} \cdot P_{qb} \cdot l = CO; n = \frac{1}{3} \end{aligned}$$

ESCENARIO CON SUBSIDIO, TARIFICACIÓN POR CONGESTIÓN y VÍAS EXCLUSIVAS

$$\begin{aligned} & \max_{f^p, f^o, p, P_{pb}, P_{ob}, Y_{pb}, Y_{pa}, Y_{ob}, Y_{oa}, Y_{nt}, n} \text{BS} \\ \text{s.a } & \sum_q Y_{qb} \cdot P_{qb} \cdot l = CO \cdot \frac{100 - X}{100}; n = \frac{1}{3} \end{aligned}$$

3.2. Parámetros

Para esta tesis, los escenarios descritos se resuelven numericamente ocupando datos de la ciudad de Londres. Estos datos son los considerados en Basso y Silva [2014]⁵ y

⁴A diferencia de Basso y Silva [2014], para efectos de este estudio, el valor de n estará determinado por mantener una pista a los buses, para los casos en que se considera pistas solo bus

⁵El valor monetario esta presentado en dolares U.S de 2009.

las fuentes son de publicaciones de Transport for London [2007] y parámetros usados en Parry y Small [2009].

Parámetros generales	Londres
Pasajeros referencial período peak [pax/h]	7000
Largo del viaje [km]	9,6
Costo operacional del auto [\$/km]	1,187
Ocupación del auto [pax/auto]	1,41
Duración peak [h]	6
Duración Off-peak [h]	14
Parámetros Modelo de Demanda	
Parámetro de escala logit anidado, μ	0,25
Valor del tiempo de viaje en auto, período peak [\$/h]	11,56
Valor del tiempo de viaje en bus, período peak [\$/h]	13,88
Valor del tiempo de viaje en auto, período off-peak [\$/h]	9,25
Valor del tiempo de viaje en bus, período off-peak [\$/h]	11,1
Peso de tiempo de espera, ϕ_1	2
Peso de tiempo de caminata, ϕ_2	2,5
Parámetros tiempo de viaje	
Velocidad a flujo libre [km/h]	60
Tiempo de subida o bajada al bus [seg/pax]	2,5
Tiempo constante que cada bus pierde al parar en un paradero [seg]	15
Velocidad de caminata [km/h]	3,6
Fracción de la frecuencia del tiempo de espera, θ [seg]	0,5
Parámetros Bus	
$C_b(k = 80)$ [\$/bus-día]	1155
$C_o(k = 80)$ [\$/bus-km]	2,4
Parámetros función de bienestar	
Costo marginal de los fondos públicos []	1,15
Costo operacional tarificación por congestión [%]	45
Costo operacional para vías exclusivas [\$/km] ⁶	73,71

Cuadro 3.1: Parámetros ciudad de Londres

3.3. Extensiones

Para cumplir los objetivos de esta tesis, es necesario hacer modificaciones al modelo original de manera tal de poder analizar los efectos que tiene sobre el sistema una expansión de capacidad vial. Es por esto que a continuación se enuncian las modificaciones y consideraciones que se adoptan en el modelo.

1. Para poder estudiar los efectos que tiene la inversión de capacidad en el sistema y

poder compararlo con las distintas aplicaciones de las políticas, es de vital importancia tener un costo estimado de la inversión que se requiera hacer. Es por esto que basado en el reporte anual del gobierno del Reino Unido llamado Infrastructure [2014], se considera que el costo en inversión total (sin considerar comprar tierras y/o expropiaciones) de expandir la capacidad vial existente por km es *15,184 Millones de dólares*. Este valor se normaliza al año de los costos que se consideran en los parámetros con un factor de corrección de un 6% promedio anual y se asume que la vida útil de esta será de 25 años, resultando 1.664 USD por km, por pista, por día.

2. Una consideración que juega un rol fundamental en este estudio es incluir en el costo de inversión en capacidad vial el costo de expropiar y de comprar tierras. Estudios revelan que este costo pueden variar hasta 11 veces su valor si se consideran dichos costos por lo cual en el capítulo 5 se presenta una revisión detallada de diferentes investigaciones que estiman el valor de este parámetro.
3. Uno de los supuestos principales en la paradoja de Downs-Thomson es que el costo generalizado de viaje en transporte público disminuye a medida que aumentan los usuarios de este servicio. Esto, por ejemplo, puede justificarse con el efecto Mohring. Sin embargo, la congestión en el transporte público, especialmente en la operación en paraderos, puede provocar el efecto contrario. Por este motivo se considera una nueva función de congestión en los paraderos. Se utiliza la función propuesta por Jara-Díaz y Tirachini [2013] y por Tirachini [2014], ya que permite modelar distintos niveles de susceptibilidad a la congestión del transporte público, a través de parámetros. Por ejemplo, distintos métodos de pagos y diseños de paraderos, entregan distintas demoras para la misma demanda del sistema. La función es:

$$p \cdot \left(\frac{Y_{qb}}{H^q \cdot f^q \cdot p} \cdot t_{sb} + t_p + t_q[f, p, P_a, P_b, Y_a, Y_b] + t_{ad}[f, p, P_a, P_b, Y_a, Y_b] \right). \quad (3.17)$$

Esta nueva ecuación reemplaza la sección asociada al tiempo de viaje en bus determinado por las ecuaciones (3.6),(3.7) y (3.8), manteniendo una estructura similar pero con diferencias importantes en sus variables. Las funciones t_q y t_{ad} representan los tiempos perdidos por un bus en cola y el asociado a la aceleración y desaceleración de los buses respectivamente. t_{sb} ya no es constante si no que depende del método de pago, del número de puertas asociadas al bus, del número de sitios dispuestos en el paradero y de las condiciones de subida y bajada, al igual que t_q . Cabe destacar que estas funciones han sido calibradas para estos diferentes escenarios considerando una pista de adelantamiento. Se asume en esta tesis por simplicidad estas funciones en el comportamiento de estas variables con una pista para los buses.

Teniendo esta nueva función con ecuaciones las cuales sus parámetros dependen de la capacidad de los paraderos (métodos de pago, número de sitios, entre otros) se presenta a continuación los diferentes casos que se utilizan en el estudio:

- **Caso a:** Considera 1 sitio, metodo de pago con dinero y existe sólo subida por la puerta delantera
- **Caso b:** Considera 2 sitios, metodo de pago magnético con tarjeta y existe sólo subida por la puerta delantera
- **Caso c:** Considera 3 sitios, metodo de pago fuera del bus y existe subida por todas las puertas
- **Caso d:** Considera que no existe congestión de buses (caso hipotético) en paraderos, es decir, $t_q = 0$ y $t_{sb} = 2,5[seg]$ constante y de igual valor al modelo original, manteniendo en la función el tiempo destinado a transferencia de pasajeros.

Para tener una base, se considera que el número de puertas que tiene un bus es tres. Los 4 casos implican distintos niveles de congestión para una demanda dada y distinta susceptibilidad a demoras adicionales. El caso *a* es donde la congestión es más severa, seguido por el *b* y luego el *c*, donde la capacidad de los paraderos es máxima. Finalmente, el caso *d* es una construcción teórica para representar la ausencia de congestión en paraderos. El siguiente cuadro muestra como varía el tiempo promedio de subida mas bajada por pasajero con el objetivo de tener una primera mirada de los distintos tiempos de transferencia en diferentes escenarios posibles.

Escenarios Posibles	Tsb [seg/pax]
1 Sitio, Subida sólo por Puerta delantera, Pago en efectivo	11,75
2 Sitios, Subida sólo por Puerta delantera, Pago en barra magnética	3,99
2 Sitios, Subida sólo por Puerta delantera, Pago con contacto de tarjeta	3,11
2 Sitios, Subida por todas las puertas, Pago con contacto de tarjeta	2,22
3 Sitios, Subida por todas las puertas, Pago fuera del bus	1,84

Cuadro 3.2: Tiempos de transferencia

4. Por simplicidad se considera la variable p fija con el fin de disminuir los tiempos de optimización de los escenarios simulados.
5. Para efectos del análisis de las variables más determinantes de la existencia de la paradoja de Downs-Thomson, se adaptó el modelo para tener sólo un período en

algunos análisis, de forma de replicar las condiciones de demanda inelástica total, considerada en la paradoja. Estos resultados se enuncian en una parte del capítulo 4. Para el resto de los análisis se siguió considerando el modelo con tres períodos.

6. Las inversiones de capacidad consideradas para la simulación son discretas, en donde se consideran inversiones pequeñas y grandes interesantes de ser estudiadas.

Capítulo 4

Paradoja de Downs-Thomson

En este capítulo se estudia el efecto de aumentar la capacidad vial en el costo generalizado de viaje de cada modo. Como se explica en el capítulo 2, la hipótesis expuesta por Mogridge [1997] basada en los trabajos de Downs [1962] y Thomson [1977], dice que un aumento de capacidad para los automóviles genera un equilibrio en donde tanto usuarios de automóvil como de transporte público enfrentan costos superiores a los inicialmente experimentados. Por lo tanto, aumentar la capacidad vial sería contraproducente. Este capítulo se centra en estudiar la veracidad de esta hipótesis, llamada la paradoja de Downs-Thomson, usando el modelo y los datos expuestos en el capítulo anterior.

En la primera sección de este capítulo se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones en el escenario que más se asemeja a los supuestos adoptados en la paradoja de Downs-Thomson; esto es, donde los automóviles y el transporte público no comparten la capacidad vial y se tiene una ausencia de otras políticas. En la sección 4.2 se extiende el análisis estudiando los efectos de aumentar la capacidad vial en presencia de las políticas de subsidio y tarificación vial. Finalmente, en la sección 4.3, se expone cómo cambian los resultados anteriores cuando se considera tráfico compartido entre los modos disponibles.

4.1. Tráfico separado

En esta sección se muestran los resultados de diferentes simulaciones de escenarios considerando el modelo original expuesto en el capítulo anterior y los datos descritos anteriormente para resolver cada problema de optimización cuando se aumenta la capacidad vial en un tercio, lo cual es equivalente a considerar en el modelo una pista más. Con los resultados de cada escenario, se comparan las variables que describen los niveles de servicio, particiones modales en equilibrio y costos generalizados asociados a los usuarios que deciden viajar en cada período respectivo. En este contexto, se simulan variados escenarios modificando parámetros y variables significativas del modelo de forma de tener una sensibilidad y un acercamiento del comportamiento de los equilibrios con la presencia de la expansión de capacidad. Para este objetivo, las modificaciones involucran constantes

modales, velocidad a flujo libre, demandas, congestión en paraderos, congestión en la vía, entre otros.

4.1.1. Resultado Base

Esta subsección está enfocada en mostrar los principales resultados que se obtiene al simular el sistema de transporte en la ciudad de Londres representado en un escenario bajo una expansión de capacidad igual a un tercio de la capacidad existente. Las características principales que se tienen en el escenario antes de la expansión de capacidad es, en período peak, de un sistema altamente congestionado, particiones modales prácticamente iguales, con velocidades bajas tanto para el automóvil como para el transporte público. En cuanto al período Off-Peak, el sistema no presenta una congestión significativa, representado por una alta velocidad para el transporte privado y para el transporte público, incluso este último teniendo menores frecuencias que en los horarios más congestionados. Con respecto a la partición modal, ésta se encuentra mayormente inclinada hacia el transporte privado en los horarios más congestionados y se acentúa este efecto en los horarios menos congestionados.

El número de viajes de los períodos Peak, Off-Peak y No-Viajar son 4.546, 4.611 y 842 respectivamente (considerar que la duración de los períodos es diferente), sumando un total de 10.000 viajes. Ante un aumento de capacidad vial de este orden, los cambios porcentuales obtenidos para los períodos Peak, Off-Peak y No-viajar son respectivamente 1,49, $-1,11$ y $-0,38$, lo cual indica que existe una inelasticidad significativa de los viajes en los períodos independientes de la capacidad vial existente. Dado que bajo una importante expansión de capacidad (un tercio de la capacidad existente) la demanda por período es relativamente la misma, el análisis se puede enfocar en cada período por separado para analizar los cambios en costos generalizados lo que es más consistente con la paradoja de Downs-Thomson. Estos costos generalizados son calculados como el resultado de la utilidad menos la constante modal asociada al período respectivo. En las siguientes tablas se muestra, en primer lugar, como cambian las variables más significativas y, en segundo lugar, como cambian los costos generalizados para cada modo en cada período dependiendo de la capacidad vial adoptada.

Variab les	Capacidad Vial [veh/h]	
	3600	4800
Tarifa Bus [\$/km]	0,097	0,099
Frecuencia Peak [bus/h]	57,54	52,05
Frecuencia Off-Peak [bus/h]	28,39	25,99
Capacidad bus [pax]	61,5	53,03
Velocidad Auto Peak [km/h]	15,12	23,66
Velocidad Bus Peak [km/h]	27,70	29,32
Velocidad Auto Off-Peak [km/h]	39,83	54,45
Velocidad Bus Off-Peak [km/h]	33,11	33,55
Período Peak [%]	45,46	46,95
Período Off-Peak [%]	46,11	45,00
Período No viajar [%]	8,42	8,04
Auto Peak [%]	51,34	63,25
Bus Peak [%]	48,65	36,74
Auto Off-Peak [%]	75,90	78,21
Bus Off-Peak [%]	24,07	21,78

Cuadro 4.1: Situación actual y con Expansión de capacidad

	Capacidad Vial [veh/h]	
	3600	4800
Período Peak		
CG Auto [\$/usuario]	3,0502	2,5266
CG Bus [\$/usuario]	1,54602	1,51166

Cuadro 4.2: Costos Generalizados, Período Peak

	Capacidad Vial [veh/h]	
	3600	4800
Período Off-Peak		
CG Auto [\$/usuario]	2,0398	1,9215
CG Bus [\$/usuario]	1,2063	1,2174

Cuadro 4.3: Costos Generalizados, Período Off-Peak

De los cuadros anteriores se deduce que la paradoja de Downs-Thomson no se cumple en ambos períodos. Ante el aumento de capacidad vial, el transporte privado pasa a ser más atractivo por su disminución en los costos lo que genera una disminución importante de usuarios en el transporte público. En este sentido, al tener los períodos distintos niveles de congestión, sus efectos son diferentes. Para el período Peak, el aumento de capacidad

genera sólo beneficios para los usuarios de ambos modos debido a la escala de congestión a la cual el sistema está enfrentado, viéndose reflejado en un alto aumento de ambos modos en velocidades y en la partición modal de los autos cuando la capacidad vial es mayor. Por otro lado, en el período Off-Peak, el efecto de expansión de capacidad es diferente ya que se está en un nivel de congestión menor. Los beneficios para los usuarios de transporte privado es lógica reflejado en el aumento en velocidades que incide directamente en la reducción de sus costos. Sin embargo, para los usuarios de transporte público, al disminuir su partición modal de manera significativa y con una frecuencia mucho menor, una expansión de capacidad vial para los autos en estas condiciones sólo genera una acentuación de la disminución de estas variables lo que es traducido en un aumento de los costos generalizados de viajar en bus. En otras palabras, la baja participación del servicio público en el período Off-Peak se ve aún más acentuada ante esta expansión de capacidad lo cual genera una situación peor para estos usuarios. Estos beneficios y efectos que se han planteado anteriormente están condicionados bajo dos supuestos. La función de congestión de paraderos presente en el modelo ha sido calibrada para un tipo de pago en efectivo, subidas sólo por una puerta y una eficiencia leve en el servicio, representando un sistema con un capacidad en los paraderos de transferencia muy baja. Para este efecto, un aumento de capacidad vial en un sistema congestionado sólo generaría beneficios para los usuarios de transporte público ante una función de congestión de paraderos tan severa. Un segundo supuesto que condiciona los beneficios en este período es el modelo de demanda en donde para efectos del modelo se presupone estocástico. Si se llegase a considerar un modelo de demanda determinístico, la elección de modo sería aún mayor para el transporte privado (debido al mayor atractivo que tiene este tipo de transporte en general por seguridad, confort, entre otros, reflejados en la constante modal) lo cual podría generar una sobredemanda inducida lo que conduciría a un desbeneficio ante un aumento de capacidad vial. Estas dos hipótesis son comprobadas con un análisis de sensibilidad en la próxima subsección.

4.1.2. Análisis de sensibilidad: funciones de congestión y modelo de demanda

En la subsección anterior se sostiene que ante un aumento de capacidad vial, tanto los usuarios de transporte privado como público obtienen beneficios en el período peak. De esta manera, el objetivo de esta subsección es estudiar los efectos de la congestión y explicar el porqué los usuarios de transporte público disminuyen sus costos generalizados en el período Peak, contrariamente como en Off-Peak ante una expansión de la capacidad vial.

Para este análisis, se considera la nueva función de tiempo de viaje en bus expuesta en el capítulo anterior determinada por la ecuación (3.17), en donde se consideran cuatro casos diferentes (a,b,c y d), diferenciados por el método de pago, número de sitios y sistema de subidas y bajadas de pasajeros. Para este efecto, cada uno de estos casos

representan diferentes capacidades del sistema público por lo que de ahora en adelante los casos a,b,c y d se denominarán repectivamente con sistemas de capacidad Baja, Media, Alta e Irrestriccta. Junto con este análisis, se adicionan simulaciones en donde se considera un nuevo modelo de demanda, ahora emulando una elección de modo como sustitutos perfectos. La importancia de esta consideración es notificada preliminarmente en Basso y Jara-Díaz [2012], donde determinan que esta variable es fundamental en la incerteza del beneficio o desbeneficio para los usuarios de transporte privado después de expandir la capacidad vial, generando posibles escenarios donde la paradoja de Downs-Thomson no se cumpliría. La manera de modelar este cambio fue imponiendo como restricción que las utilidades que le genera a un usuario tanto tranportarse en auto cómo en bus fueran iguales en un mismo período.

Con estas nuevas condiciones, los resultados indican que la tendencia de una leve variación de la demanda en cada período bajo un aumento de capacidad se mantiene. Es por esto que por simplicidad para este análisis de sensibilidad se adapta el modelo considerando sólo un período, enfocando el estudio en el período Peak. De este modo, los siguientes cuadros muestran cómo cambian los costos generalizados ante un aumento de capacidad vial comparando también con escenarios en que se considera un modelo de demanda determinístico, donde estos últimos resultados se presentan como Auto-Det y Bus-Det.

	Capacidad Vial [veh/hr]	
Capacidad Sistema Baja	3600	4800
Auto	3,7707	2,7962
Bus	2,3337	1,8799
Auto-Det	3,3711	2,7576
Bus-Det	2,5131	1,8996

Cuadro 4.4: Costos Generalizados, Capacidad Sistema Baja

	Capacidad Vial [veh/hr]	
Capacidad Sistema Media	3600	4800
Auto	3,0922	2,5624
Bus	1,4193	1,4234
Auto-Det	2,2826	2,2776
Bus-Det	1,4246	1,4196

Cuadro 4.5: Costos Generalizados, Capacidad Sistema Media

	Capacidad Vial [veh/hr]	
Capacidad Sistema Alta	3600	4800
Auto	3,0412	2,5306
Bus	1,3465	1,3574
Auto-Det	2,1956	2,2055
Bus-Det	1,3376	1,3475

Cuadro 4.6: Costos Generalizados, Capacidad Sistema Alta

	Capacidad Vial [veh/hr]	
Capacidad Sistema Irrestricta	3600	4800
Auto	2,7941	2,3632
Bus	0,9807	0,9860
Auto-Det	2,2354	2,2414
Bus-Det	0,9774	0,9834

Cuadro 4.7: Costos Generalizados, Capacidad Sistema Irrestricta

A continuación se presentan las conclusiones principales que se deducen del resultado de las simulaciones (detalladas en el Apéndice) y de los cuadros anteriores.

- El aumento gradual de la capacidad del sistema de paraderos genera importantes beneficios en el servicio de transporte público reflejados en las particiones y velocidades modales lo que genera por consiguiente un beneficio en el sistema. El cuadro (4.4) nos muestra que una expansión de capacidad vial para los autos con una eficiencia en los paraderos débil nos generará solo beneficios para los usuarios en términos de costo generalizado debido a la fuerte congestión presente. En este contexto, tener aumentos graduales de la capacidad de transporte en los paraderos genera en el sistema un equilibrio donde el transporte público tiene una mayor presencia, hecho que influye directamente en los usuarios de este modo reduciendo sus costos generalizados debido a la mayor cobertura en frecuencias, circunstancia llamada como el *Efecto Mohring*. Contrariamente a este efecto, la expansión de capacidad vial genera en el sistema una pérdida de usuarios de este modo por lo que, siguiendo el mismo argumento, el costo generalizado para los usuarios de transporte público aumentaría con esta política (que es lo que se puede notar en los cuadros (4.5), (4.6) y (4.7)). Otro argumento a favor de esta hipótesis es que en un escenario donde sigue habiendo congestión pero el transporte público tiene una capacidad de su sistema mayor, genera una disminución importante en sus costos generalizados. Esta importante disminución genera que ante una política de expansión de capacidad vial para los autos, el costo generalizado de los usuarios de transporte público prácticamente se mantenga constante (leves subidas). En resumen, se comprueba con esto la

veracidad de la hipótesis planteada anteriormente que demuestra que la función de congestión en paraderos es determinante (existe un punto de inflexión) en el efecto sobre los costos generalizados para los usuarios de transporte público cuando existe una expansión de capacidad vial.

- Paralelamente, en los cuadros anteriores se presentan los resultados de las simulaciones considerando un modelo de demanda determinístico, el cual se implementa mediante la modificación al modelo generando una dependencia directa de las demandas en la igualdad de utilidades modales por período de manera de tener una comparación considerando el modelo de demanda original de Basso y Silva [2014]. De esta forma, los cuadros (4.6) y (4.7) muestran que ante cambios del modelo de demanda, el costo generalizado de un usuario que viaja en transporte privado puede aumentar cuando se expande la capacidad vial. Esto se tiene debido que al considerar un modelo de demanda determinístico, el escenario base en estos escenarios no tiene una importante congestión representada en altas velocidades para ambos modos (cerca de 35 [km/h]), lo cual al estar bajo un modelo de demanda de este tipo, una expansión de capacidad vial para los autos acentúa el atractivo hacia el transporte privado (debido a su constante modal) por lo que se genera una inducción de demanda mayor, lo cual produce en el resultado final un aumento de sus costos generalizados.
- Se presupone que el comportamiento del sistema en el período Off-Peak el efecto Mohring puede ser más importante debido a las pequeñas frecuencias presentes. Debido a esto, se simulan escenarios (con modelo de solo un período) en donde se reduce la demanda total para el período Peak con el fin de demostrar que se comporta de manera similar a considerar un período Off-Peak. Sin embargo, se encuentran resultados similares a los expuestos anteriormente sin mostrar un efecto mohring importante. El detalle de estos resultados son presentados en el Apéndice.

4.1.3. Análisis de sensibilidad: otros parámetros

Dentro de las extensiones realizadas al modelo original existen parámetros y variables presentes que ante variaciones, el resultado final de las simulaciones es prácticamente el mismo. En este contexto, omitir y/o modificar este tipo de consideraciones presentes en el modelo, genera beneficios en los tiempos de simulación, en complejidad del problema, en diferentes análisis, entre otros. El objetivo principal de esta subsección es presentar un análisis de sensibilidad de este tipo de parámetros y las ventajas que conlleva la consideración de su omisión o modificación de estos.

Una de las variables de optimización consideradas en el modelo es el número de paraderos por cada kilómetro de vía. En las iniciales simulaciones, se obtiene como resultado que el espacio óptimo de separación entre paraderos debe ser entre 406 y 420 metros,

longitud que considera un valor razonable. La imposición de un valor de p , reduce los tiempos de optimización y beneficia en el análisis de otras variables en sus efectos sobre el costo generalizado. La distancia entre las paradas de los buses varía bajo un 4,1 por ciento resultado de la optimizaciones a través de los escenarios considerando políticas urbanas y expansiones de capacidad, lo que demuestra que el valor real se asocia más con el peso del tiempo de caminata en la función de tiempo generalizado que de la política implementada. Es importante notar que el modelo original expuesto en Basso y Silva [2014], considera una demora por aceleración y frenado fijo, supuesto que incide directamente en la distancia óptima de paraderos. En Tirachini [2014] se muestra que si se asume correctamente este supuesto (demora por aceleración y frenado dependiente de la velocidad crucero) y se compara tráfico mixto con pista solo bus, el distanciamiento óptimo entre paraderos puede llegar a variar hasta un 50%. Sin embargo, por simplicidad, en los modelos que siguen se considera un valor de p impuesto igual a 2,42 donde este valor equivale a un promedio del número de paraderos óptimo por kilómetro obtenido en los escenarios simulados.

La modelación del tiempo de viaje en bus se divide en dos grupos con diferentes incidencias. El primero, corresponde a las demoras ocasionadas por la congestión en la vía y el segundo a la congestión asociada en los paraderos. Con un simple análisis matemático de capacidades se puede notar que la importancia en los resultados de equilibrio de estos grupos es diferente, siendo la congestión de paraderos la determinante en el comportamiento del sistema (ver Fernandez y Planzer [2002]). En efecto, un escenario en que se omite por completo la congestión en la vía del modelo, genera equilibrios similares si se considera. En un proceso similar, omitiendo por completo la congestión presente en los paraderos de buses, el equilibrio muestra un cambio en la optimización de sus variables y en los efectos que tiene un aumento de capacidad. Una omisión de esta variable genera beneficios importantes para el transporte público antes de una expansión de capacidad lo cual genera que ante un adición nueva de capacidad vial para los autos, el servicio público aumenta sus costos generalizados (hipótesis descrita en la subsección anterior). Mas aún, si se consideran cambios en la velocidad a flujo libre considerada en el modelo, los resultados muestran que las conclusiones no cambian aún cuando la magnitud de algunas variables cambian levemente. El detalle de estos resultados y simulaciones se encuentran en el Apéndice.

Otro de los escenarios interesantes de simular en este trabajo incluye una disminución de un 30% de la demanda total con el objetivo de notar los cambios en el equilibrio y el comportamiento de este nuevo contexto ante una expansión de capacidad. Bajo este nuevo supuesto, se obtiene que reducir la demanda total, en horario peak genera un escenario equivalente a expandir la capacidad vial. La dirección de cambio de las variables de optimización bajo una reducción de la demanda indican una disminución de la carga del sistema lo que se expresa en un aumento de la partición modal del auto debido a su importante reducción de costos generalizados expresados en altas velocidades. Este escenario también es similar al sistema en horario Off-Peak (proporcional a las horas del período), en donde si bien la demanda en la mayoría de los escenarios es la misma que

en horarios Peak, las condiciones y parámetros no son los mismos. El detalle de estos resultados y simulaciones se encuentran en el Apéndice.

4.2. Adición políticas urbanas

Los análisis y resultados expuestos en la sección anterior consideran un sistema completamente autofinanciado, lo que implica que la curva de costo medio decrece a una menor tasa que cuando se considera el primer mejor (ver, por ejemplo, Jara-Díaz y Gschwender [2009]) al mismo tiempo que no exista una congestión importante en los paraderos. Este hecho motiva el análisis de esta sección, donde se estudia el efecto de aumentar la capacidad vial usada por los automóviles en presencia de políticas de subsidio óptimo y tarificación por congestión.

En el análisis de la sección anterior se encontró que existe una gran diferencia en el efecto de invertir en capacidad vial entre las simulaciones que consideran una capacidad de paraderos Baja y Media, pero que es prácticamente la misma en los casos de Media, Alta y Irrestringida. Por este motivo, en esta sección y en la siguiente solamente se comparan los resultados en los casos con capacidad Baja y Media. Dado que en la sección anterior el objetivo era conocer en una primera mirada el comportamiento del sistema ante una expansión de capacidad, en esta sección y el resto del capítulo se consideran cuatro capacidades viales igual a 3000, 3600, 4200 y 4800[veh/hr] de manera de tener un espectro mayor de resultados frente a la aplicación de estas nuevas políticas.

4.2.1. Subsidio

Los subsidios al transporte público siguen siendo una política urbana en discusión en cuanto a los efectos y de su necesidad que se tiene sobre el sistema en general. Investigaciones revelan que esta política obtiene resultados positivos (efecto Mohring, disminución externalidades negativas automóvil, disminución tarifa, entre otros) como también negativos que afectan directamente los costos generalizados de viajar para los usuarios. Las siguientes figuras muestran los costos generalizados obtenidos para cada uno de los escenarios. En primer lugar se presentan los resultados sin la política implementada de manera de notar los cambios y efectos que influyen en el sistema posterior a su aplicación. Posterior a esto, se presentan los resultados para los dos tipos de paraderos descritos anteriormente. Para cada serie de las figuras siguientes existen cuatro puntos que equivalen a las capacidades viales consideradas en el inicio de esta subsección y denominadas en la figura por el modo y posteriormente el período, por ejemplo Auto-P, representado por el modo automóvil en el período Peak. El eje de las abscisas está representado por un período, en donde de izquierda a derecha está determinado por la partición modal de los autos y de derecha a izquierda por la del transporte público.

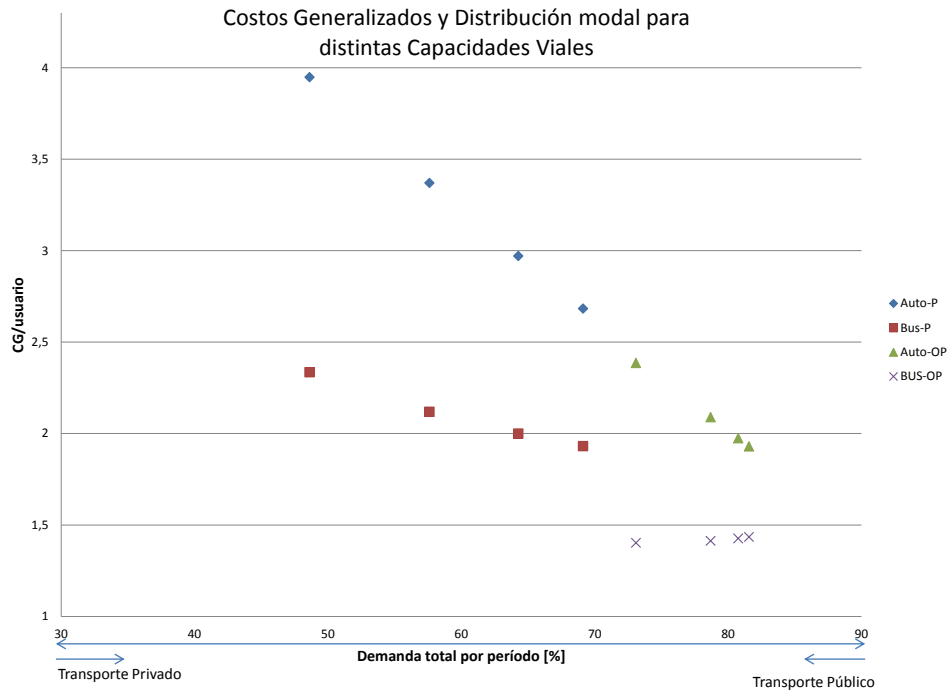


Figura 4.1: Tráfico separado, Capacidad Sistema Baja

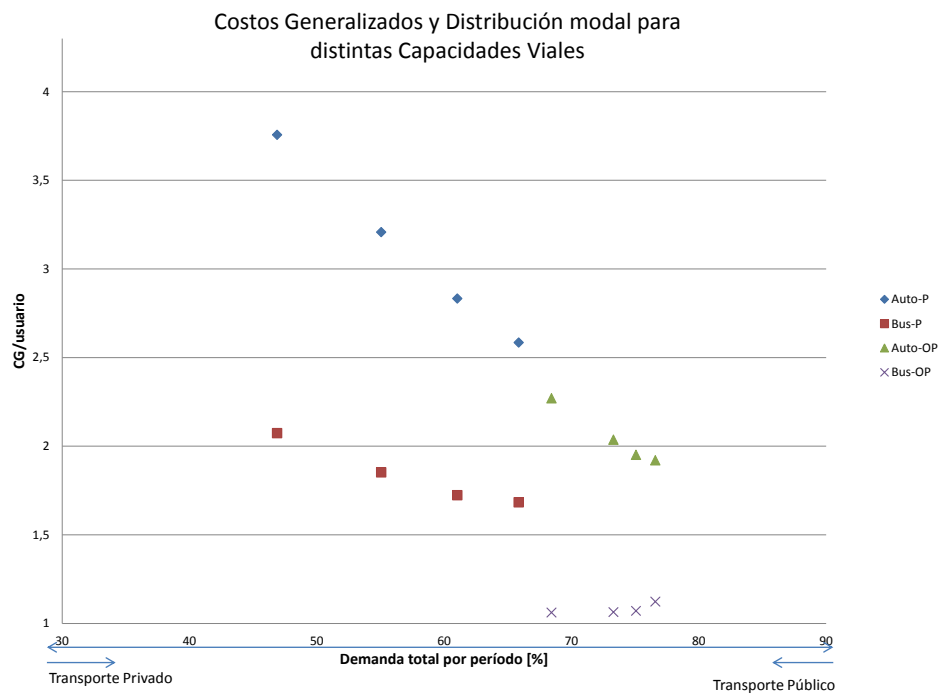


Figura 4.2: Subsidio al Transporte Público, Capacidad Sistema Baja

Para estos escenarios el subsidio óptimo es de un 100 %, es decir, tarifa del bus igual a cero. De la misma forma, las siguientes figuras muestran los resultados en presencia de la política de subsidio óptimo para los escenarios anteriores considerando ahora una función de congestión asociado a una capacidad Media del sistema.

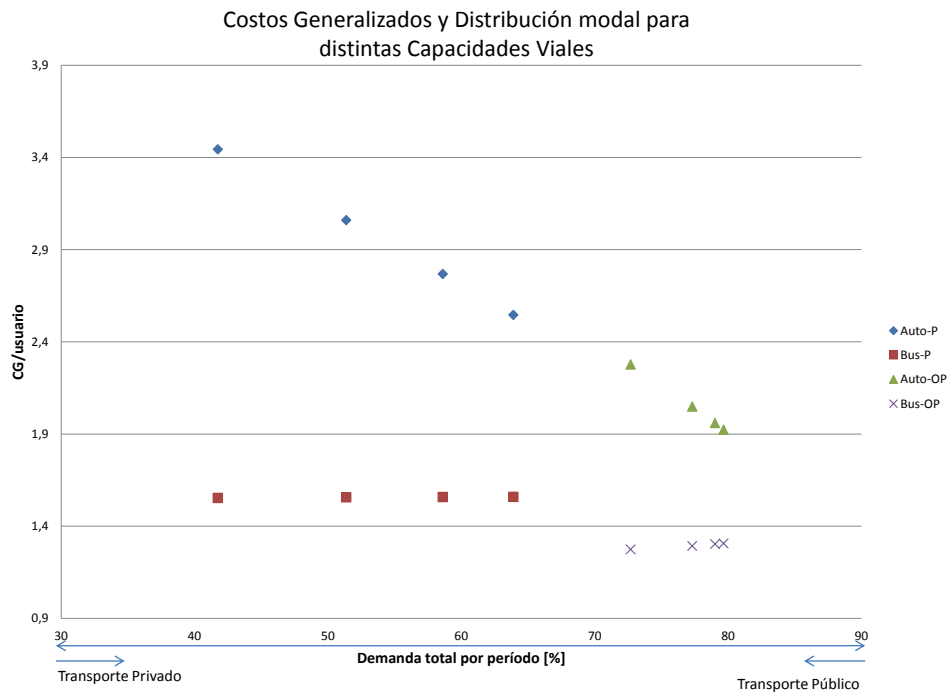


Figura 4.3: Tráfico separado, Capacidad Sistema Media

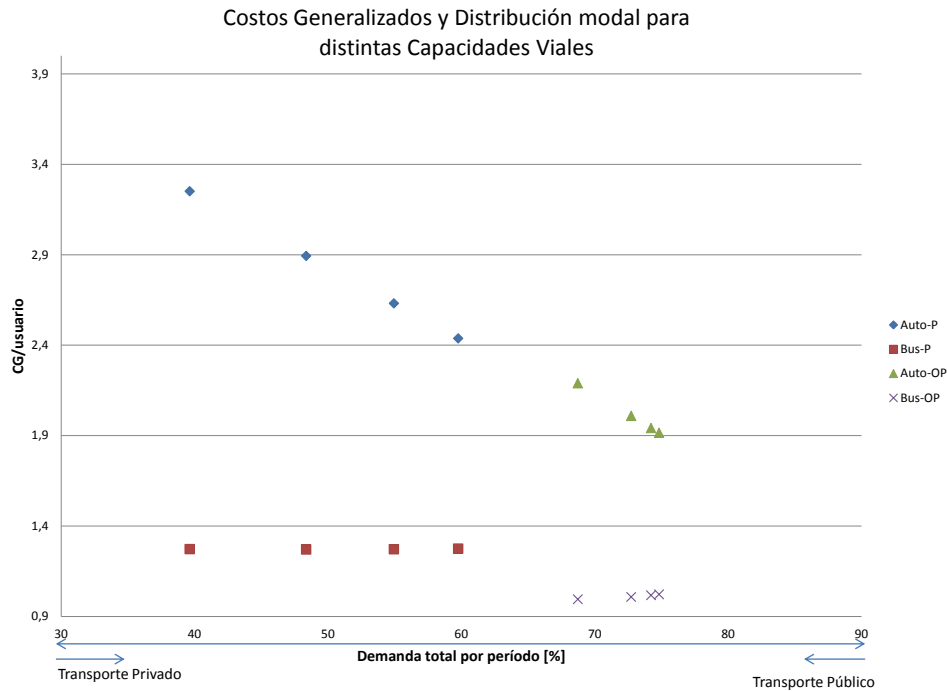


Figura 4.4: Subsidio al Transporte Público, Capacidad Sistema Media

Los subsidios óptimos obtenidos en todos los escenarios son de un 100 % cuando la función de congestión es de capacidad media.

Como se espera, y al igual que en Basso y Silva [2014], la aplicación de la política de subsidios genera una disminución de los costos generalizados de cada modo representado en las figuras por desplazamientos verticales y mantención de las tasas de cambio en presencia del aumento de capacidad. Independiente de la capacidad del sistema adoptado, los efectos de expandir la capacidad vial no cambian cualitativamente en presencia de una política de subsidio. Sin embargo, existen diferencias interesantes de notar cuando se consideran distintas capacidades del sistema en los paraderos en estas simulaciones. Las diferencias entre estos dos sistemas recaen en la capacidad del sistema para recibir más frecuencia en los sistemas de paraderos. Un subsidio por más que sea óptimo, no entrega una disminución importante del costo generalizado con sistemas de paraderos deficientes ya que los niveles de servicio prácticamente se mantienen, exceptuando el beneficio que la tarifa en este caso sea igual a cero.

Los usuarios de automóvil, independiente de la capacidad del sistema adoptada, obtienen en ambos períodos una disminución de su costo generalizado por la expansión de capacidad vial. En cuanto a los usuarios de transporte público, en período peak, depende de la capacidad del sistema su efecto frente a una expansión de capacidad. Ante una capacidad Baja del sistema de paraderos el costo generalizado de estos usuarios disminuye,

contrariamente cuando se considera una capacidad del sistema Media en donde su costo generalizado presenta leves aumentos de su costo generalizado (resultado de la sección anterior). En el período Off-Peak se mantiene la tendencia del servicio público independiente de la capacidad de los paraderos con costo generalizados pequeños y con aumentos leves frente a la expansión de capacidad. Esto último se atribuye a que en este período existe un importante descongestión del sistema lo que implica que la partición modal se inclina significativamente al auto; De esta manera, el transporte público ofrece un servicio con menores frecuencias pero con velocidades altas. Ante el aumento de capacidad vial para los autos, existe una transferencia de usuarios hacia el transporte privado que generan una disminución del nivel de servicio del transporte público debido a la nueva optimización de las variables lo que se traduce en leves aumentos del costo generalizado de viajar en este modo.

4.2.2. Tarificación por congestión

Una política de tarificación por congestión es un concepto de la economía de mercado que se refiere a la utilización del mecanismo de precios con el propósito de cobrar a los usuarios las externalidades negativas generadas por la demanda en ciertos períodos cuando la oferta disponible de un bien público es insuficiente para satisfacer esa demanda. En este contexto, el efecto de esta política tiene variadas aristas de evaluación que generan la ausencia de acuerdos comunes en políticas de transporte.

El objetivo principal de esta subsección es analizar los efectos de expandir la capacidad vial en los costos generalizados en presencia de tarificación por congestión a los usuarios de automóvil. Para este efecto, se consideran los mismos supuestos de la subsección anterior.

Las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos con las simulaciones frente a expansiones de capacidad vial considerando la política de tarificación por congestión aplicada ante dos capacidades del sistema de paraderos diferentes.

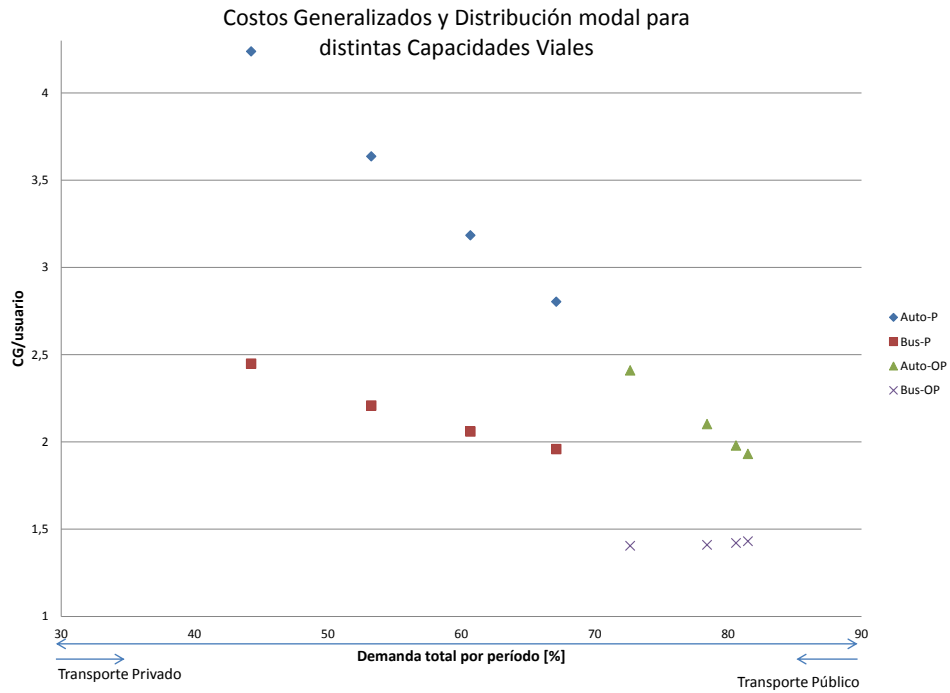


Figura 4.5: Tarifación por congestión, Capacidad Sistema Baja

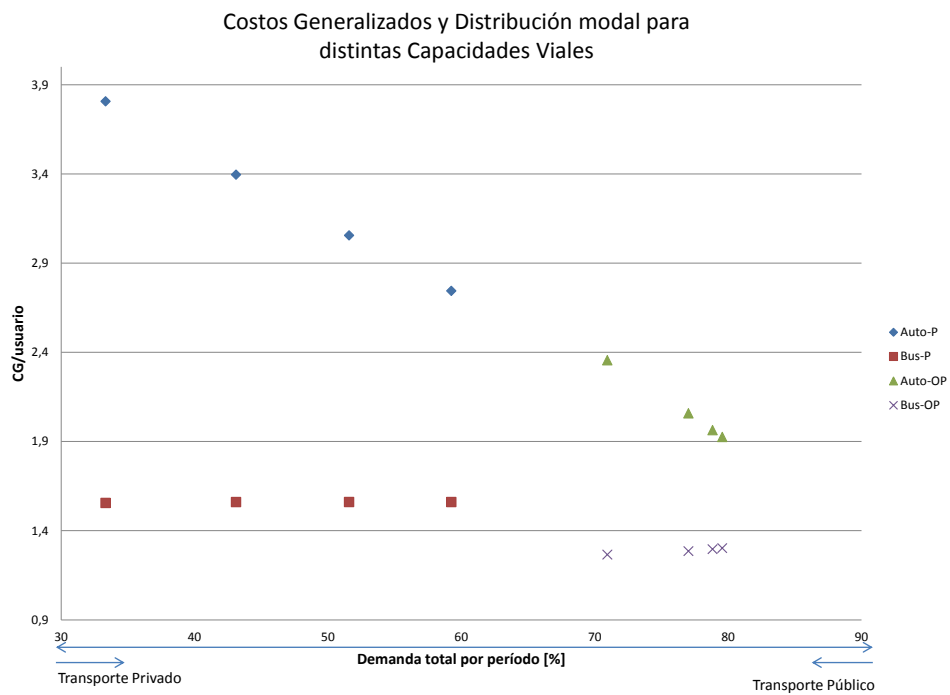


Figura 4.6: Tarifación por congestión, Capacidad Sistema Media

La política de tarificación por congestión genera en los escenarios una disminución significativa de la partición modal de los usuarios de transporte privado y por consiguiente un aumento en los usuarios que optan por transporte público. El costo generalizado para los usuarios que optan por el automóvil siempre aumenta cuando se aplica esta política y es completamente esperable debido a la tarifa que deben enfrentar aún cuando gente se ha cambiado de modo. Ante una expansión de capacidad vial para los autos, la presencia de esta política tiene las mismas tendencias que si se considerara un subsidio óptimo, en términos de costo generalizado.

Al igual que en la sección anterior, la importancia de la capacidad del sistema de paraderos influye directamente en el efecto de la política implementada en el servicio público. Considerando una capacidad baja del sistema, en horario peak el costo generalizado de los usuarios de transporte público prácticamente es inalterado debido a la congestión presente y a la restricción de capacidad. Debido a esto, la expansión de capacidad genera una descongestión del sistema que se ve reflejado en una disminución de sus costos generalizados. Aumentando la capacidad del sistema, el servicio público mejora significativamente ante la implementación de esta política lo que genera que ante la expansión de capacidad vial el costo generalizado de los usuarios de transporte público se mantenga prácticamente constante. En el período Off-Peak, la aplicación de la esta política no altera los resultados obtenidos en comparación con el escenario que sólo se considera tráfico separado.

En resumen, la aplicación tanto de la política de subsidio óptimo como la de tarificación por congestión generan resultados y efectos similares en términos de costo generalizado, manteniendo la cualidad de los resultados ante una expansión de capacidad cuando se está en un escenario con tráfico separado. Este hecho se sustenta en el alto valor subjetivo del tiempo de viaje que se considera. Por un lado, el subsidio óptimo no genera la atractividad suficiente hacia el transporte público, aún cuando el traslado de los usuarios sea con una tarifa igual a cero. Por otro lado, la tarificación por congestión tampoco es suficiente en desincentivar el uso del auto. Es decir, la política de expansión de capacidad vial a los autos en este escenario domina a las demás políticas de gestión. En la siguiente subsección veremos como cambian estos resultados cuando se considera ahora un tráfico mixto.

4.3. Tráfico mixto

La paradoja de Downs-Thomson se basa en tráfico separado entre los modos automóvil y transporte público, supuesto que se ha mantenido hasta ahora. El objetivo principal de esta sección es estudiar como cambian los resultados anteriores en condiciones de tráfico compartido entre los modos disponibles.

Para efecto de las simulaciones, se consideran las ecuaciones (3.6) y (3.7) en lugar de (3.8) y (3.9) para adicionar al modelo la influencia del transporte público al transporte privado en términos de tiempo de viaje.

Con motivo de tener una primera noción de las diferencias que existen cuando se considera un tráfico mixto en lugar de un tráfico separado, se muestra en los siguientes cuadros como cambian las velocidades optimizadas en cada escenario considerando un tipo de paradero de capacidad baja.

Velocidades [km/hr], Período Peak	Tráfico separado		Tráfico mixto	
Capacidad Vial [veh/h]	3600	4800	3600	4800
Auto	12, 39	20, 24	13, 20	22, 38
Bus	18, 87	22, 03	10, 56	16, 42

Cuadro 4.8: Velocidades modales, Período Peak, Capacidad Sistema Baja

Velocidades [km/h], Período Off-Peak	Tráfico separado		Tráfico mixto	
Capacidad Vial [veh/hr]	3600	4800	3600	4800
Auto	35, 78	53, 03	41, 33	46, 95
Bus	28, 13	28, 27	25, 84	28, 28

Cuadro 4.9: Velocidades modales, Período Off-Peak, Capacidad Sistema Baja

Si bien uno debiese esperar que las velocidades fueran siempre menores cuando se está considerando un tráfico mixto, no se debe olvidar que en cada uno de estos escenarios existe una optimización. En este sentido, la partición modal del auto con tráfico mixto bordea el 80 % mientras que en tráfico separado un 50 %, siendo esta participación del transporte privado el reacomodo en algunos escenarios en que la velocidad del auto aumenta desde el tráfico separado al compartido. Se deduce preliminarmente que ante niveles altos de congestión y de una optimización del sistema, un usuario que opta por el transporte privado es más beneficiado en tráfico mixto que en tráfico separado en término de velocidades.

Las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos en términos de costo generalizado considerando un tráfico mixto. En primer lugar se exponen los resultados en ausencia de toda política considerando distintas capacidades del sistema de paraderos. La notación ocupada en las figuras de esta sección es la misma considerada que en la sección anterior.

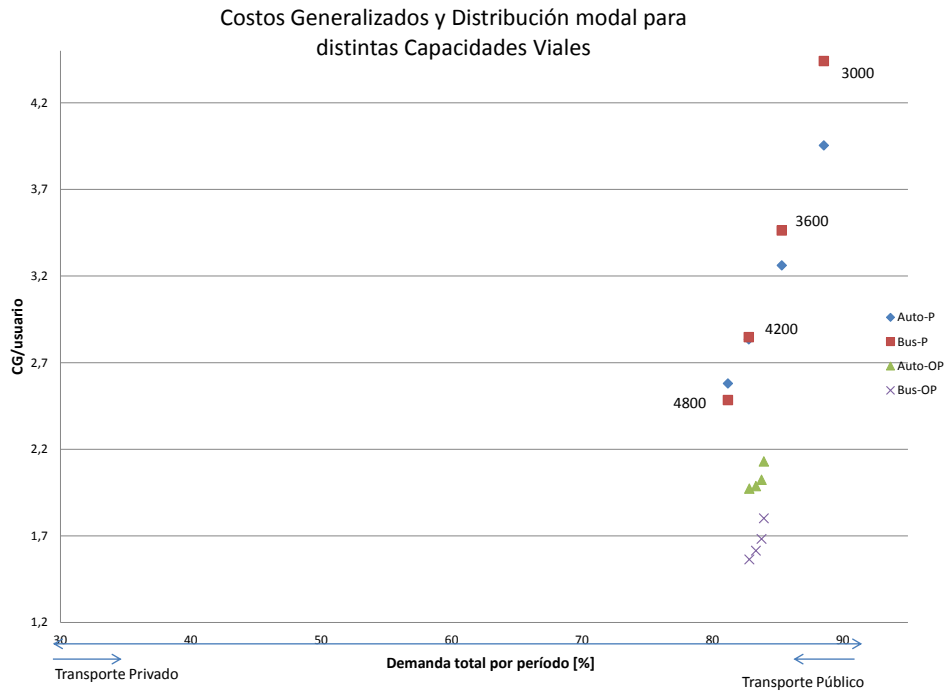


Figura 4.7: Tráfico mixto, Capacidad Sistema Baja

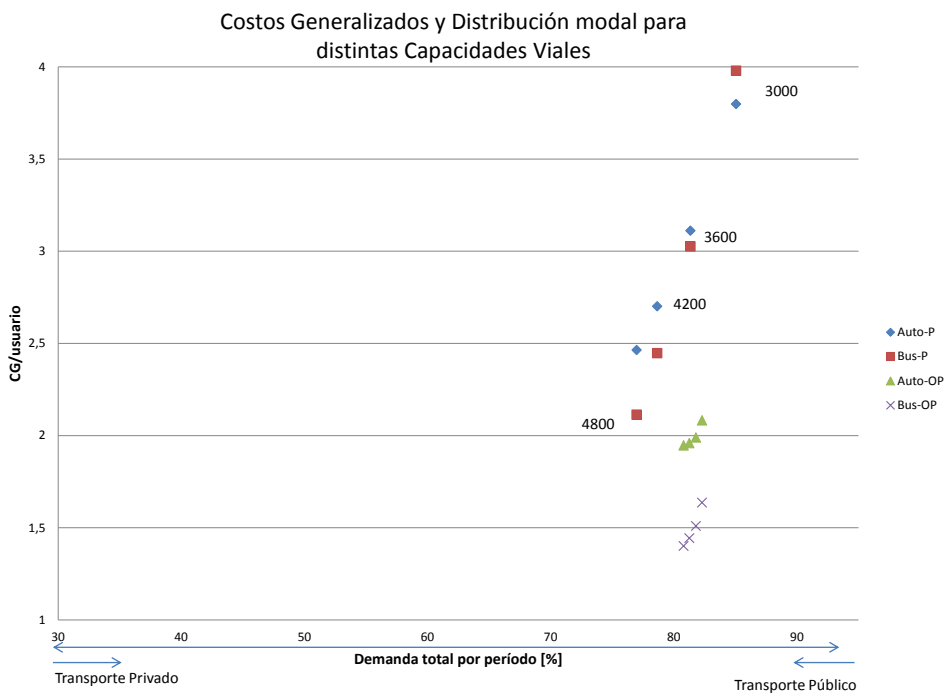


Figura 4.8: Tráfico mixto, Capacidad Sistema Media

Al considerar ahora un tráfico compartido de los modos en las vías, existen importantes cambios a nivel de comportamiento de los usuarios que generan un sistema muy diferente al considerar un tráfico separado. Las conclusiones más importantes se enuncian a continuación.

- Los escenarios simulados con distintas capacidades viales considerando tráfico mixto entregan particiones modales con una importante inclinación hacia el uso del auto en el período Peak¹. En este contexto, estos escenarios generan sistemas aún más congestionados que considerar un tráfico separado evidenciado en los altos costos generalizados y bajas velocidades modales.
- El efecto que tiene la expansión de capacidad vial cuando se considera ahora un tráfico compartido es diferente. En este nuevo sistema más congestionado en el período Peak, la expansión de capacidad genera una disminución de la partición modal del auto aún cuando existe más capacidad vial para este modo. Sin embargo, esta disminución genera una reducción en los costos generalizados tanto para los usuarios de transporte privado como público, resultado similar a una cota superior de una distribución modal en que el nivel de congestión ya no puede sostener más autos en el sistema aún cuando existe más capacidad vial.
- A diferencia de considerar un tráfico separado, al considerar un tráfico mixto la capacidad de los paraderos del sistema no genera cambios cualitativos en los resultados. Sí genera una disminución leve en los costos generalizados por un efecto directo. En este sentido, un aumento de capacidad vial disminuye siempre los costos generalizados de todos los usuarios, coincidiendo con lo expuesto en Kutzbach [2009].
- En este nuevo escenario, el comportamiento en el período Off-Peak también es diferente. Si bien se tiene un bajo nivel de congestión, el tráfico compartido genera una atracción hacia el uso del automóvil por sobre el transporte público, reflejado en el aumento de su partición modal. Esta transferencia de usuarios genera un escenario con altas velocidades para ambos modos pero una disminución de la velocidad de los buses en comparación con considerar un tráfico separado. Bajo esta premisa, un aumento de capacidad vial genera un efecto similar al período Peak pero con un orden de magnitud mucho menor, en donde tanto los usuarios de transporte privado como público disminuyen sus costos generalizados junto con una leve transferencia de usuarios desde el auto hacia el bus.

Para completar el análisis bajo el escenario de tráfico mixto, las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos considerando la adición de las políticas de subsidio y

¹Cabe destacar que la demanda por el período peak es menor en comparación con considerar un tráfico separado, resultados que se detallan en el Apéndice.

tarificación por congestión de manera de notar las diferencias con respecto a suponer un tráfico segregado.

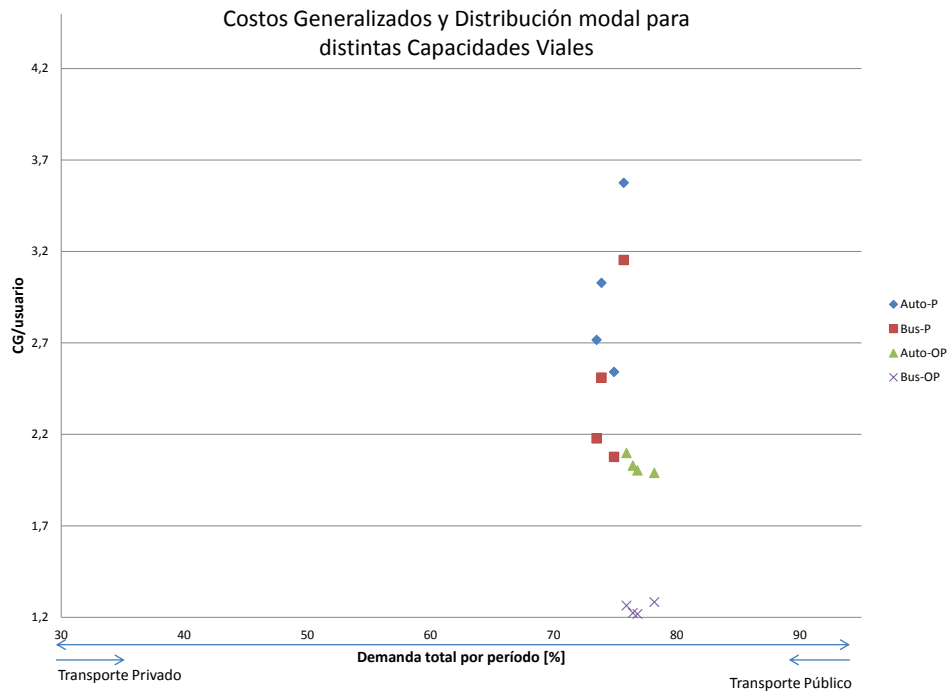


Figura 4.9: Subsidio, Capacidad Sistema Baja

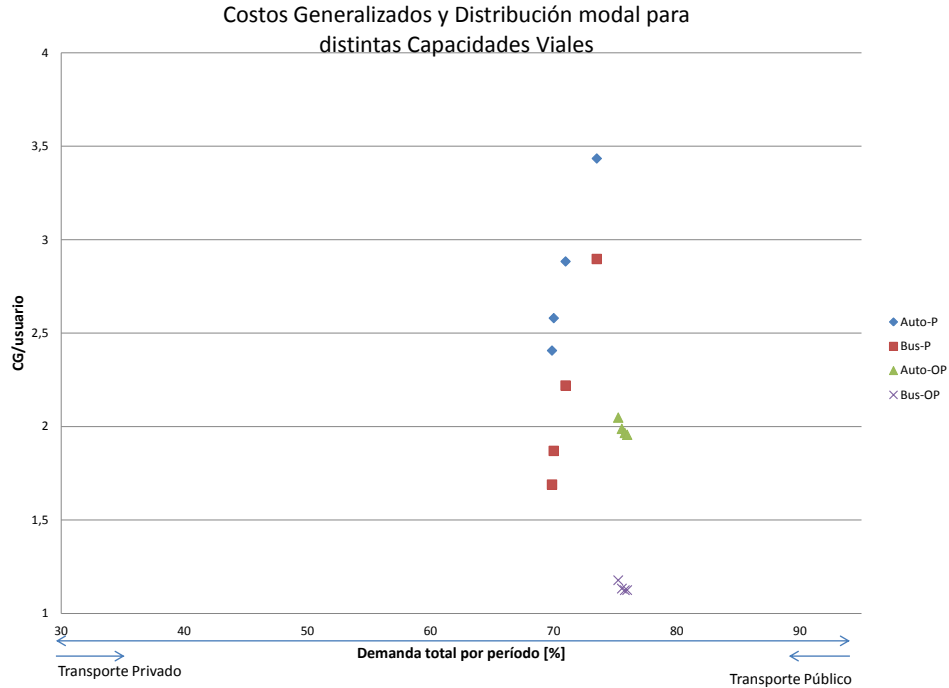


Figura 4.10: Subsidio, Capacidad Sistema Media

La implementación de la política de subsidio óptimo no genera grandes cambios cualitativos en los resultados ante la presencia de expansión de capacidad al igual que cuando se considera un tráfico separado. Se mantienen los resultados en período Peak considerando la ausencia de políticas bajo un escenario de tráfico mixto, disminuyendo levemente sus costos generalizados para ambos modos y reduciendo la participación modal para el auto. En cuanto al período Off-Peak si existen leves cambios en donde ante una expansión de capacidad, la participación modal del auto aumenta levemente junto con una disminución de sus costos generalizados. Si bien existe un cambio de comportamiento debido a la presencia de la política de subsidios, los cambios no son de una magnitud significativa y prácticamente los valores se mantienen constantes ante la expansión de capacidad.

A continuación se muestran como cambian los resultados con la aplicación de la política de tarificación por congestión bajo este nuevo escenario.

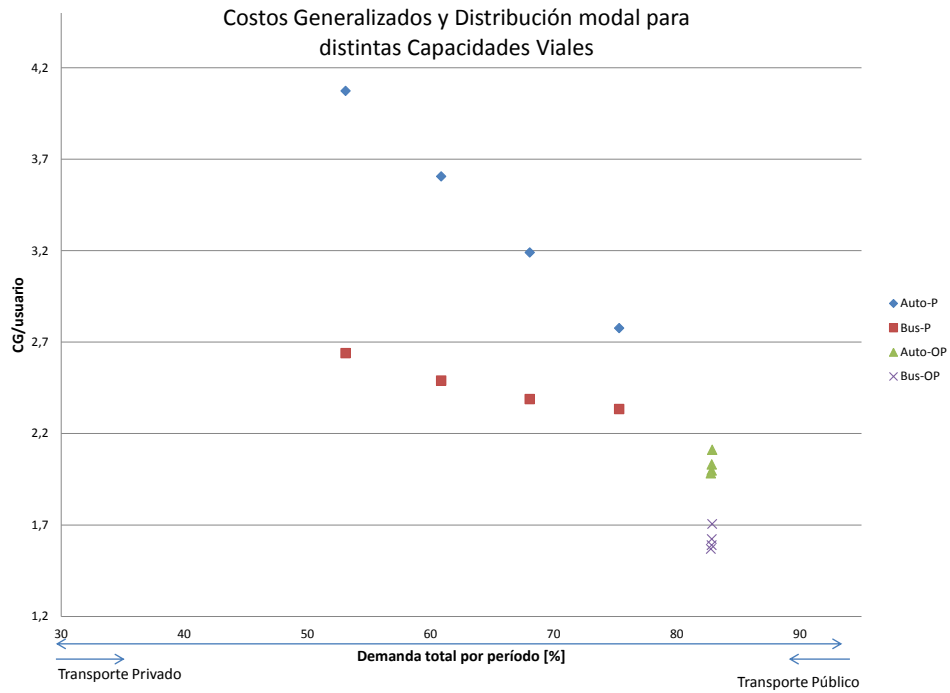


Figura 4.11: Tarificación por congestión, Capacidad Sistema Baja

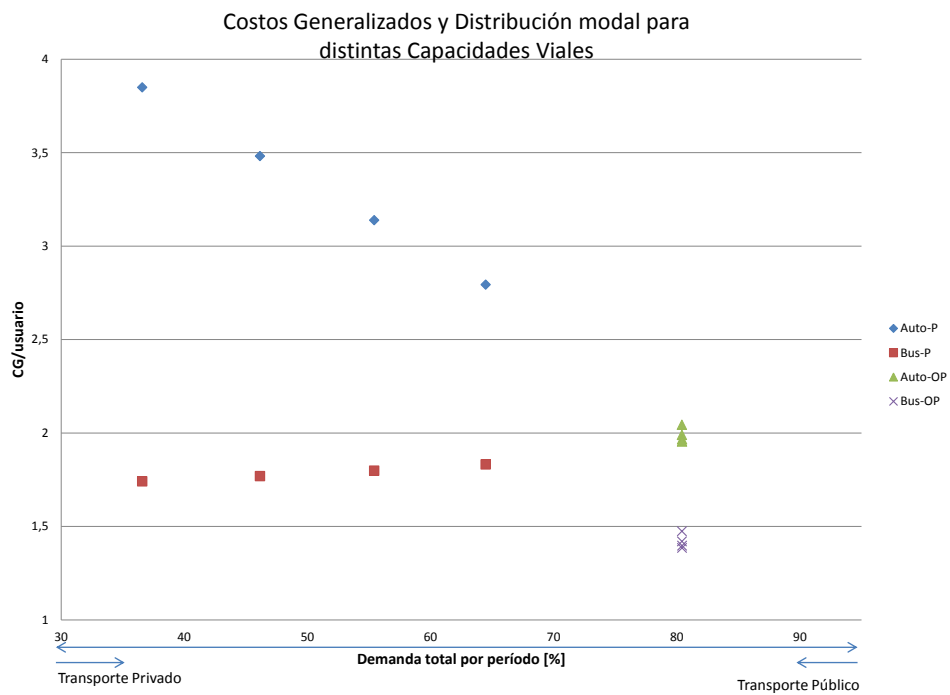


Figura 4.12: Tarificación por congestión, Capacidad Sistema Media

La aplicación de esta política en este nuevo escenario si influye de manera significativa. En primer lugar, no hay un efecto notorio de esta política cuando existe tráfico separado debido a que no existe complementariedad entre las políticas de vías exclusivas y tarificación por congestión. El escenario de tráfico mixto genera un sistema altamente congestionado con una importante partición modal hacia el auto. Debido a esto, estas dos políticas generan efectos similares sobre el desincentivo del transporte privado. En segundo lugar, bajo expansión de capacidad, esta política genera en el período Peak un aumento de la partición modal del auto junto con una reducción de sus costos generalizados. En cuanto al período Off-Peak, el equilibrio prácticamente no sufre modificaciones ante la expansión de capacidad, sólo presentando una leve disminución de los costos generalizados de ambos modos. Finalmente, al igual que la consideración por si sola de tráfico separado, la aplicación de esta política genera importantes beneficios en el transporte público. Ante la expansión de capacidad, el efecto del sistema depende de la capacidad del sistema de paraderos presente. A medida que esta capacidad de los paraderos aumenta, el sistema frente a expansión de capacidad vial para los autos comienza a obtener desbeneficios por parte del transporte público.

Capítulo 5

Eficiencia y Sustitución de Políticas

La idea central de este capítulo es comparar tanto el efecto individual de las políticas como el efecto de aplicación en conjunto en términos de eficiencia para combatir la congestión urbana. Las políticas que se consideran en dicho análisis son Tarificación por congestión, Subsidio al transporte público, Vías exclusivas y Expansión de capacidad vial, las cuales en adelante son resumidas por las siglas CON, SUB, VE y CAP respectivamente.

Para cumplir el objetivo de este capítulo, se hacen las comparaciones en términos de bienestar social, siendo ésta, la función objetivo del problema de optimización descrito en el capítulo 3 y el criterio de comparación de los impactos que tiene la aplicación de las políticas. Para llevar esto a cabo, se considera como supuesto, un costo por unidad de capacidad adicional que se obtiene de Infrastructure [2014], detallado en el capítulo 3. De forma de robustecer el análisis, se estudian todos los escenarios con tres capacidades viales representativas diferentes. En el escenario BASE, que considera tráfico mixto y ausencia de toda otra política, se considera una capacidad vial normal a 3600 [veh/hr], equivalente a 3 pistas, suponiendo que cada una de estas tiene una capacidad de 1200 [veh/hr], corrigiendo por los posibles semáforos y/o elementos viales que disminuyen la capacidad normal estandarizada de una pista igual a 1800 [veh/hr]. Las políticas de inversión corresponden a un aumento de un 16,67 % y un 33,33 %, equivalentes a considerar una capacidad de 4200 [veh/hr] y 4800 [veh/hr] respectivamente. Un aumento superior a un tercio de la capacidad existente es significativo y fuera del alcance de esta tesis. En los escenarios en que se incorpora pista exclusiva de buses, la política de expansión vial considera aumentar la capacidad vial sólo a los autos, manteniendo siempre una pista exclusiva para el transporte público. El parámetro que ajusta la condición antes nombrada es n , de manera de mantener siempre una pista para este modo de transporte. Otra consideración que se adopta con el objetivo de robustecer el análisis es la decisión de simular los diferentes escenarios descritos anteriormente en el capítulo 3 para sólo dos capacidades del sistema de paraderos: Baja y Media, donde el primero considera una función de congestión de paraderos con los siguientes supuestos: 1 Sitio, pago con dinero en efectivo y sólo subida por la puerta delantera. El segundo caso considera en la función de congestión de paraderos, 2 sitios, pago magnético y sólo subida por la puerta delantera. La justificación de esta

consideración se sustenta en que estos dos casos son los casos con que es posible replicar el escenario actual de Londres. En cuanto al uso de la política de subsidio al transporte público, se fija un subsidio igual a un 45 % basado en Parry y Small [2009], con el objetivo de tener una referencia más cercana a la real.

En la sección 5.1, se analiza el efecto que tiene sobre la aplicación de las políticas, la preexistencia de inversión en capacidad. En esta sección se analizan diferentes escenarios entregando en cada caso, mejores respuestas y comportamiento de las políticas en términos de bienestar social y de variables asociadas. Junto con esto, un análisis de la sustituibilidad y complementariedad entre las políticas. Posteriormente, en la sección 5.2 se presenta un análisis del interés de inversión en capacidad cuantificado en términos de bienestar social. En esta sección se analiza también el efecto que hay sobre las variables de optimización y finalmente un análisis de sensibilidad en el costo de invertir capacidad vial adicional.

5.1. Efectos de la inversión de capacidad vial en políticas

5.1.1. Base

Con el objetivo de tener una base de comparación, en la figura (5.1) se presenta un resumen en términos de aumento del bienestar social en referencia a la simulación del escenario de tráfico mixto, capacidad existente igual a 3600 [veh/hr], función de congestión de paraderos con una capacidad baja y en ausencia de toda política aplicado a la ciudad de Londres, resultados que son consecuentes a los obtenidos en Basso y Silva [2014].

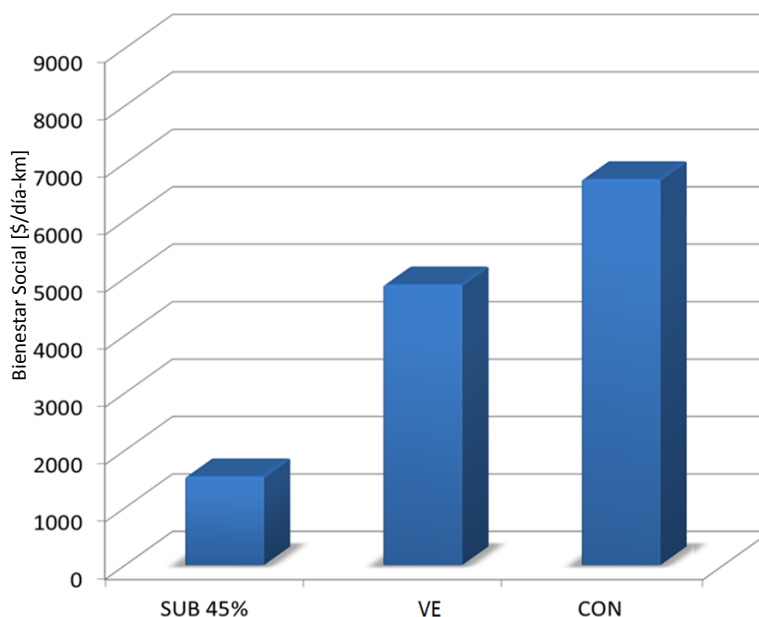


Figura 5.1: Aumento de Bienestar Social desde caso Base, Resultados Basso y Silva [2014]

En este contexto, los resultados más relevantes para este estudio se enumeran a continuación.

1. **Tarificación por congestión:** En la literatura, se ha tenido un común acuerdo que la aplicación de la tarifación por congestión genera una disminución del excedente de los consumidores y más aún, puede ser una política regresiva si los valores de tiempo pequeños se deben a ingresos más bajos (Verhoef y Small [2004]). Sumado a esto, Mohring [1979], sostiene la idea de que la política de tarifación por congestión y la de subsidios, son herramientas equivalentes en sus efectos. Sin embargo, estas dos ideas se sustentan bajo la ausencia de consideración de elasticidad total de la demanda y del costo marginal de los fondos públicos. Estas consideraciones, son contempladas en Basso y Silva [2014] obteniendo resultados completamente diferentes a los que se tenían anteriormente. La tarifación por congestión no es una política regresiva, en su aplicación aumenta el excedente del consumidor y la comparación con la aplicación de la política de subsidio dista de la equivalencia.
2. **Vías Exclusivas:** En todos los escenarios estudiados en Basso y Silva [2014] la aplicación de esta política es la que induce el mayor incremento en la frecuencia, incluso con la ausencia de subsidios, contrariamente al argumento que es común encontrar en la literatura donde se sostiene que la forma de aumentar la frecuencia es por medio de los subsidios. Este aumento de frecuencia conlleva un aumento de velocidad en los tiempos de viaje del bus y aumento de la participación modal de los usuarios en transporte público.

3. **Subsidios:** Con los altos valores del tiempo considerados y por consecuencia, la alta partición modal para el auto en el escenario BASE, hacen que incluso una disminución moderada de la congestión todavía puede traer beneficios que son más altos que el costo monetario de dar subsidios. Esto también explica que el beneficio marginal de la subvención es relativamente constante y el óptimo lo alcanza en un 100 %, equivalente a un sistema de tránsito gratuito. Este resultado es equivalente a recientes investigaciones expuestas en Parry y Small [2009], donde se explicita que la reducción de los subsidios de tránsito por debajo de los niveles óptimos implicarán una reducción considerable del bienestar social.
4. Importantes argumentos referidos a la eficiencia en la aplicación de cada política en Londres viene dado tras un análisis de sensibilidad de ciertos parámetros, el cual entrega que los valores del tiempo de viaje y particiones modales iniciales son determinantes en la eficiencia de estas. Un ejemplo de ello es que si se impone una partición modal del bus similar al auto en ambos períodos en el escenario BASE, el beneficio de la aplicación de la política de vías exclusivas está por sobre la tarificación por congestión. Por otro lado, si a partir del escenario BASE una política se implementa pero tanto el número y tamaño de los autobuses siguen siendo los mismos, se tienen importantes pérdidas de bienestar en comparación a lo que se obtiene con la optimización de dichas variables, teniendo un aumento con esta última de un 70 %.
5. Por último, los resultados muestran que no existe una significativa complementariedad entre la aplicación de las políticas. El máximo bienestar social se encuentra con la aplicación de las 3 políticas, pero sólo con la aplicación de tarificación por congestión se logra un bienestar social cercano al 95 % de la aplicación en conjunto.

Las características principales del escenario base presente es de un sistema altamente congestionado con velocidades bajas para ambos modos en el período peak y costos generalizados relativamente altos que reflejan el alto nivel de congestión presente. Para poder tener una primera mirada del efecto que tiene sobre el sistema una expansión de capacidad en términos de bienestar social es clave tener una confiable estimación del costo de la inversión, en donde uno de los grandes problemas es que este valor puede ser altamente variable dependiendo de las consideraciones que se tomen. En este costo se debería incluir los costos de construcción, mantención, operación, contingencias, expropiación, entre otros. En este sentido, cada uno de estos costos varía dependiendo de la ciudad y/o el proyecto en que se presente esta situación. En una primera mirada donde sólo se considera el costo total de construcción, Infrastructure [2014] exhibe un costo por año-km de pista de *0,6 Millones de dólares*. En la figura (5.2) se considera este costo de manera de notar cómo cambia el bienestar social al expandir la capacidad vial en un 16 %, equivalente a agregar media pista al sistema, en conjunto con la comparación de aplicación de las otras políticas urbanas.

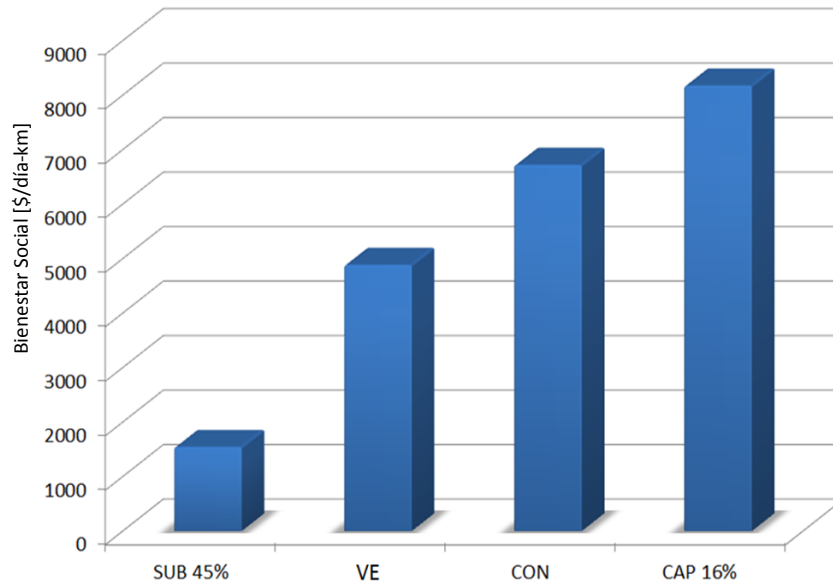


Figura 5.2: Aumento de Bienestar Social por aplicación de Políticas urbanas

De la figura anterior se deduce que con un criterio de bienestar social y en base a este modelo de equilibrio parcial, se debiera aplicar una política de expansión de capacidad para combatir la congestión en un escenario altamente congestionado.

En la siguiente sección, se presenta como cambian el efecto de las políticas en el sistema ante la presencia de expansión de capacidad vial.

5.1.2. Inversión en capacidad

El objetivo de esta subsección es poder entregar las herramientas necesarias para evaluar cómo afecta la pre-existencia de inversión en capacidad a la bondad de las otras políticas. Para esto, el análisis se divide en dos. En primer lugar, se muestra como cambia la eficiencia de cada política cuando existe más capacidad disponible tomando en cuenta el escenario base considerado en Basso y Silva [2014]. En segundo lugar, se simulan todos los escenarios detallados en el capítulo 3 con las extensiones del modelo respectivas para capacidades del sistema de paraderos Baja y Media¹, para luego mostrar en detalle los cambios obtenidos en cada escenario.

Supongamos entonces que tenemos desde el principio más capacidad vial disponible, en este caso un 16,67% más, por lo cual nos gustaría ver como impacta en el sistema la aplicación de las distintas políticas en este nuevo escenario. La figura (5.3) muestra los

¹El comportamiento de la función de congestión de paraderos de Basso y Silva [2014] es equivalente a una suma ponderada entre el caso a y b , con una inclinación hacia este último caso

resultados de lo antes descrito en donde se agregan también los resultados considerando la capacidad vial original. Las barras de esta figura representan el aumento en términos de bienestar social de una política dada implementada, en cambio la última barra asociada a CAP16% representa un aumento de la capacidad vial de un 33%.

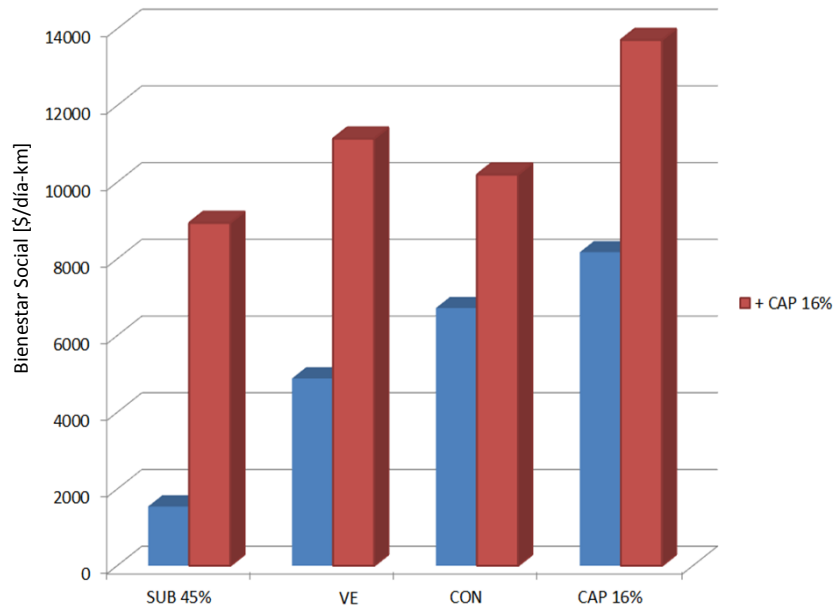


Figura 5.3: Expansión de capacidad Vial y interacción con otras políticas urbanas

De la figura anterior se desprenden dos importantes conclusiones. En primer lugar, no existe una significativa complementariedad entre las políticas. Este resultado está condicionado por el efecto que tiene en el sistema la aplicación de cada política por si sola. La política de subsidios no genera importantes cambios en los niveles de congestión por lo que una expansión de capacidad es muy efectiva. Por otro lado, la aplicación tanto de la tarificación por congestión como la de vías exclusivas generan importantes beneficios y el nivel de congestión disminuye significativamente, por lo que una expansión de capacidad no es tan efectiva en este escenario. Sin embargo, en esta nueva mirada, la política de expansión de capacidad vial sigue siendo una alternativa que mejora el bienestar social. Una segunda conclusión importante de esta figura es la eficiencia de cada política cuando tenemos disponible más capacidad vial. En este nuevo contexto, la expansión de capacidad vial para los autos sigue teniendo el mayor aumento de bienestar social pero ahora seguido por la política de vías exclusivas. De estos resultados se deduce también que la eficiencia de la política de tarificación por congestión es inversamente proporcional al espacio disponible para el transporte privado. Por último, cabe recalcar que una primera expansión de capacidad vial para los autos continúa generando un escenario congestionado (más detalles en el cuadro (5.1)).

Si se repite el mismo ejercicio de la figura anterior pero ahora con una capacidad del sistema de paraderos mayor (Media), se obtienen los siguientes resultados:

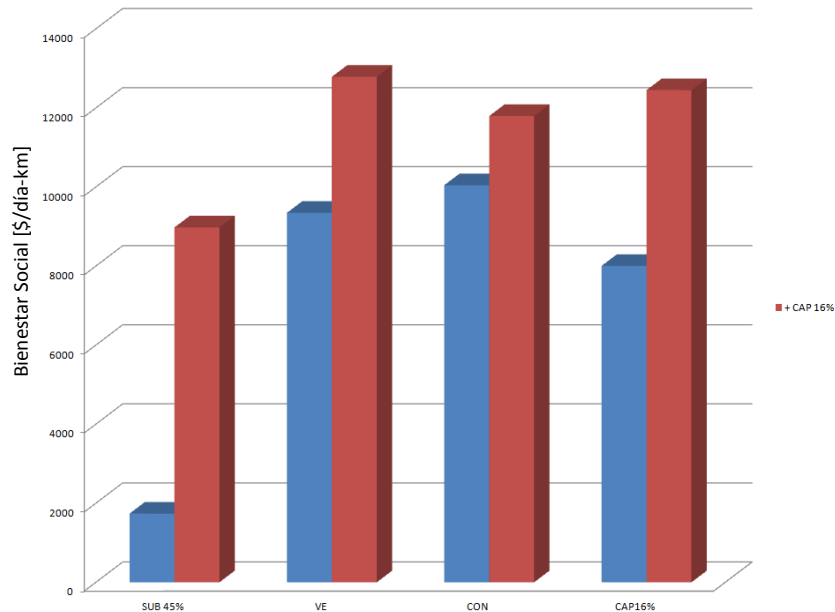


Figura 5.4: Ganancias en Bienestar social de políticas urbanas con Capacidad Sistema de Paraderos Media

La figura anterior muestra que en el caso Base la política de expansión de capacidad ya no es la que entrega un mayor aumento de bienestar social, siendo la tarificación por congestión y la dedicación exclusiva de buses las políticas dominantes. Por lo tanto, ante un escenario altamente congestionado (velocidad de 12 [km/h] para buses y 15 [km/h] para autos) la piedra de tope para una mayor eficiencia de las políticas de gestión es la capacidad en el sistema de paraderos del transporte público, dejando la política de expansión de capacidad en segundo orden.

La segunda parte del análisis considera el estudio en detalle de cambio de las variables de optimización en los nuevos escenarios considerados de esta tesis. En los siguientes cuadros se presentan los resultados² obtenidos en estas simulaciones considerando primeramente un aumento de un 16,67% y después un 33,33%, de la capacidad existente.

²el beneficio social que se muestra en el cuadro siguiente no considera el costo de la inversión en capacidad ya que no afecta en la comparación que se hace en esta parte de la sección

	Capacidad Sistema de paraderos Baja							
	BASE	SUB	CON	SUB+CON	VE	VE+SUB	VE+CON	VE+SUB+CON
Beneficio Social [\$/día-km]	26448,1	27214,8	28472,5	28582,9	29409,5	29872,1	29878,8	30093,7
Excedente Consumidor [\$/día-km]	26448,1	28909,9	23442,2	26574,0	29479,6	31994,3	26554,8	29936,5
Tarifa Bus, Peak [\$/km]	0,180	0,100	0,162	0,086	0,156	0,084	0,156	0,084
Tarifa Bus, Off-Peak [\$/km]	0,180	0,100	0,162	0,086	0,156	0,084	0,156	0,084
Tarifa Auto, Peak [\$/km]	0,000	0,000	0,398	0,299	0,000	0,000	0,298	0,204
Tarifa Auto, Off-Peak [\$/km]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Frecuencia Peak [bus/h]	32,8	42,8	48,6	49,0	61,6	62,3	60,8	61,2
Frecuencia Off-Peak [bus/h]	24,1	24,8	23,0	24,2	40,0	44,4	41,7	44,8
Capacidad Bus [pax]	37	36	45	46	41	43	45	46
Velocidad Auto, Peak [km/h]	17,8	18,5	23,3	22,7	16,0	16,8	20,0	19,6
Velocidad Bus, Peak [km/h]	13,6	14,0	16,2	15,9	20,7	20,2	19,8	19,5
Velocidad Auto, Off-Peak [km/h]	45,2	43,9	44,0	43,8	46,7	48,2	46,1	47,8
Velocidad Bus, Off-Peak [km/h]	27,4	25,0	24,9	24,6	28,2	28,1	28,3	28,1
Partición, Peak [%]	44,06	44,61	43,10	43,80	44,55	44,87	43,60	44,21
Partición, Off-Peak [%]	47,23	46,80	48,03	47,49	46,89	46,70	47,69	47,25
Partición, No-Travel [%]	8,72	8,59	8,87	8,71	8,56	8,43	8,71	8,54
Partición modal auto, Peak [%]	82,79	78,17	68,05	67,93	64,27	62,75	60,68	60,31
Partición modal bus, Peak [%]	17,21	21,83	31,95	32,07	35,73	37,25	39,32	39,69
Partición modal auto, Off-Peak [%]	83,33	80,52	82,83	80,24	80,76	78,19	80,59	78,12
Partición modal bus, Off-Peak [%]	16,67	19,48	17,17	19,76	19,24	21,81	19,41	21,88

	Capacidad Sistema de paraderos Media							
	BASE	SUB	CON	SUB+CON	VE	VE+SUB	VE+CON	VE+SUB+CON
Beneficio Social [\$/día-km]	30927,5	31900,6	34718,4	34885,6	35710,7	36312,1	36618,8	36912,9
Excedente Consumidor [\$/día-km]	30927,5	33310,0	29351,6	31874,9	35780,8	38199,1	32695,0	35690,0
Tarifa Bus, Peak [\$/km]	0,131	0,074	0,111	0,060	0,118	0,066	0,118	0,065
Tarifa Bus, Off-Peak [\$/km]	0,131	0,074	0,111	0,060	0,118	0,066	0,118	0,065
Tarifa Auto, Peak [\$/km]	0,000	0,000	0,507	0,435	0,000	0,000	0,398	0,320
Tarifa Auto, Off-Peak [\$/km]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Frecuencia Peak [bus/h]	30,3	38,1	54,4	55,6	70,6	77,7	77,4	81,3
Frecuencia Off-Peak [bus/h]	18,6	19,6	18,7	19,3	29,5	32,8	31,3	33,4
Capacidad Bus [pax]	51	48	58	58	43	41	45	44
Velocidad Auto, Peak [km/h]	19,9	20,9	30,8	30,3	18,8	19,8	27,2	26,8
Velocidad Bus, Peak [km/h]	15,9	16,4	22,6	22,5	28,5	28,7	28,3	28,4
Velocidad Auto, Off-Peak [km/h]	48,8	47,9	47,8	47,9	48,7	49,9	48,1	49,4
Velocidad Bus, Off-Peak [km/h]	30,4	28,5	28,4	28,3	30,7	30,7	30,8	30,7
Partición, Peak [%]	44,92	45,43	44,36	44,90	46,18	46,56	45,20	45,77
Partición, Off-Peak [%]	46,60	46,21	47,08	46,66	45,58	45,32	46,40	45,98
Partición, No-Travel [%]	8,48	8,36	8,57	8,44	8,24	8,12	8,40	8,25
Partición modal auto, Peak [%]	78,65	74,74	55,42	55,35	58,61	56,97	51,58	51,28
Partición modal bus, Peak [%]	21,35	25,26	44,58	44,65	41,39	43,03	48,42	48,72
Partición modal auto, Off-Peak [%]	81,26	78,89	80,43	78,49	79,01	76,94	78,83	76,82
Partición modal bus, Off-Peak [%]	18,74	21,11	19,57	21,51	20,99	23,06	21,17	23,18

Nota: Valores monetarios de Londres están en dolares US 2009.

Cuadro 5.1: Resultados, expansión de 16,67%

- BASE:** La preexistencia de una inversión en capacidad vial de un 16,67% de la capacidad existente genera un equilibrio de corto plazo en que la aplicación de las políticas pierden su real eficiencia. En un análisis de efectividad individual de las políticas, en el caso normal, existe un aumento en términos de bienestar social de un 37,9% (se deduce del cuadro (5.2)) de la política más eficiente, en cambio cuando

existe un aumento de capacidad de este orden, el aumento de la política más efectiva es sólo de un 13,3%, en promedio. En este contexto, la optimización del escenario base entrega un nivel de congestión menor, pero no del orden que uno esperaría ya que ante este aumento de capacidad, domina la preferencia de optar por el auto como medio de transporte (80% aprox. en período Peak y Off-Peak), aumentando levemente su velocidad. El hecho de que esta velocidad aumente relativamente poco, sustenta 2 posibles caminos para alivianar dicha congestión: Efectivamente, seguir expandiendo en capacidad para los autos, con el objetivo de disminuir sus costos de forma mas considerable, teniendo en cuenta su alto valor del tiempo para los usuarios, o por otro lado, tratar de disminuir el incentivo al uso del automóvil y buscar un uso eficiente del espacio por medio del transporte público. Esto coincide con el hecho de analizar la eficiencia de las políticas de tarificación por congestión y vías exclusivas en este escenario, lo cual se presenta en el próximo apartado. Por otro lado, la inversión en capacidad genera en la partición modal del bus una disminución, por lo que es óptimo pensar en un ajuste entre frecuencias y capacidad de bus dependiendo de los costos asociados. Para este caso, un leve aumento en la frecuencia y una disminución considerable del tamaño del bus.

- **POLÍTICAS:** En este escenario, la eficiencia de la aplicación de cada política cambia la estructura original en donde ahora la política más eficiente de aplicar en términos de bienestar social es la de vías exclusivas, en segundo lugar la tarificación por congestión y en tercer lugar los subsidios, política la cual sigue manteniendo su baja eficiencia original.³ Estas dos primeras políticas sugieren una misma dirección de descongestión del sistema presente, con la diferencia que, las vías exclusivas imponen esta única vía para el transporte público. El trade-off presente en la eficiencia de las vías exclusivas en donde se genera una pista sólo bus pero a la vez se reduce la capacidad vial para los autos, tiene la respuesta en la capacidad total y en el tipo de paradero que tengamos en el sistema. Considerando el aumento de capacidad, la aplicación aislada de cada una de estas dos políticas, genera una importante baja en la partición modal para el auto en el período Peak⁴ y por consecuencia un aumento considerable en la partición modal del bus. Estos dos cambios en la aplicación de estas políticas es relativamente del mismo orden pero la diferencia recae en que, por un lado existe un alto aumento de frecuencia y leve disminución de la velocidad del auto (debido a la presencia de la nueva pista solo bus), y por otro lado, el aumento de la frecuencia y aumento de velocidad del auto (debido a la tarificación por congestión), donde el punto de inflexión lo genera la partición modal inicial producto de la capacidad total disponible, produciendo que esta primera opción de eficiencia del espacio sea en este caso más eficiente en términos de bienestar social.

³El subsidio óptimo obtenido ante este aumento de capacidad es de un 100%, consecuente a los resultados que se presentan en Basso y Silva [2014]. Para estos resultados se fija el subsidio en un 45%.

⁴En el período Off-Peak se sigue manteniendo un alto porcentaje de usuarios ya que no existe congestión inicial(BASE) representado con altas velocidades tanto para el auto como para el bus,

El siguiente cuadro muestra los resultados obtenidos considerando una preexistencia de inversión en capacidad vial de un 33,33% de la capacidad existente.

	Capacidad Sistema de paraderos Baja							
	BASE	SUB	CON	SUB+CON	VE	VE+SUB	VE+CON	VE+SUB+CON
Beneficio Social [\$/día-km]	31984,5	32082,0	31944,5	32138,8	34126,2	34504,6	34244,7	34516,0
Excedente Consumidor [\$/día-km]	31984,5	33622,7	29509,7	32671,7	34196,2	36479,3	32467,5	35929,9
Tarifa Bus, Peak [\$/km]	0,164	0,087	0,160	0,085	0,159	0,085	0,158	0,085
Tarifa Bus, Off-Peak [\$/km]	0,164	0,087	0,160	0,085	0,159	0,085	0,158	0,085
Tarifa Auto, Peak [\$/km]	0,000	0,000	0,167	0,071	0,000	0,000	0,142	0,044
Tarifa Auto, Off-Peak [\$/km]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Frecuencia Peak [bus/h]	37,3	42,9	43,2	44,4	61,5	62,8	61,5	62,6
Frecuencia Off-Peak [bus/h]	24,3	23,8	22,4	23,7	38,0	42,3	38,9	42,3
Capacidad Bus [pax]	37	39	41	41	37	38	39	39
Velocidad Auto, Peak [km/h]	22,4	22,8	24,2	23,7	20,2	21,3	22,5	22,0
Velocidad Bus, Peak [km/h]	16,4	16,2	16,8	16,5	22,0	21,5	21,5	21,3
Velocidad Auto, Off-Peak [km/h]	47,0	45,3	45,8	45,3	53,0	53,9	52,8	53,8
Velocidad Bus, Off-Peak [km/h]	28,3	25,2	25,5	25,1	28,3	28,1	28,3	28,1
Partición, Peak [%]	45,65	45,97	44,94	45,66	45,69	46,00	45,14	45,82
Partición, Off-Peak [%]	45,92	45,69	46,50	45,95	45,98	45,80	46,46	45,95
Partición, No-Travel [%]	8,43	8,35	8,56	8,40	8,32	8,21	8,41	8,23
Partición modal auto, Peak [%]	81,19	77,23	75,32	75,01	69,12	67,33	67,11	66,71
Partición modal bus, Peak [%]	18,81	22,77	24,68	24,99	30,88	32,67	32,89	33,29
Partición modal auto, Off-Peak [%]	82,83	80,23	82,76	80,19	81,56	78,92	81,48	78,90
Partición modal bus, Off-Peak [%]	17,17	19,77	17,24	19,81	18,44	21,08	18,52	21,10

	Capacidad Sistema de paraderos Media							
	BASE	SUB	CON	SUB+CON	VE	VE+SUB	VE+CON	VE+SUB+CON
Beneficio Social [\$/día-km]	36206,3	36580,5	36964,7	37177,2	38871,7	39350,7	39200,1	39500,3
Excedente Consumidor [\$/día-km]	36206,3	37868,4	33214,9	35719,0	38941,8	41081,6	36545,9	39474,3
Tarifa Bus, Peak [\$/km]	0,119	0,065	0,110	0,060	0,118	0,066	0,118	0,065
Tarifa Bus, Off-Peak [\$/km]	0,119	0,065	0,110	0,060	0,118	0,066	0,118	0,065
Tarifa Auto, Peak [\$/km]	0,000	0,000	0,297	0,225	0,000	0,000	0,232	0,154
Tarifa Auto, Off-Peak [\$/km]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Frecuencia Peak [bus/h]	34,2	39,0	45,3	46,6	64,3	70,9	69,1	73,1
Frecuencia Off-Peak [bus/h]	18,8	19,0	18,3	18,9	28,4	31,5	29,5	31,7
Capacidad Bus [pax]	50	51	57	56	42	40	44	42
Velocidad Auto, Peak [km/h]	25,4	26,0	30,9	30,4	23,2	24,5	28,6	28,2
Velocidad Bus, Peak [km/h]	19,5	19,4	22,2	22,0	28,6	28,8	28,5	28,6
Velocidad Auto, Off-Peak [km/h]	50,5	49,4	49,4	49,3	54,1	54,7	53,8	54,5
Velocidad Bus, Off-Peak [km/h]	31,5	28,9	28,9	28,8	30,7	30,7	30,7	30,7
Partición, Peak [%]	46,43	46,74	45,50	46,04	46,88	47,21	46,12	46,71
Partición, Off-Peak [%]	45,35	45,12	46,14	45,72	45,03	44,80	45,68	45,23
Partición, No-Travel [%]	8,22	8,14	8,37	8,25	8,09	7,98	8,20	8,06
Partición modal auto, Peak [%]	76,98	73,57	64,48	64,38	63,90	62,04	59,25	58,91
Partición modal bus, Peak [%]	23,02	26,43	35,52	35,62	36,10	37,96	40,75	41,09
Partición modal auto, Off-Peak [%]	80,79	78,64	80,42	78,49	79,66	77,54	79,56	77,49
Partición modal bus, Off-Peak [%]	19,21	21,36	19,58	21,51	20,34	22,46	20,44	22,51

Nota: Valores monetarios de Londres están en dolares US 2009.

Cuadro 5.2: Resultados, expansión de 33,33%

- **BASE:** En el mismo análisis de efectividad individual de las políticas presentado anteriormente, se reafirma la hipótesis de que a medida que se avanza en inversión

de capacidad vial, la efectividad de las políticas va disminuyendo. En este nuevo escenario, se obtiene un aumento promedio de un 6,95 % (contra un 13,3 % del caso anterior) en términos de bienestar social, de la política más efectiva. Ante este aumento de capacidad vial, el nivel de congestión no disminuye considerablemente, lejos de lo que uno podría pensar. En comparación al aumento de capacidad anterior, las frecuencias y tamaños de bus se mantienen igual, existe un aumento de las velocidades de los modos pero existe una leve disminución de la partición modal del auto y por consecuencia un leve aumento de los usuarios que ocupan el transporte público. Esto indica que la inversión de capacidad no es suficiente para mejorar considerablemente las velocidades por lo que para usuarios de menor valor del tiempo en auto que optan por éste, prefieren un cambio de modo aún cuando tienen mas capacidad vial para transportarse.

- **POLÍTICAS:** La aplicación de las políticas en este nuevo escenario, genera efectos diferentes. Por un lado, la política de vías exclusivas mantiene la misma tendencia de un aumento considerable de la frecuencia, una disminución importante de la partición modal de auto y por consiguiente un aumento de los usuarios en transporte público. Dado esto, una leve disminución de la velocidad para los usuario de transporte privado pero un importante aumento en las velocidades de los buses, hacen que esta política sea, nuevamente, la mas eficiente en términos de bienestar social. Por otro lado, la aplicación de la política de tarificación por congestión crea un escenario diferente a lo antes mostrado. Las variables de optimización permanecen prácticamente iguales al escenario BASE con una leve disminución de la partición modal del auto debido a las nuevas tarifas que se enfrentan y por consecuencia el aumento leve de la partición modal para el bus. Debido a esto, los usuarios de transporte privado, al tener mismas condiciones que las anteriores pero ahora enfrentando una tarifa por congestión, no hace más que disminuir el excedente del consumidor, entendiendo que este efecto es mayor que el leve aumento de la frecuencia y de tamaño de bus para los usuarios de transporte público debido a la nueva demanda. Estos efectos se ven reflejados en que la aplicación de esta política, en este escenario, disminuye el bienestar social. Por último, la política de subsidios, mantiene su marginal efecto antes mostrado, aumentando el bienestar social, mas bien reflejados en la tarifa de los usuarios de transporte público y prácticamente manteniendo constantes las restantes variables de optimización.

Resultados generales

1. El escenario normal con una capacidad equivalente a 3600 [veh/h] muestra en su equilibrio una situación muy congestionada con un alto uso del automóvil, en donde la política de tarificación por congestión es la vía mas eficiente para poder combatir la congestión vial. Ante el aumento progresivo de inversión en capacidad, la eficiencia de las políticas van cambiando y gradualmente el mejor camino es la política de vías

exclusivas. Adicionalmente, ante una inversión de capacidad importante, la aplicación de la política de tarificación por congestión puede llegar a ser contraproducente.

2. El cambio desde un tipo de paradero a otro no hace más que reforzar la idea de que las vías exclusivas generan una mayor eficiencia para combatir la congestión vial en presencia de inversión en capacidad, teniendo un escenario con mayores frecuencias, mayor partición modal del transporte público y aumento considerable de las velocidades modales.
3. Si se analiza la aplicación de políticas en conjunto, se puede notar que la efectividad de las pistas sólo bus es diferente en ambos tipos de paraderos. Si se considera en primer lugar el escenario SUB+CON con un sistema de paraderos con capacidad Baja, la aplicación posterior de vías exclusivas no hace más que disminuir el bienestar social, al contrario como uno podría pensar. En este mismo contexto, pero ahora para el caso con una capacidad del sistema Media, la aplicación de vías exclusivas es efectiva y aumenta, como es esperable, el bienestar social. Este importante efecto entrega que la efectividad de la política de vías exclusivas depende de la existencia de un correcto servicio público en los paraderos. Es lógico pensar que la aplicación de este tipo de política hace más atractivo el bus pero si no se tienen condiciones óptimas de servicio en los paraderos no hace más que ser contraproducente cuando se está anteriormente en presencia de las otras políticas.
4. Ante la existencia de inversión en capacidad, se sigue manteniendo la falta de eficiencia en la complementariedad entre las políticas. En todos los escenarios presentados, la mayor eficiencia en término de bienestar social se encuentra con la aplicación de las tres políticas pero la aplicación de una de ellas, en promedio, genera un 97% de esa efectividad.
5. Como complemento, es interesante notar que en ciertos rangos de inversión en capacidad, un cambio del tipo de paradero puede ser una herramienta mas efectiva que dicha inversión en términos de bienestar social⁵ (Figura 5.4).

5.2. Interés de inversión en capacidad

En la presente sección, se presenta un análisis del real interés por invertir en capacidad considerando que puede estar implementada antes alguna política. Se estudian los escenarios en que esta política es conveniente y en cuales no, junto con un análisis de las variables involucradas.

⁵se considera que el costo de el cambio de paradero a otro es relativamente pequeño con respecto a la inversión en capacidad

Una de las claves en el análisis de eficiencia de la política de expansión de capacidad vial es el costo asociado de inversión. El valor de este costo, es altamente variable dependiendo los supuestos adoptados. La estimación de este valor varía según los años de vida útil de la nueva vialidad, del precio según el año y de costos asociados como: construcción, operación y mantención, reconstrucción, contingencias, tierras, expropiaciones, entre otros. Mas aún, en un análisis de costo beneficio mostrado en Policy [2008] se muestra que la magnitud de este valor puede variar hasta cinco veces su magnitud si es que es necesario expropiaciones. En una búsqueda acuciosa de este valor, se determina que este costo se encuentra en un rango de $[0,05 - 2]$ MUSD/año-km-pista, donde todas las posibles combinaciones y consideraciones de costos caen en este intervalo Más detalles de esta referencia se puede encontrar en Doll et al. [2008] y DULAC [2013].

La figura (5.5) muestra como cambia el bienestar social en cada escenario a medida que se invierte en capacidad de un 16% progresivamente tomando en cuenta ahora un valor de costo de inversión tres veces mayor (1,83 [MUSD/año-km-pista]) pero dentro del rango de los antecedentes recopilados, con el objetivo de simular un valor que incluya posibles expropiaciones y/o compra de terreno. Adicionalmente se muestran estos resultados simulados con una capacidad del sistema de paraderos Baja y Media.

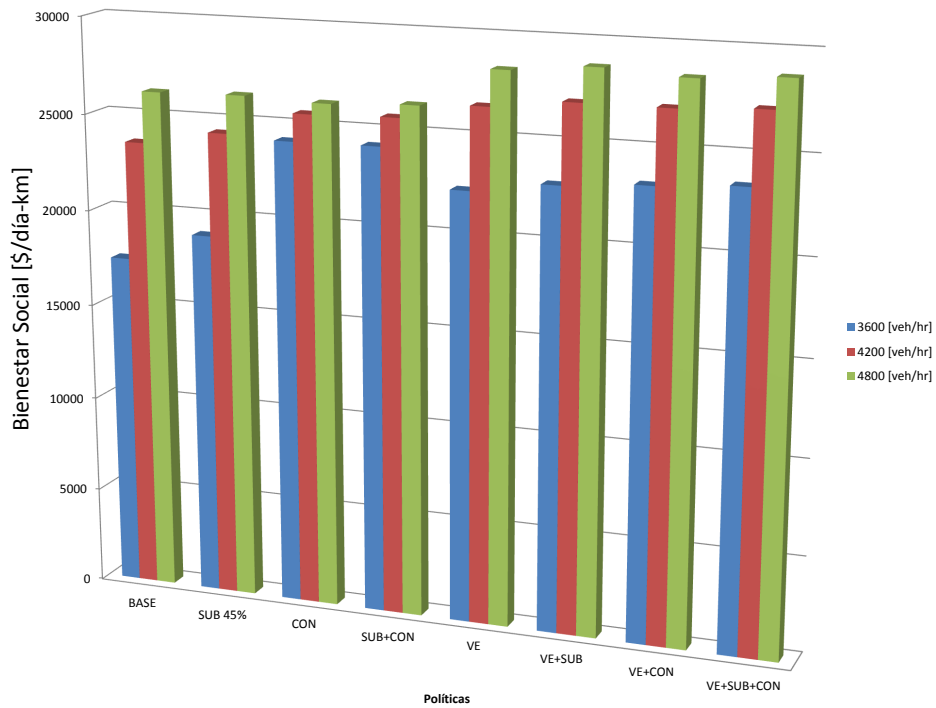


Figura 5.5: Bienestar social, Políticas urbanas, Capacidad Sistema Baja

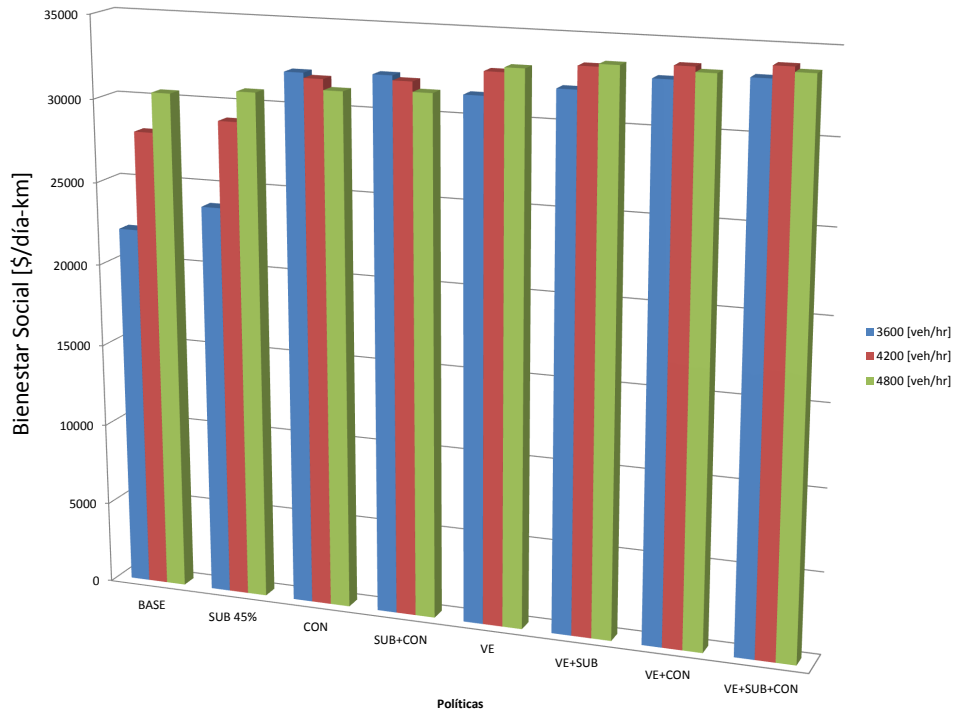


Figura 5.6: Bienestar social, Políticas urbanas, Capacidad Sistema Media

De los resultados expuestos en las figuras anteriores se puede deducir que:

BASE+SUB

La política de invertir en capacidad cuando el transporte privado y el público comparten capacidad en presencia de cualquier subsidio, genera resultados positivos cuando el costo de la inversión en cuestión, no supera los beneficios que trae consigo. La congestión presente en este escenario es relevante por lo que una expansión de capacidad vial descomprime el sistema y domina por sobre una inducción de demanda hacia el transporte privado. En este caso, el transporte público no es del todo beneficiado debido a la pérdida de usuarios y en la disminución de frecuencias. Estos cambios si bien no son completamente significativos en magnitud, son suficientes para alivianar la congestión y obtener beneficios sociales.

CON

La aplicación de esta política al escenario normal genera los beneficios sociales más altos considerando la aplicación de cada una de estas por si sola. En este sentido, la tarificación por congestión logra disminuir considerablemente el uso del medio de transporte privado disminuyendo su partición modal en un 25 % en promedio en período peak. Este

resultado considera también aumentos de más de un 100 % en las frecuencias y por consiguiente aumento de las velocidades en ambos modos ante la nueva eficiencia del espacio. Es importante destacar que la aplicación de esta política logra las mismas velocidades en ambos modos que una inversión de un tercio de la capacidad existente para el escenario normal. Ahora bien, los efectos de una inversión de capacidad vial en un escenario normal con tarificación por congestión dependen de la eficiencia del transporte público en sus paraderos, en donde con una capacidad alta de este sistema, una expansión de capacidad de cualquier magnitud es contraproducente en términos de bienestar social. En este contexto, esta capacidad extra genera incentivos a los usuarios a optar nuevamente por el auto y por consiguiente una disminución de la partición modal del bus. Ante esto, el equilibrio genera gradualmente menores tarifas por congestión y menores frecuencias por lo que esta política de inversión va lentamente en pro de un escenario congestionado como se tenía inicialmente.

VE

Considerar un tráfico segregado en el sistema genera beneficios similares a los de una tarificación por congestión. En este contexto, la inversión de capacidad genera sólo beneficios sociales debido a que con los tipos de paraderos simulados, no alcanza la política de pistas sólo bus a obtener la suficiente eficiencia de manera tal que se genere una situación similar a que con tarificación por congestión (en el capítulo anterior se muestra que ante el aumento en la capacidad del sistema de paraderos, las vías exclusivas pasan a ser la política con un mayor aumento de eficiencia). De este modo, se prevee que ante una mayor capacidad del sistema de paraderos, una expansión de capacidad no haría mas que disminuir el bienestar social.

Complementariedad

En términos generales, la complementariedad de todas las políticas urbanas dependerán del nivel de congestión en que se encuentra el sistema. A medida que la congestión es más significativa, la complementariedad es más efectiva. Sumado a esto, ante un sistema importantemente descongestionado, la aplicación de una segunda política puede llegar a ser hasta contraproducente.

5.2.1. Análisis de sensibilidad: costo capacidad adicional

Esta última subsección tiene por objetivo notar la importancia real del costo de la capacidad vial adicional analizando costos límites que equivalen a los beneficios sociales de implementar alguna política urbana. Para esto, se presenta de manera gráfica el aumento en bienestar social, sin considerar el costo de la inversión, en cada uno de los escenarios estudiados, considerando, en primer lugar, una inversión de capacidad de un 16,67 % de

la capacidad existente, y en segundo lugar, una inversión de un 33,33% de la capacidad existente. Para ambas inversiones se presentan los resultados tomando en cuenta los dos tipos de paraderos considerados hasta el momento. En las siguientes figuras se presenta en líneas horizontales el equivalente en bienestar social (costo social) del costo total de construcción por km (en miles de USD) suficientes para suplir el bienestar social de cada escenario. En rojo se representa el costo real.

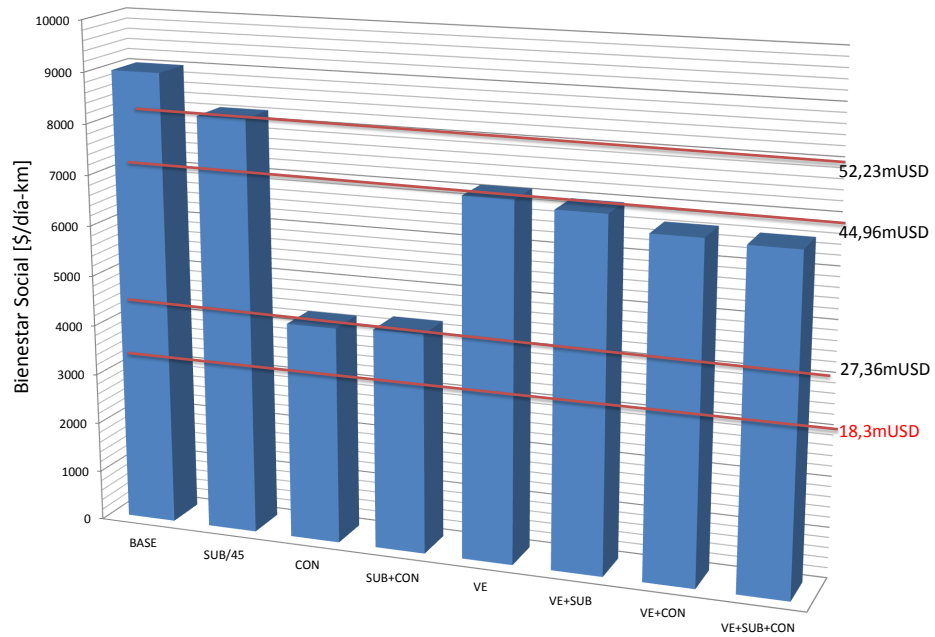


Figura 5.7: Aumento de BS, Inversión 16,67%, Capacidad Sistema Baja

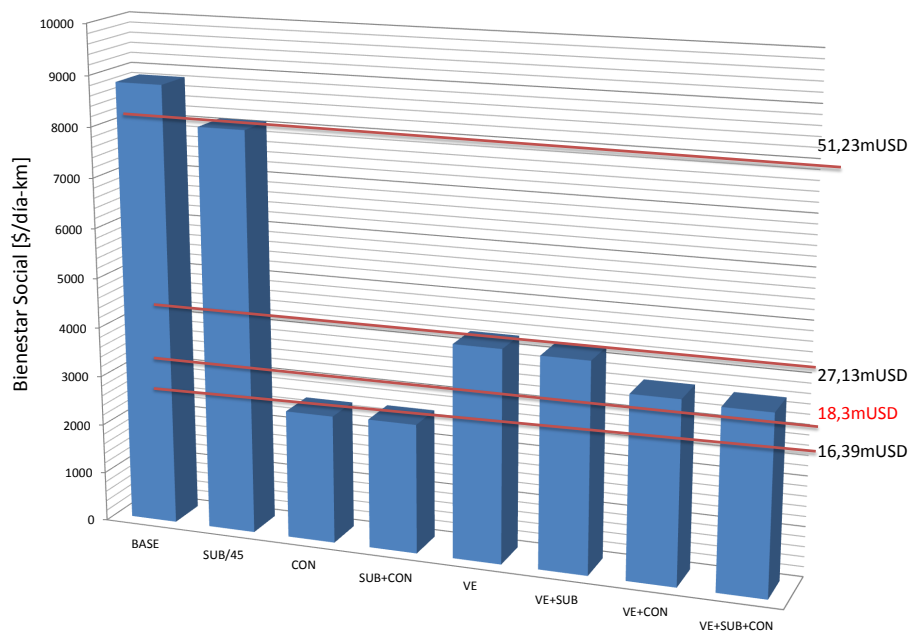


Figura 5.8: Aumento de BS, Inversión 16,67 %, Capacidad Sistema Media

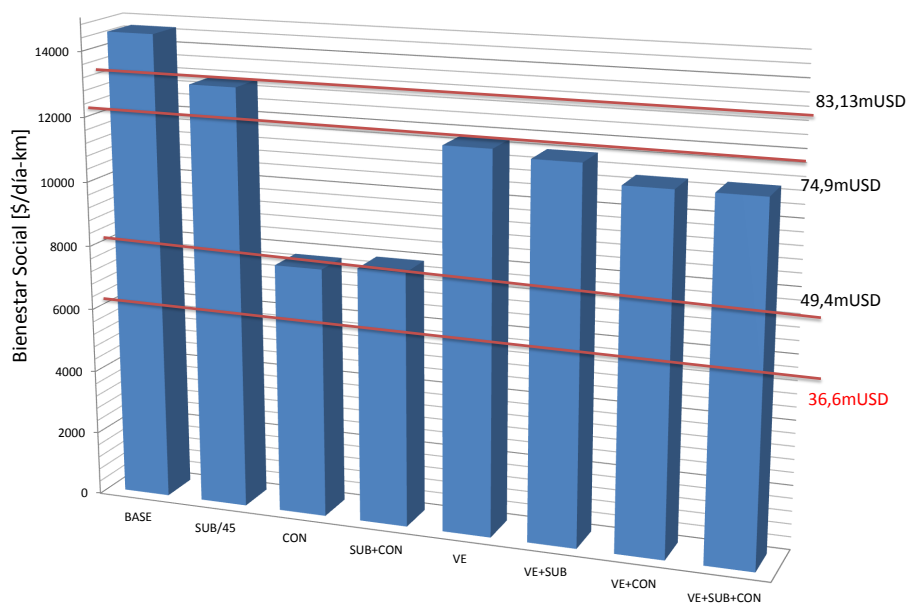


Figura 5.9: Aumento de BS, Inversión 33,33 %, Capacidad Sistema Baja

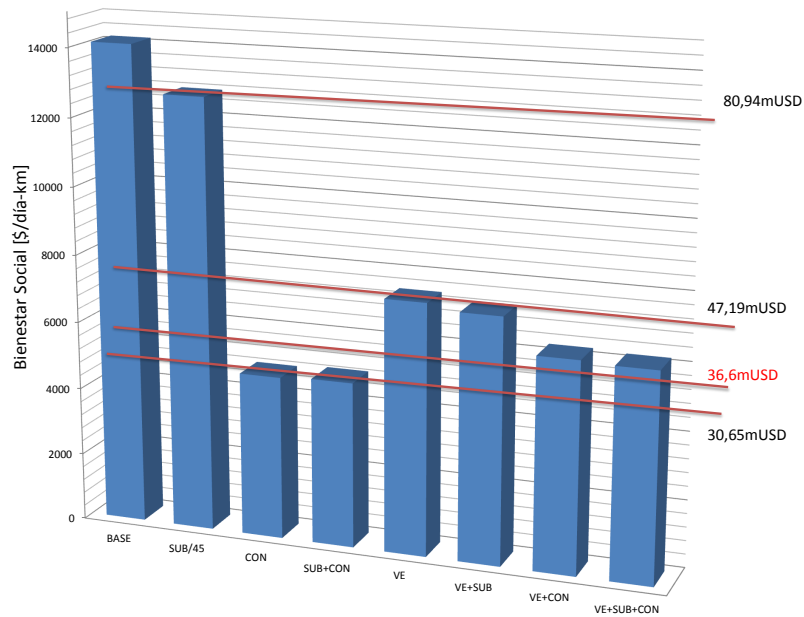


Figura 5.10: Aumento de BS, Inversión 33,33 %, Capacidad Sistema Media

Las figuras anteriores muestran los costos de expansión de capacidad comparado con un costo mayor (considerando alguna posible expropiación, remoción, mantención, entre otros) tal que no existe un aumento en el bienestar social en un escenario dado. En este sentido, estas figuras reafirman el hecho que ante escenarios más congestionados la expansión de capacidad es una alternativa significativa para disminuir la congestión tomando en cuenta el costo de inversión considerado. Ante escenarios con un nivel de congestión menor las mejores estrategias son políticas de gestión y de precios. De manera de tener una noción de la varianza del costo de inversión y de su implicancia en las conclusiones, se muestra en el siguiente cuadro los costos de construcción y ampliación por km, resultados de una investigación realizada por *Christopher Archer y Stephen Glaister* de diferentes carreteras urbanas y rurales de Gran Bretaña.

CAPÍTULO 5. Eficiencia y Sustitución de Políticas

<i>Investing in Roads: Pricing, Costs and New Capacity</i>											
Road Type	SCOTLAND	WALES	NORTH EAST	NORTH WEST	Yorkshire	Eastern	South West	South East	London	East Midlands	West Midlands
D4MNEW	43,67	41,93	51,16	51,16	51,16	49,94	54,46	56,38	No Info	43,67	43,67
D3MNEW	16,70	16,01	19,49	19,66	19,49	19,14	20,88	21,58	59,33	16,70	16,70
D3NEW	15,49	14,79	18,10	18,10	18,10	17,57	19,31	20,01	54,81	15,49	15,49
D2D3NEW	10,09	9,74	11,83	12,01	11,83	11,66	12,70	13,05	48,20	10,27	10,09
D2NEW	8,35	8,00	9,74	9,74	9,74	9,57	10,44	10,79	29,41	8,35	8,35
D2S2NEW	8,18	7,83	9,57	9,57	9,57	9,40	10,27	10,44	28,71	8,18	8,18
S2HA	2,09	2,09	2,44	2,44	2,44	2,44	2,61	2,78	7,31	2,09	2,09
S2LA	2,09	2,09	2,44	2,44	2,44	2,44	2,61	2,78	7,31	2,09	2,09
D4MWID	12,53	12,18	14,62	14,62	14,62	14,44	15,66	16,18	35,32	12,53	12,53
D3MWID	14,27	13,75	16,88	16,88	16,88	16,36	17,92	18,62	51,16	14,27	14,27
D3WID	7,13	6,96	8,35	8,35	8,35	8,18	9,05	9,22	25,58	7,13	7,13

Fuente: Department of Civil and Environmental Engineering Imperial College London, November 2006; Valores monetarios en Millones de dolares, US 2005.

Cuadro 5.3: Costos Construcción y uso del espacio por km

Capítulo 6

Conclusiones y Líneas Futuras de Investigación

6.1. Síntesis y conclusiones

En el presente trabajo se ha expuesto un análisis de los efectos que tiene sobre un sistema de transporte la adición de capacidad vial con el objetivo de disminuir la congestión urbana. En este análisis también se incluye el efecto de esta política de expansión en presencia de otras políticas urbanas como tarificación por congestión, subsidio al transporte público y vías exclusivas para buses. Basado en Basso y Silva [2014], esta tesis busca obtener resultados desde simulaciones con datos reales que intentan replicar las condiciones del sistema de transporte en Londres, aplicados a un modelo microeconómico. En cualquier tipo de estudio relacionado con expansión de capacidad, es implícito el análisis que se debe hacer sobre la paradoja de Downs-Thomson debido a su importancia y repercusión en la literatura. En este sentido, los argumentos empíricos y teóricos han inclinado la balanza hacia la aceptación de esta hipótesis en diferentes escenarios y restricciones. Aclarar si esta hipótesis es correcta o no, o más exactamente, en que circunstancias, es una descripción precisa de los resultados de una política de capacidad vial urbana, fundamental para las estrategias públicas urbanas y la calidad de vida en las ciudades.

Para comenzar el estudio de este trabajo, lo primero que se hace es una revisión bibliográfica de los diferentes planteamientos que se tienen para abordar las consecuencias que trae en un sistema una expansión de capacidad, con especial énfasis en las características de los modelos utilizados, supuestos adoptados y sus principales componentes. De esta revisión se concluyen tres ideas fundamentales:

- Un número significativo de investigaciones se sustentan en hechos empíricos en donde se ocupan avanzadas técnicas de econometría y estadística pero los supuestos de estos no necesariamente son iguales. La diferenciación recae en la agregación considerada y en el plazo que se consideran los cambios (cortos, mediano o largo) de un sistema.

- El círculo vicioso del transporte público y la demanda inducida son los sustentos teóricos de la paradoja de Downs-Thomson pero las condiciones y supuestos que se consideran en el sistema no son del todo realistas. Existen en este sentido, investigaciones que apoyan esta hipótesis como también algunas que la refutan argumentando que en un escenario post-expansión de capacidad, el tráfico efectivamente puede ser mayor o volver a ser a ser el mismo, convergiendo a un escenario peor al anterior o nuevamente a una misma escala de congestión.
- Los modelos analizados que integran la capacidad como variable en los planteamientos, no integran de manera conjunta todos los efectos que trae una alteración en un sistema de transporte. Para este efecto se debe considerar de manera conjunta separación de períodos, demanda elástica total, optimización de las variables de diseño del transporte público, efectos cruzados de congestión entre los modos disponibles, entre otros. En este sentido, existen por un lado estudios teóricos y por otro empíricos que estudian este problema pero escasas investigaciones consideran una combinación entre estos dos tipos de búsqueda.

Teniendo en cuenta esta revisión se procede a expandir el modelo microeconómico expuesto en Basso y Silva [2014] simulando escenarios que consideran una adición de capacidad vial en conjunto con un análisis de sensibilidad de variables y parámetros con el objetivo de determinar patrones de comportamiento ante la presencia de expansión de capacidad. En estas simulaciones se presentan complejidades matemáticas importantes las cuales al modificar el modelo se tienen que tener presentes. Existen adaptaciones para disminuir tiempos de resolución y consideraciones para la búsqueda de la solución óptima del problema de optimización con el programa mismo como el requerimiento de intervalos iniciales de las variables a optimizar en la exploración de las soluciones factibles. El detalle de mayores complejidades matemáticas presentes se encuentran en Silva Montalva [2010].

Para el comienzo del análisis de los efectos que tiene una política de expansión de capacidad se simulan diferentes escenarios en donde se obtienen un número significativo de resultados. Junto con esto, se obtienen resultados referente a la paradoja de Downs-Thomson los cuales se presentan a continuación:

1. Los supuestos en que se sustenta la paradoja de Downs-Thomson son: tráfico separado, demanda inelástica total, modelo de demanda con sustitutos perfectos y variables de diseño optimizadas. De este modo, en este trabajo se intenta replicar las condiciones para poder indagar las variables determinantes en la veracidad de esta paradoja. En este contexto se obtiene que el modelo de demanda y la función de congestión de paraderos adoptados son los elementos determinantes de la existencia de esta paradoja. En la gran mayoría de los escenarios simulados, considerando un modelo de demanda estocástico y distintas funciones de congestión de paraderos, se obtiene en el período Peak que con una expansión de capacidad de un tercio de la infraestructura existente los costos generalizados de viajar en transporte privado

disminuyen. En cuanto al transporte público, su efecto dependerá de la eficiencia del servicio público en los paraderos. Junto con esto se tiene que en el período Off-Peak, los usuarios de transporte privado siempre disminuyen sus costos generalizados de viajar, contrariamente a lo que ocurre con los usuarios de transporte público donde siempre aumentan sus costos generalizados en presencia de un aumento de capacidad vial.

2. En esta tesis se estudia la expansión de capacidad vial para los usuarios de transporte privado, siendo esto para el servicio público, una política con efectos indirectos. Al crear capacidad vial, la demanda inducida genera un déficit en los usuarios de transporte público lo que genera una nueva adaptación del servicio en función de la expansión. Tomando en cuenta esta conducta, bajo graduales expansiones de capacidad vial, se obtiene en la mayoría de los escenarios simulados que la curva de costo generalizado de los usuarios de transporte público es relativamente constante y siempre menor al costo generalizado de optar por el automóvil. En este contexto, simular estos mismos escenarios con una menor demanda entrega un comportamiento de esta curva similar por lo que se interpreta que el efecto del llamado efecto Mohring es poco relevante. Paralelamente, el costo generalizado de optar por el transporte privado es decreciente en todos los escenarios considerando un modelo de demanda estocástico.
3. De forma complementaria, en este trabajo se muestra que expandir la capacidad vial genera un escenario similar que considerar una reducción de la demanda total.
4. Los resultados muestran que la inversión en la calidad del transporte público genera importantes disminuciones en los tiempos de viaje de los modos disponibles (demostrado por los diferentes tipos de paraderos y vías exclusivas). En este contexto, estos resultados coinciden con lo expuesto en Kutzbach [2009] y Mogridge [1997], los cuales mediante un modelo de elección teórico y empírico respectivamente, exponen que la mejor opción para aumentar las velocidades es invertir en calidad del servicio de transporte público, variable la cual es determinante en la existencia de la paradoja de Downs-Thomson.

Adicionalmente, las simulaciones entregan resultados en términos de eficiencia del comportamiento del sistema bajo expansión de capacidad en presencia de distintas políticas urbanas y considerando un tráfico compartido, los cuales se detallan a continuación:

1. Este trabajo considera un análisis bajo el criterio de bienestar social, en donde si se considera una expansión de capacidad, esto incluye el costo de esta inversión. Esta última variable tiene una varianza importante en su estimación lo que genera que las conclusiones pueden estar subestimando este costo. Se encuentra que, si bien la expansión de capacidad vial mejora el bienestar social en ciertas condiciones, tiene un alcance en general limitado a ser elegido en un marco de análisis de costo-beneficio

estricto, el cual lo haría sólo cuando la congestión tanto para autos y buses es altamente significativa, y cuando los costos de inversión son relativamente bajos. El mensaje más importante en este contexto es que en una situación urbana altamente congestionada, la capacidad del sistema de transporte público, y en particular de su cuello de botella, los paraderos de buses, son el actor más importante. La mejora en este aspecto genera caminos donde la política de vías exclusivas, subsidio y tarificación por congestión son más efectivas que grandes expansiones de capacidad para disminuir la congestión.

2. La ciudad de Londres tiene la particularidad de tener un alto valor subjetivo del tiempo de viaje derivado de sus ingresos lo que se traduce en un alta partición modal del auto. En este contexto, la tarificación vial por si sola, es una política que disminuye el excedente total de los consumidores. Bajo este escenario, la aplicación de esta política es la más efectiva y la que genera más beneficios en términos de bienestar social (incluyendo la política de expansión de capacidad y considerando su costo) debido a la importante disminución del uso del automóvil, trasladando esta demanda al servicio público, donde bajo la optimización de sus variables genera un inmejorable escenario. La decisión de expandir la capacidad vial cuando se está en presencia de la política de tarificación por congestión se traduce en volver a un contexto original de atracción hacia el automóvil. Si bien existen pequeñas mejoras en algunas variables, el costo de esta gran inversión supera estos beneficios.
3. La política de vías exclusivas genera beneficios similares pero menores a los de una tarificación por congestión en las simulaciones. Esta política ve disminuido su beneficio cuando no se pueden generar las ventajas de tiempo de viaje para los usuarios de bus, lo que ocurre cuando la demora en los paraderos es muy alta. Esto puede suceder por un diseño del paradero que no es del todo eficiente y puede ocurrir también cuando la demanda en los paraderos es muy elevada. En ausencia de congestión todos los usuarios ven aumentado su excedente ya que la disminución de capacidad para los autos no genera reducciones de tiempo (como sí lo hace fuertemente cuando las demandas son altas) y ahora las ventajas de segregar el flujo en tiempos son para ambos modos ya que no existe la congestión cruzada. En presencia de expansión de capacidad, tiende a disminuir su positivo efecto debido al la alta partición modal del auto presente y al alto valor subjetivo del tiempo de viaje en este modo. Por otro lado, los resultados indican que ante una mejora gradual del sistema de paraderos del transporte público, la políticas de vías exclusivas comienza a tener mejores resultados y efectos positivos en el sistema que la aplicación de tarificación por congestión.
4. El subsidio óptimo es una política que tiene como resultado indirecto entregarle dinero indirectamente a la gente por viajar en bus, lo que se ve reflejado en la tarifa que se enfrentan por usar el servicio público. En la mayoría de los escenarios simulados,

el subsidio óptimo obtenido es de un 100 %, consecuente con los resultados obtenidos en Basso y Silva [2014], evidenciando en primer lugar que el subsidio óptimo no está acotado en estas condiciones y que los efectos en términos de bienestar social no son significativos. Si bien existe un aumento del bienestar social, este beneficio no es comparable con la aplicación de las otras políticas urbanas. Se sostiene que esta conclusión está condicionada por los parámetros asociados al sistema de transporte de la ciudad de Londres, lo cual no es posible generalizar.

5. La complementariedad de todas las políticas urbanas dependen directamente del nivel de congestión en que se encuentra el sistema. A medida que la congestión es alta, la complementariedad es más efectiva. Sumado a esto, ante un sistema importantemente descongestionado, la aplicación de una segunda política tiene efectos positivos leves e incluso puede llegar a ser en algunos casos contraproducente.

Finalmente, en la consideración de una expansión de capacidad, uno puede sin duda observar mejoras, algo que a primera vista podría prestar apoyo a los defensores del gran gasto en infraestructura urbana. Sin embargo, desde una perspectiva de análisis de bienestar social, esa inversión probablemente no sea la mejor política para alivianar la congestión urbana.

6.2. Líneas futuras de Investigación

Las líneas futuras de investigación de este trabajo tienen directa relación con levantar supuestos que han sido simplificados con el objetivo de acercar el modelo de una manera u otra más a la realidad para el estudio de los efectos de una expansión de capacidad. Uno de estos supuestos es que la demanda se encuentra distribuida uniformemente sobre el corredor, por lo tanto, estudiar efectos del desbalance espacial de la demanda acercaría al modelo a un comportamiento del sistema más real. Para este objetivo no es necesario estudiar todos los casos de diferentes distribuciones espaciales sino que se pueden fijar casos representativos y hacer el mismo análisis de este trabajo.

En los diferentes países donde se aplica la política de tarificación por congestión, su implementación considera una tarificación por tramos o cordones lo cual no es equivalente al primer mejor en donde existe una tarificación por kilómetro en todos los arcos. En este sentido es interesante complementar el modelo con redes simples con el objetivo de poder analizar cobrar solo en algunos arcos de la red. Para esta finalidad, incorporar efectos de red al modelo es necesario, al menos, considerar dos ejes que se intersecten y en este caso la distribución de los orígenes y destinos no puede ser únicamente sobre el corredor. Se debe incorporar la estructura de rutas como variable de decisión del planificador central y no se pueden ignorar los efectos de transbordos en los viajes.

La modelación del comportamiento del servicio de transporte público puede tener un mayor acercamiento de la realidad en dos importantes puntos. El primero considera el tiempo de viaje asociado al bus tomando en cuenta un tráfico mixto en donde la demora ocasionada del bus hacia el auto es asumida de manera simplista y lógica con lo esperable pero difiere de una modelación en donde estén función de las variables de diseño del transporte público, que es lo que se espera. En segundo lugar, se puede estudiar y modelar el escenario de dedicación exclusivas para buses considerando más de una pista ya que el potencial de esta política puede estar siendo subestimado.

El análisis de esta tesis incluye un estudio de las curvas de costos generalizados de los modos disponibles de forma discreta. De manera de tener un espectro mayor, es interesante poder analizar de forma continua el comportamiento del sistema frente a distintas condiciones.

El modelo considera sólo políticas urbanas que inducen que la partición modal del auto disminuya de alguna forma. Junto con esto, se considera sólo como externalidad negativa la congestión dejando de lado otras como accidentes, ruidos, contaminación, entre otros. Ante esto, una expansión de capacidad vial genera una sobrevaloración de sus efectos debido a que no se consideran estas externalidades por lo que es necesario estimar estos efectos e incluirlos en la modelación.

Los resultados de esta tesis indican una importante significancia del sistema de paraderos en los niveles de congestión. De esta manera es necesario estudiar la eficiencia de invertir en paraderos como una nueva opción de política urbana de manera de comparar y estudiar posibles complementos con otras estrategias para reducir los niveles de congestión.

El trabajo realizado en esta tesis obtiene como resultado un equilibrio parcial de corto plazo del sistema de transporte bajo una expansión de capacidad. Es interesante poder extender este análisis a un equilibrio general de largo plazo donde se incluyan variables de localización de hogares, actividades y del comportamiento de la economía en los rubros asociados, de manera de poder comparar los resultados con otras investigaciones como Duranton y Turner [2011].

Finalmente, de manera de obtener un espectro de resultados y notar comportamientos generales, es interesante aplicar estas simulaciones con otra ciudad y comparar con la realidad teniendo en cuenta los parámetros que se necesitan en el modelo con el objetivo de robustecer las conclusiones.

Bibliografía

- Afimeimounga, Heti, Solomon, Wiremu, y Ziedins, Ilze. The downs-thomson paradox: existence, uniqueness and stability of user equilibria. *Queueing Systems*, 49(3-4):321–334, 2005.
- Basso, Leonardo J y Jara-Díaz, Sergio R. Integrating congestion pricing, transit subsidies and mode choice. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(6):890–900, 2012.
- Basso, Leonardo J y Silva, Hugo E. Efficiency and substitutability of transit subsidies and other urban policies. *American Economic Journal: Economic Policy*, 6(4):1–33, 2014.
- Ben-Akiva, M.E. *Structure of passenger travel demand models*. Massachusetts Institute of Technology, 1973.
- David, Quentin y Foucart, Renaud. Modal choice and optimal congestion. *Regional science and urban economics*, 48:12–20, 2014.
- Doll, Claus, van Essen, Huib, et al. Road infrastructure cost and revenue in europe. *Internalisation Measures and Policies for all external cost of Transport (IMPACT) P Deliverable*, 2, 2008.
- Downs, Anthony. The law of peak-hour expressway congestion. *Traffic Quarterly*, 16: 393–409, 1962.
- Downs, Anthony. *Still stuck in traffic: coping with peak-hour traffic congestion*. Brookings Institution Press, 2005.
- DULAC, John. Global land transport infrastructure requirements. http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TransportInfrastructureInsights_FINAL_WEB.pdf. *Acesso em*, 20:2014, 2013.
- Duranton, Gilles y Turner, Matthew A. The fundamental law of road congestion: Evidence from us cities. *The American Economic Review*, pages 2616–2652, 2011.
- Fernandez, Rodrigo y Planzer, Rosemarie. On the capacity of bus transit systems. *Transport Reviews*, 22(3):267–293, 2002.

- Guo, Pengfei, Lindsey, Robin, y Zhang, Zhe George. On the downs-thomson paradox in a self-financing two-tier queuing system. *Manufacturing & Service Operations Management*, 16(2):315–322, 2014.
- Hsu, Wen-Tai y Zhang, Hongliang. The fundamental law of highway congestion revisited: Evidence from national expressways in japan. *Journal of Urban Economics*, 81:65–76, 2014.
- Infrastructure, UK. Infrastructure cost review: Measuring and improving delivery, 2014.
- Jara-Díaz, Sergio y Tirachini, Alejandro. Urban bus transport: open all doors for boarding. *Journal of Transport Economics and Policy (JTEP)*, 47(1):91–106, 2013.
- Jara-Díaz, Sergio R y Gschwender, Antonio. The effect of financial constraints on the optimal design of public transport services. *Transportation*, 36(1):65–75, 2009.
- Kutzbach, Mark J. Motorization in developing countries: Causes, consequences, and effectiveness of policy options. *Journal of Urban Economics*, 65(2):154–166, 2009.
- Mogridge, Martin JH. The self-defeating nature of urban road capacity policy: A review of theories, disputes and available evidence. *Transport Policy*, 4(1):5–23, 1997.
- Mohring, Herbert. The benefits of reserved bus lanes, mass transit subsidies, and marginal cost pricing in alleviating traffic congestion. *Current issues in urban economics*, pages 165–195, 1979.
- Parry, I. y Small, Kenneth A. Should urban transit be reduced? *American Economic Review*, 99(3):700–724, 2009.
- Policy, EU DG Regional. Guide to cost benefit analysis of investment projects, 2008.
- Romilly, Peter. Welfare evaluation with a road capacity constraint. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38(4):287–303, 2004.
- Silva Montalva, Hugo Emilio. *Análisis microeconómico de políticas para combatir la congestión vial*. 2010.
- Thomson, John Michael. *Great Cities and Their Traffic*. Gollancz, London, (Peregrine edition p. 165), 1977.
- Tirachini, Alejandro. The economics and engineering of bus stops: Spacing, design and congestion. *Transportation Research Part A*, 59:37–57, 2014.
- Verhoef, Erik T y Small, Kenneth A. Product differentiation on roads: constrained congestion pricing with heterogeneous users. *Journal of transport economics and policy*, pages 127–156, 2004.

Zhang, Fangni, Yang, Hai, y Liu, Wei. Welfare implications of highway capacity expansion with responsive transit operator when the two modes are imperfect substitutes. In *Proceedings of the ITEA Annual Conference on Transportation Economics (Kuhmo Nectar) 2014, Toulouse, France*, 2014.

Apéndice A

Anexos

PARÁMETROS

Generales

a=1.41; (Tasa de ocupación de los autos)
L=9.6; (Distancia de viaje de los pasajeros [km])
Vcam=3.6; (Velocidad de caminata [km/hr])
hpeak=6; (Duración período Peak [hr])
hoffpeak=14; (Duración período Off-Peak [hr])
Q=4800; (Capacidad vial Base [veh/hr])
Yday=10000; (Demanda Total)
coa=0.98109; (Costo operacional automóvil)

Costo Operacional de Buses

CC0=5.920495868; (* Gb(k) intercept *)
CC1=0.024617769; (* Gb(k) slope *)
CV0=0.108842975; (* Gv(k) intercept *)
CV1=0.002727273; (* Gv(k) slope *)
ampfactor=6.05;

Tiempos de viaje

tp=15/3600; (Tiempo que pierde un vehículo por detenerse en un paradero[hr])
tsb=2.5/3600; (Tiempo que demora un pasajero en subir o bajar del bus [hr])
bbpr=4 (BPR)
abpr=2(BPR)

Función de bienestar social

DLcost= 60.917; (Costo Operacional vías exclusivas)
etacon=0.45; (Costo tarificación por congestión)
mcpf=1.15; (Costo marginal de los fondos públicos)

Modelo de Demanda

θ_{0ap} =0; (Constante Auto Peak)
 θ_{0aop} =-0.562616324; (Constante Auto Off-Peak)
 θ_{0bp} =-1.557973685; (Constante Bus Peak)
 θ_{0bop} =-2.54493749; (Constante Bus Off-Peak)

$\theta O = -9.12722634$; (Constante No viajar)
 $\theta TGap = -2.28728$; (Utilidad marginal del tiempo, Auto Peak)
 $\theta TGapop = -1.82983$; (Utilidad marginal del tiempo, Auto Off-Peak)
 $\theta TGbp = -2.74474$; (Utilidad marginal del tiempo, Bus Peak)
 $\theta TGbop = -2.19579$; (Utilidad marginal del tiempo, Bus Off-Peak)
 $\theta costo = -0.23936$; (Utilidad marginal del costo)
 $\mu = 0.25$; (Parámetro de escala logit anidado)

FUNCIONES

Escenarios Sin Subsidio

```

f=.;fop=.;p=.;Pa=0;Paop=0;Pb=.;Pbop=.;YA=.;YB=.;YAop=.;YBop=.;k=.;
MAX=FindMaximum[{SW[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,YB,YBop,k],1<f<100&&1<fop<90&&2<p<=
5&&20<YA<800&&3<YB<450&&3<YAop<600&&3<YBop<300&&0<=Pb<5&&0<=Pbop<5&&(Pb*YB*hpeak+P-
bop*YBop*hoffpeak)==CostF[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,YB,YBop,k]&&YA*hpeak==Yday*Pp[f,fop,p,-
Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,YB,YBop,k]*Prap[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,YB,YBop,k]&&
YB*hpeak==Yday*Pp[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,YB,YBop,k]*Prbp[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,
YB,YBop,k]&&
YAop*hoffpeak==Yday*Pop[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,YB,YBop,k]*Praop[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,Y
A,YAop,YB,YBop,k]&&
YBop*hoffpeak==Yday*Pop[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,YB,YBop,k]*Prbop[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,Y
A,YAop,YB,YBop,k]&&Pb==Pbop&&(YB*L)/f<=k&&(YBop*L)/fop<=k&&f<=QP[f,p,Pa,Pb,YA,YB]&&f<=QP[fop,p,-
Paop,Pbop,YAop,YBop]},{f,30},{fop,10},{p,3},{Pb,1},{Pbop,1},{YA,500},{YB,200},{YAop,200},{YBop,50},{k,150}
},MaxIterations->500]
f1=f/.MAX[[2]];
f1op=fop/.MAX[[2]];
p1=p/.MAX[[2]];
Pa1=0;
Pa1op=0;
Pb1=Pb/.MAX[[2]];
Pb1op=Pbop/.MAX[[2]];
YA1=YA/.MAX[[2]];
YA1op=YAop/.MAX[[2]];
YB1=YB/.MAX[[2]];
YB1op=YBop/.MAX[[2]];
k1=k/.MAX[[2]];
SWref=MAX[[1]];
Pshare=(YA1+YB1)*hpeak/Yday;
  
```

```

OPshare=(YA1op+YB1op)*hoffpeak/Yday;
NTshare=1-Pshare-OPshare;
CPshare=YA1/(YA1+YB1);
BPshare=YB1/(YA1+YB1);
COPshare=YA1op/(YA1op+YB1op);
BOPshare=YB1op/(YA1op+YB1op);
VelAp=1/ta[f1,p1,Pa1,Pb1,YA1,YB1,k1];
VelBp=1/tb[f1,p1,Pa1,Pb1,YA1,YB1,k1];
VelAop=1/ta[f1op,p1,Pa1op,Pb1op,YA1op,YB1op,k1];
VelBop=1/tb[f1op,p1,Pa1op,Pb1op,YA1op,YB1op,k1];
bussize=k1;

```

Escenarios Con Subsidio

```

submax=100;
limit=submax/5+1;
f1=Table[-50,{j,limit}];f1op=Table[-50,{j,limit}];p1=Table[-50,{j,limit}];Pb1=Table[-50,{j,limit}];Pb1op=Table[-50,{j,limit}];Pa1=Table[-50,{j,limit}];Pa1op=Table[-50,{j,limit}];YA1=Table[-50,{j,limit}];YA1op=Table[-50,{j,limit}];YB1=Table[-50,{j,limit}];YB1op=Table[-50,{j,limit}];bussize=Table[-50,{j,limit}];

```

```

Pshare=Table[-50,{j,limit}];OPshare=Table[-50,{j,limit}];NTshare=Table[-50,{j,limit}];
CPshare=Table[-50,{j,limit}];BPshare=Table[-50,{j,limit}];COPshare=Table[-50,{j,limit}];BOPshare=Table[-50,{j,limit}];
VelAp=Table[-50,{j,limit}];VelBp=Table[-50,{j,limit}];VelAop=Table[-50,{j,limit}];VelBop=Table[-50,{j,limit}];
SW1=Table[-50,{j,limit}];CS1=Table[-50,{j,limit}];
Pa=0;cont=1;sub=Table[{j,0,submax,5}];

```

```

For[j=0,i<(submax+1),i=i+5,
If[cont==1,f1[[cont]]=25,f1[[cont]]=f1[[cont-1]];
If[cont==1,f1op[[cont]]=12,f1op[[cont]]=f1op[[cont-1]];
If[cont==1,p1[[cont]]=2.5,p1[[cont]]=p1[[cont-1]];
If[cont==1,Pb1[[cont]]=1,Pb1[[cont]]=Pb1[[cont-1]];
If[cont==1,Pb1op[[cont]]=1,Pb1op[[cont]]=Pb1op[[cont-1]];
If[cont==1,YA1[[cont]]=550,YA1[[cont]]=YA1[[cont-1]];
If[cont==1,YB1[[cont]]=150,YB1[[cont]]=YB1[[cont-1]];
If[cont==1,YA1op[[cont]]=300,YA1op[[cont]]=YA1op[[cont-1]];
If[cont==1,YB1op[[cont]]=80,YB1op[[cont]]=YB1op[[cont-1]];
If[cont==1,bussize[[cont]]=100,bussize[[cont]]=bussize[[cont-1]];

```

```

f=.;fop=.;p=.;Pa=0;Paop=0;Pb=.;Pbop=.;YA=.;YB=.;YAop=.;YBop=.;k=.;

```

```

If[j<submax,
FM=FindMaximum[{SW[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,YB,YBop,k],10<f<80&&3<fop<50&&2<p<=5&&20<YA<800&&3<YB<450&&3<YAop<600&&3<YBop<300&&0<=Pb<3&&0<=Pbop<3&&(Pb*YB*hpeak+Pbop*YBop*hoffpeak)}=(1-i/100)*CostF[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,YB,YBop,k]&&YA*hpeak==Yday*Pp[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,YB,YBop,k]*Prap[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,YB,YBop,k]&&YB*hpeak==Yday*Pp[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,YB,YBop,k]*Prbp[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,

```

```

YB,YBop,k]&&
YAop*hoffpeak==Yday*Pop[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,YB,YBop,k]*Praop[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,Y
A,YAop,YB,YBop,k]&&
YBop*hoffpeak==Yday*Pop[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,YB,YBop,k]*Prbop[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,Y
A,YAop,YB,YBop,k]&&Pb==Pbop&&(YB*L)/f<=k&&(YBop*L)/fop<=k&&f<=QP[f,p,Pa,Pb,YA,YB]&&f<=QP[fop,p,-
Paop,Pbop,YAop,YBop]},{f,f1[[cont]]},{fop,f1op[[cont]]},{p,p1[[cont]]},{Pb,Pb1[[cont]]},{Pbop,Pb1op[[cont]]},{YA,
YA1[[cont]]},{YB,YB1[[cont]]},{YAop,YA1op[[cont]]},{YBop,YB1op[[cont]]},{k,bussize[[cont]]},MaxIterations→
500];
Pb1[[cont]]=Pb/.FM[[2]];
Pb1op[[cont]]=Pbop/.FM[[2]];
,
Pb=0;Pbop=0;
FM=FindMaximum[{SW[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,YB,YBop,k],10<f<80&&3<fop<50&&2<p<
5&&20<YA<800&&3<YB<450&&3<YAop<600&&3<YBop<300&&0<=Pb<3&&0<=Pbop<3&&(Pb*YB*hpeak+P-
bop*YBop*hoffpeak)=(1-i/100)*CostF[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,YB,YBop,k]&&YA*hpeak==Yday*P-
p[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,YB,YBop,k]*Prap[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,YB,YBop,k]&&
YB*hpeak==Yday*Pp[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,YB,YBop,k]*Prbp[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,
YB,YBop,k]&&
YAop*hoffpeak==Yday*Pop[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,YB,YBop,k]*Praop[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,Y
A,YAop,YB,YBop,k]&&
YBop*hoffpeak==Yday*Pop[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,YA,YAop,YB,YBop,k]*Prbop[f,fop,p,Pa,Paop,Pb,Pbop,Y
A,YAop,YB,YBop,k]&&Pb==Pbop&&(YB*L)/f<=k&&(YBop*L)/fop<=k&&f<=QP[f,p,Pa,Pb,YA,YB]&&f<=QP[fop,p,-
Paop,Pbop,YAop,YBop]},{f,f1[[cont]]},{fop,f1op[[cont]]},{p,p1[[cont]]},{YA,YA1[[cont]]},{YB,YB1[[cont]]},{YAop,Y
A1op[[cont]]},{YBop,YB1op[[cont]]},{k,bussize[[cont]]},MaxIterations→500];
Pb1[[cont]]=0;
Pb1op[[cont]]=0;
];
Print[FM];
f1[[cont]]=f/.FM[[2]];
f1op[[cont]]=fop/.FM[[2]];
p1[[cont]]=p/.FM[[2]];
Pa1[[cont]]=0;
Pa1op[[cont]]=0;
YA1[[cont]]=YA/.FM[[2]];
YA1op[[cont]]=YAop/.FM[[2]];
YB1[[cont]]=YB/.FM[[2]];
YB1op[[cont]]=YBop/.FM[[2]];
bussize[[cont]]=k/.FM[[2]];
SW1[[cont]]=FM[[1]];
Pshare[[cont]]=(YA1[[cont]]+YB1)[[cont]]*hpeak/Yday;
OPshare[[cont]]=(YA1op[[cont]]+YB1op[[cont]])*hoffpeak/Yday;
NTshare[[cont]]=1-Pshare[[cont]]-OPshare[[cont]];
CPshare[[cont]]=YA1[[cont]]/(YA1[[cont]]+YB1[[cont]]);
BPshare[[cont]]=YB1[[cont]]/(YA1[[cont]]+YB1[[cont]]);
COPshare[[cont]]=YA1op[[cont]]/(YA1op[[cont]]+YB1op[[cont]]);
BOPshare[[cont]]=YB1op[[cont]]/(YA1op[[cont]]+YB1op[[cont]]);
VelAp[[cont]]=1/ta[f1[[cont]],p1[[cont]],Pa1[[cont]],Pb1[[cont]],YA1[[cont]],YB1[[cont]],bussize[[cont]]];
VelBp[[cont]]=1/tb[f1[[cont]],p1[[cont]],Pa1[[cont]],Pb1[[cont]],YA1[[cont]],YB1[[cont]],bussize[[cont]]];

```

```

VelAop[[cont]]=1/ta[f1op[[cont]],p1[[cont]],Pa1op[[cont]],Pb1op[[cont]],YA1op[[cont]],YB1op[[cont]],bussize[[cont
]];
VelBop[[cont]]=1/tb[f1op[[cont]],p1[[cont]],Pa1op[[cont]],Pb1op[[cont]],YA1op[[cont]],YB1op[[cont]],bussize[[cont
]];
CS1[[cont]]=CS[f1[[cont]],f1op[[cont]],p1[[cont]],Pa1[[cont]],Pa1op[[cont]],Pb1[[cont]],Pb1op[[cont]],YA1[[cont]],
YA1op[[cont]],YB1[[cont]],YB1op[[cont]],bussize[[cont]];
cont++;
]

```

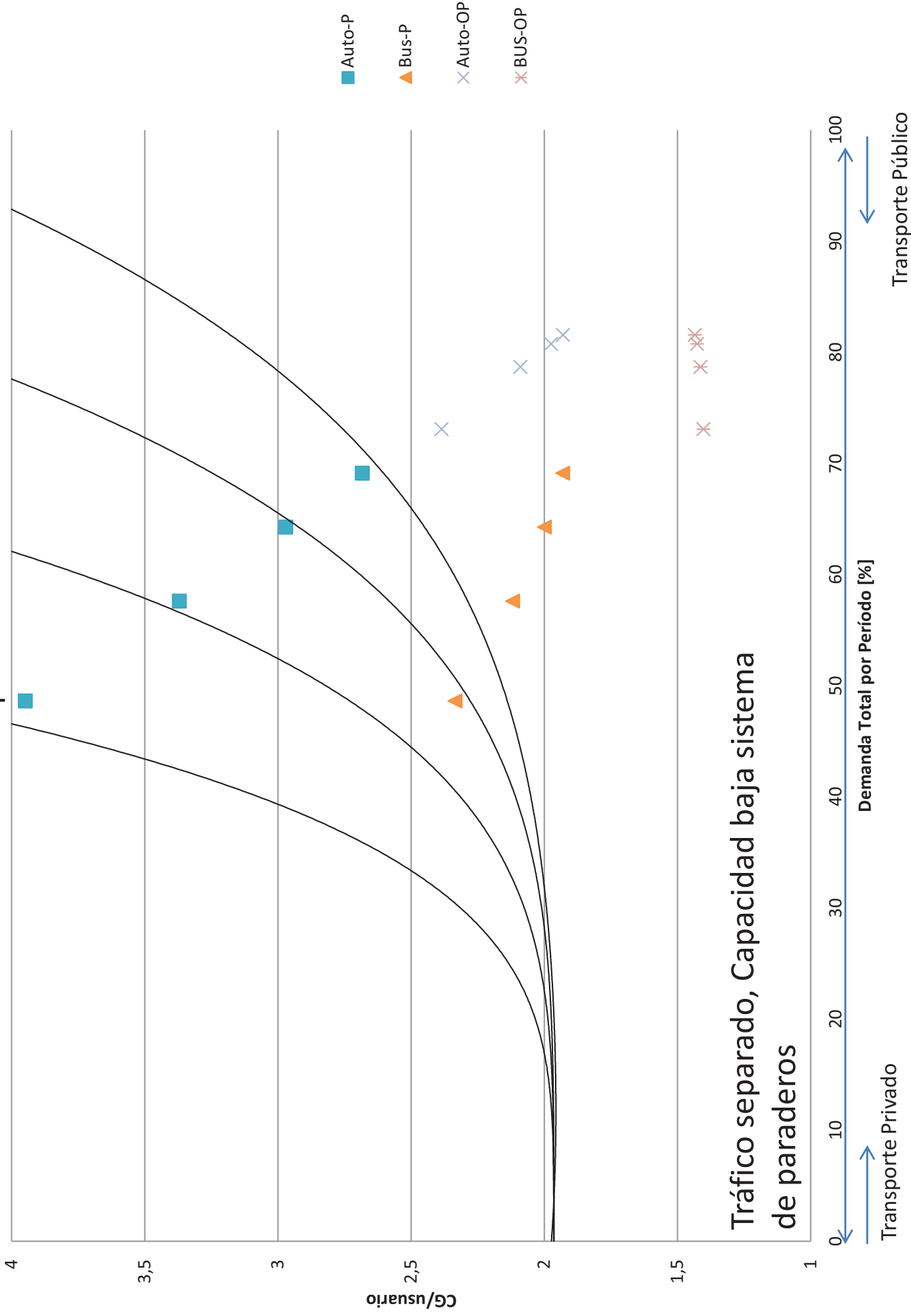
Extensiones

```

tp = 6 / 3600;
buslength = 12;
berths = 2;
od1 = 1;
odall = 0;
paycash = 0;
paymagnetic = 1;
paycard = 0;
payoffboard = 0;
BerthN = {  $\frac{(\text{berths}-2) * (\text{berths}-3) * (\text{berths}-4)}{-6}$ ,  $\frac{(\text{berths}-1) * (\text{berths}-3) * (\text{berths}-4)}{2}$ ,
 $\frac{(\text{berths}-1) * (\text{berths}-2) * (\text{berths}-4)}{-2}$ ,  $\frac{(\text{berths}-1) * (\text{berths}-2) * (\text{berths}-3)}{6}$  };
BusL = {  $\frac{1}{-280}$  (buslength - 12) * (buslength - 15) * (buslength - 18),
 $\frac{1}{72}$  (buslength - 8) * (buslength - 15) * (buslength - 18),
 $\frac{1}{-63}$  (buslength - 8) * (buslength - 12) * (buslength - 18),
 $\frac{1}{180}$  (buslength - 8) * (buslength - 12) * (buslength - 15) };
DoorN = {BusL[[1]], BusL[[2]], BusL[[3]] + BusL[[4]]};
tsbM = Import[
  "C:\\Users\\Chona\\Desktop\\Dropbox\\Tesis\\Afterpresentation\\3periodos\\
  parameters.xlsx",
  {"Data", 2, {8, 9, 10}, {3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10}}];
OpenDoors = {od1, od1, od1, od1, odall, odall, odall, odall};
Payment = {paycash, paymagnetic, paycard,
  payoffboard, paycash, paymagnetic, paycard, payoffboard};
tsb = Dot[DoorN, (tsbM * {OpenDoors, OpenDoors, OpenDoors}), Payment];
tad[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_, k_, η_] :=  $\frac{0.0000643}{(0.01666 * (1 + \text{abpr}((b[k] * f) / (\eta * Q))^{\text{bbpr}}))}$ 
td[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] := (YB * tsb / f) / p + tp * 3600;
tq[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] := (0.001 * (-2.952 + 0.061 * buslength +
  (2.185 - 1.903 * BerthN[[2]] - 2.044 * BerthN[[3]]) * td[f, p, Pa, Pb, YA, YB]) *
  Exp[0.001 * f * (23.089 + 0.361 * buslength + (1.807 - 0.374 * BerthN[[2]] -
    0.627 * BerthN[[3]]) * td[f, p, Pa, Pb, YA, YB]]) / 3600;
tb[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_, k_, η_] :=  $\left(0.01666 * \left(1 + \text{abpr}\left(\frac{b[k] * f}{\eta * Q}\right)^{\text{bbpr}}\right)\right) +$ 
  (td[f, p, Pa, Pb, YA, YB] / 3600 +
  tq[f, p, Pa, Pb, YA, YB] + tad[f, p, Pa, Pb, YA, YB, k, η]) * p;

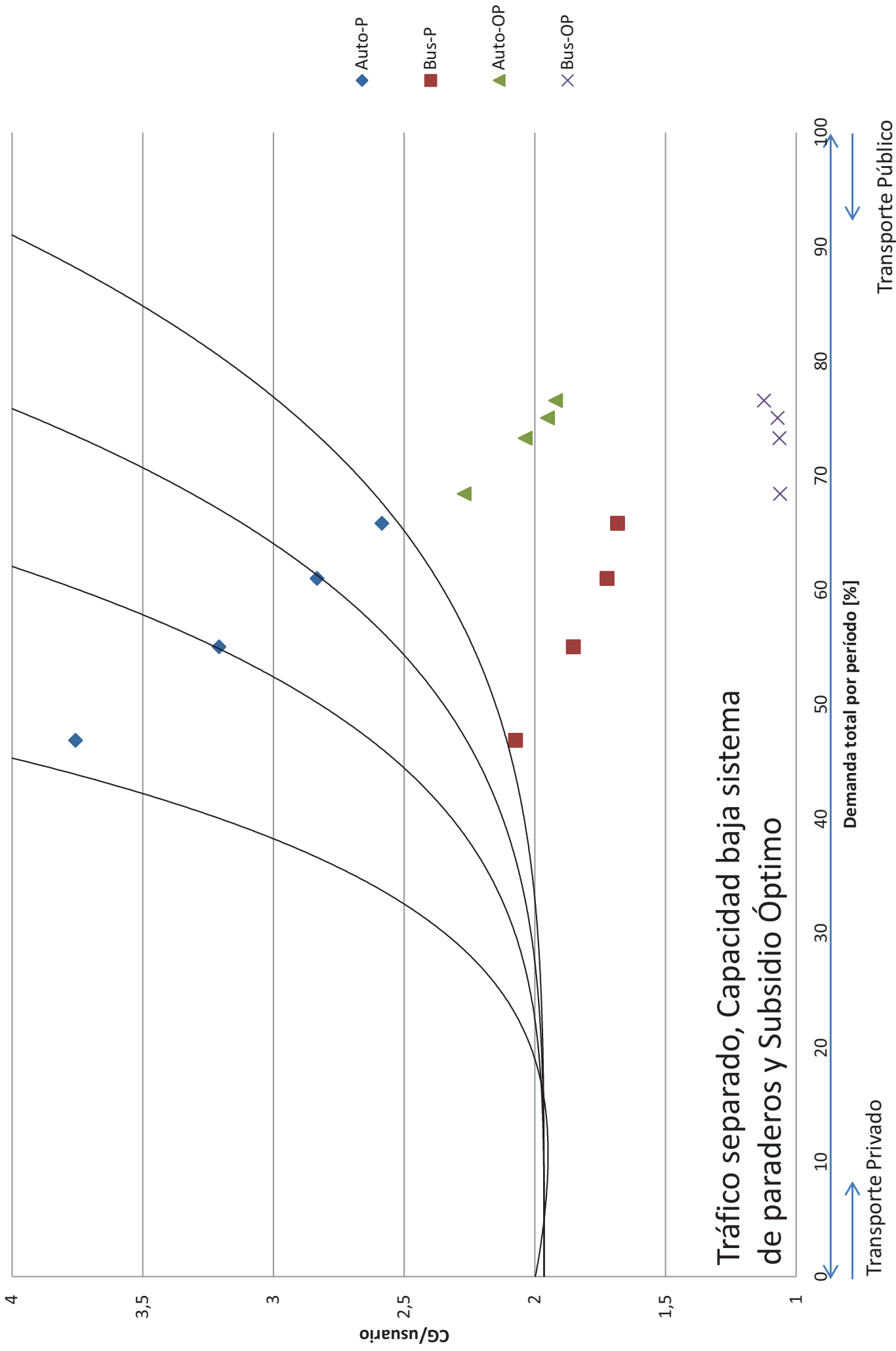
```

Costos Generalizados y Distribución modal para distintas Capacidades Viales



Tráfico separado, Capacidad baja sistema de paraderos

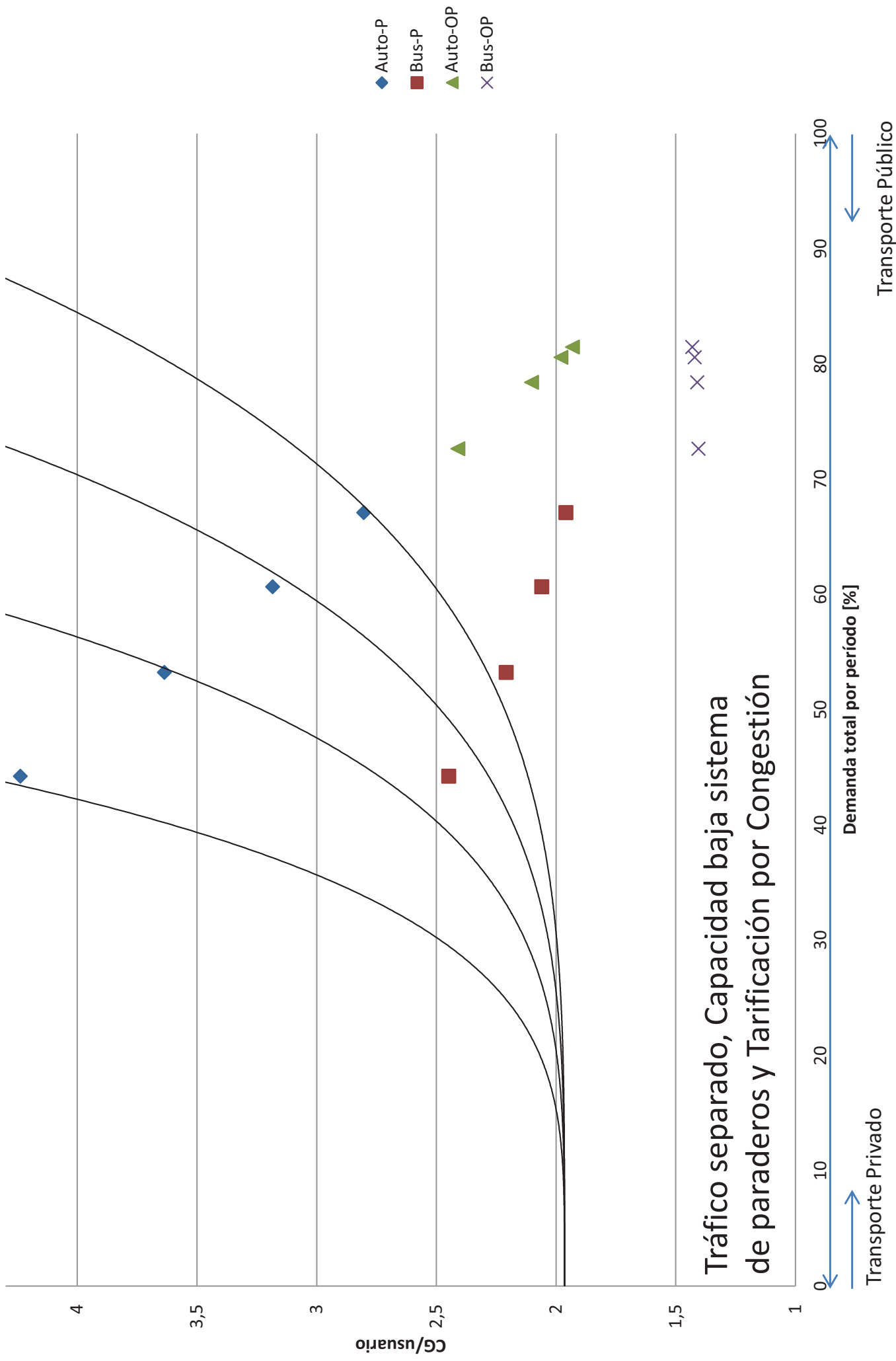
Costos Generalizados y Distribución modal para distintas Capacidades Viales



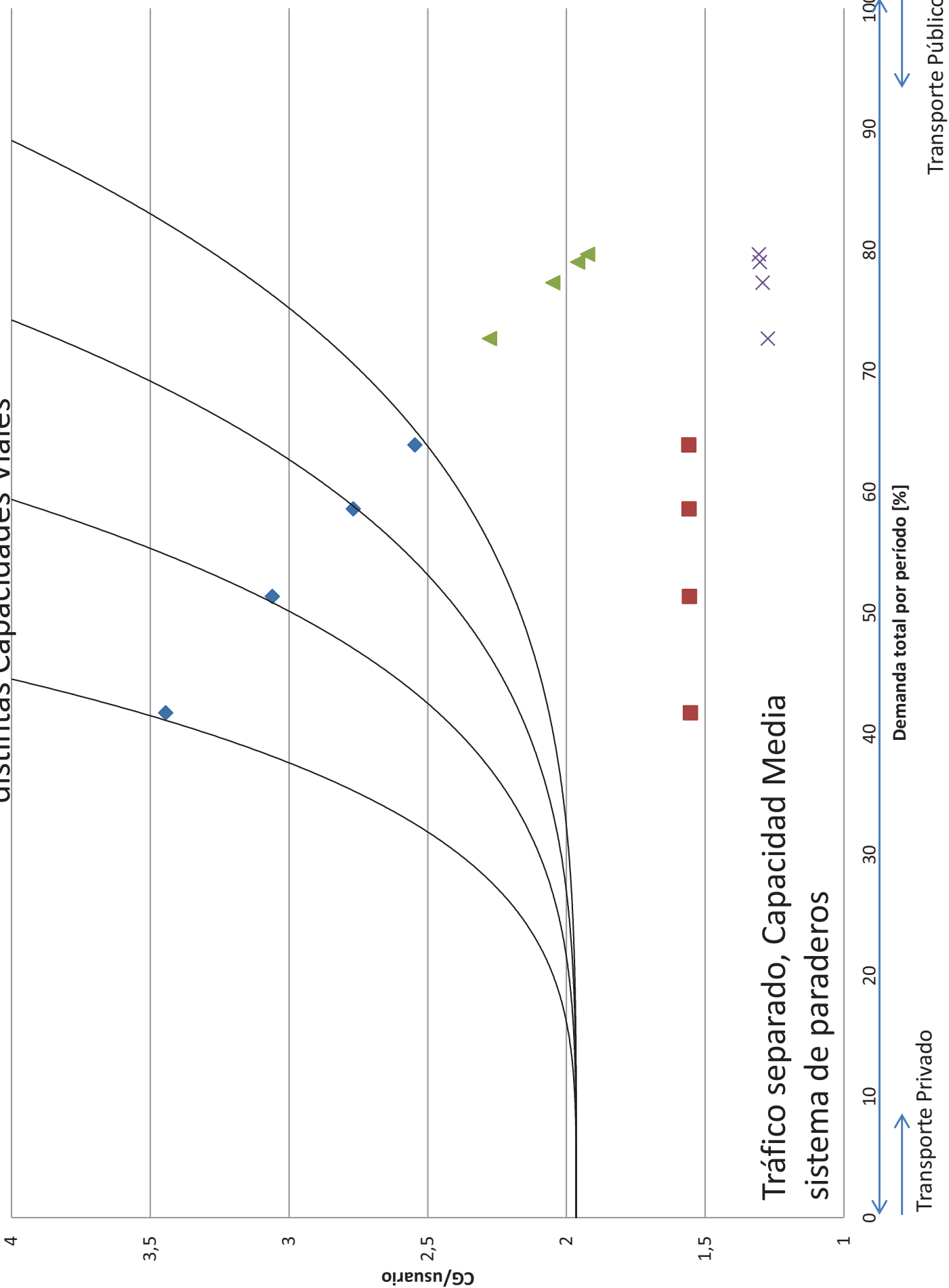
Tráfico separado, Capacidad baja sistema de paraderos y Subsidio Óptimo

Transporte Privado → ← Transporte Público

Costos Generalizados y Distribución modal para distintas Capacidades Viales



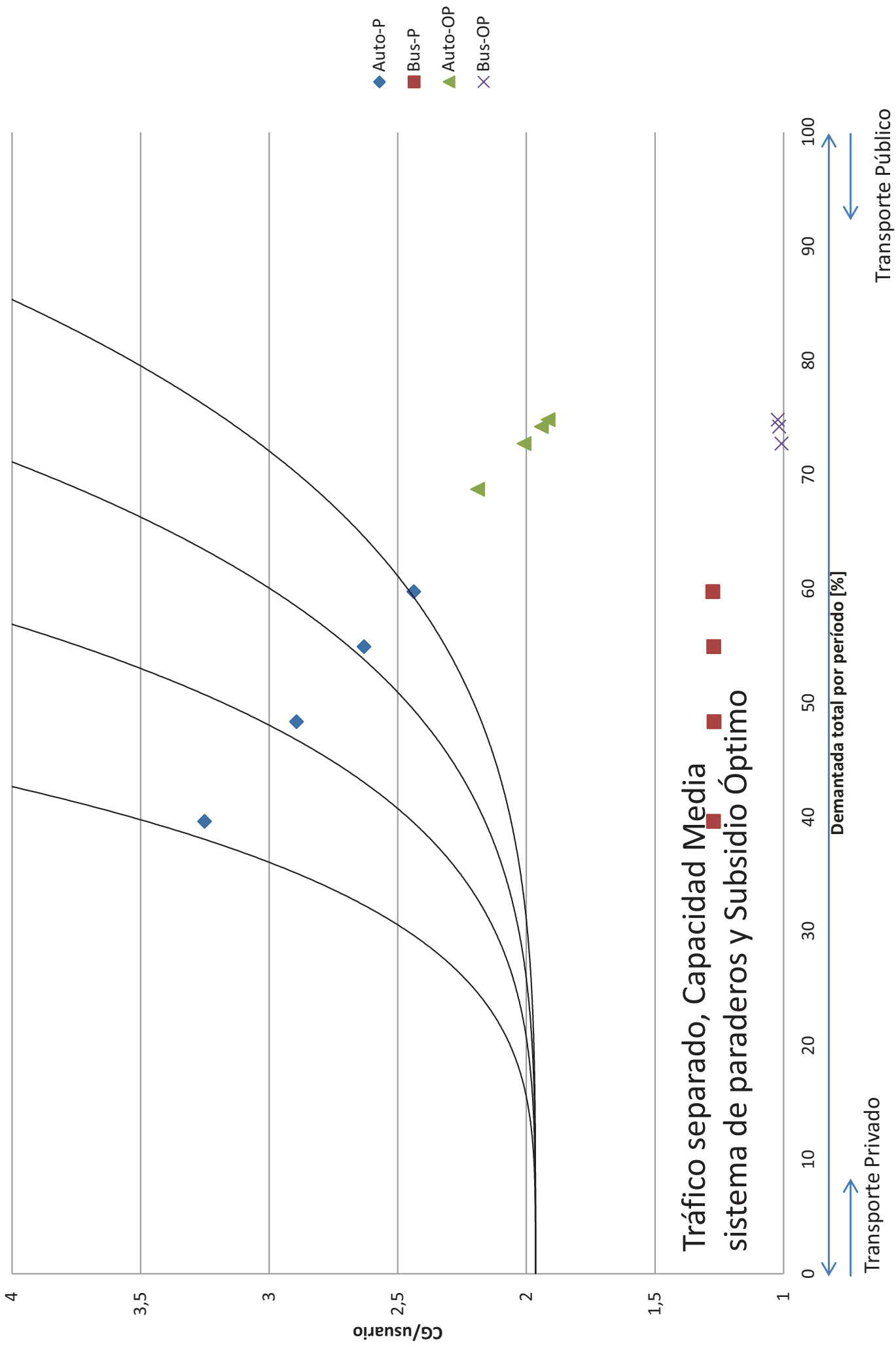
Costos Generalizados y Distribución modal para distintas Capacidades Viales



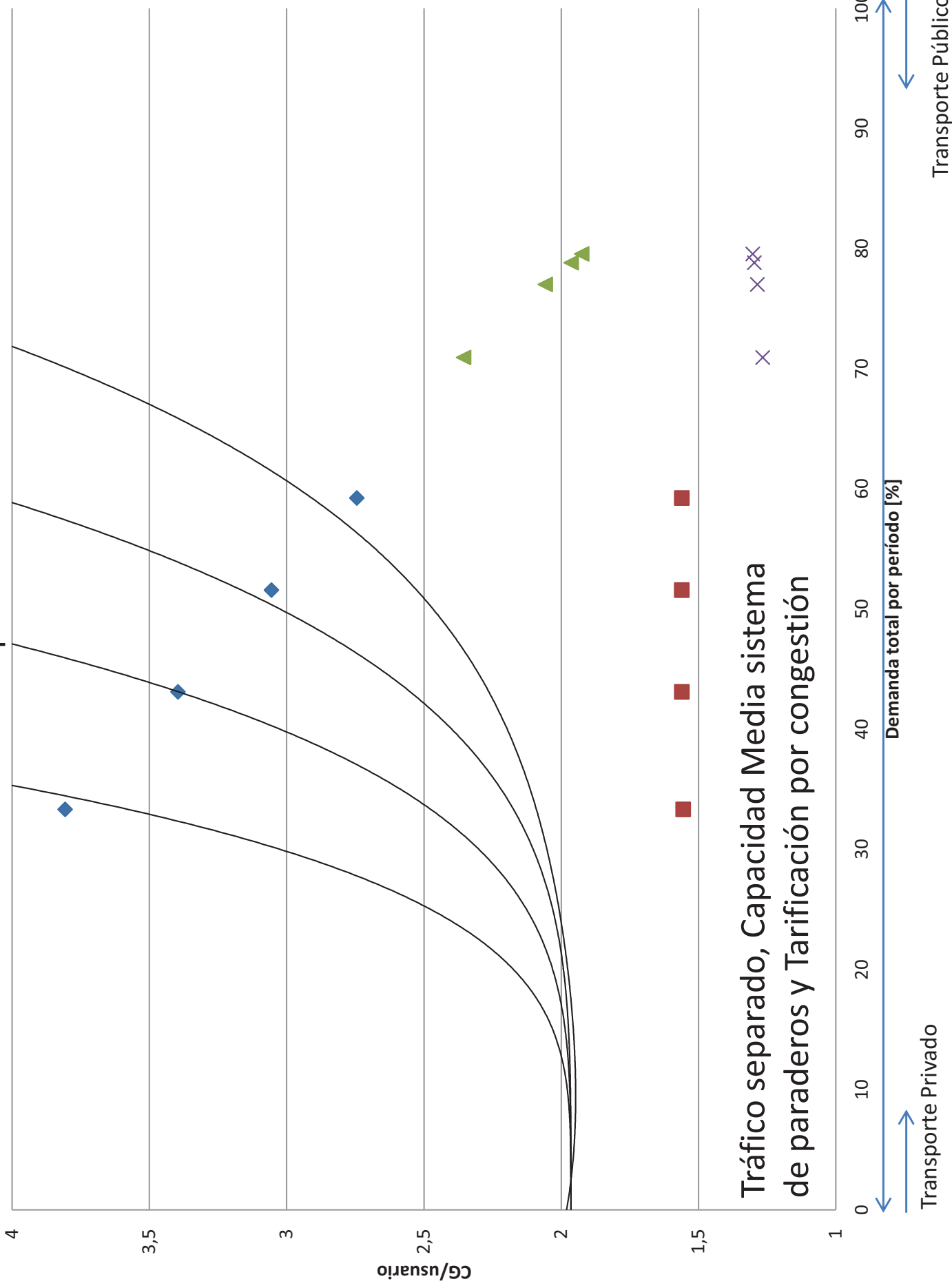
Tráfico separado, Capacidad Media sistema de paraderos

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
Demanda total por periodo [%]
Transporte Privado ← → Transporte Público

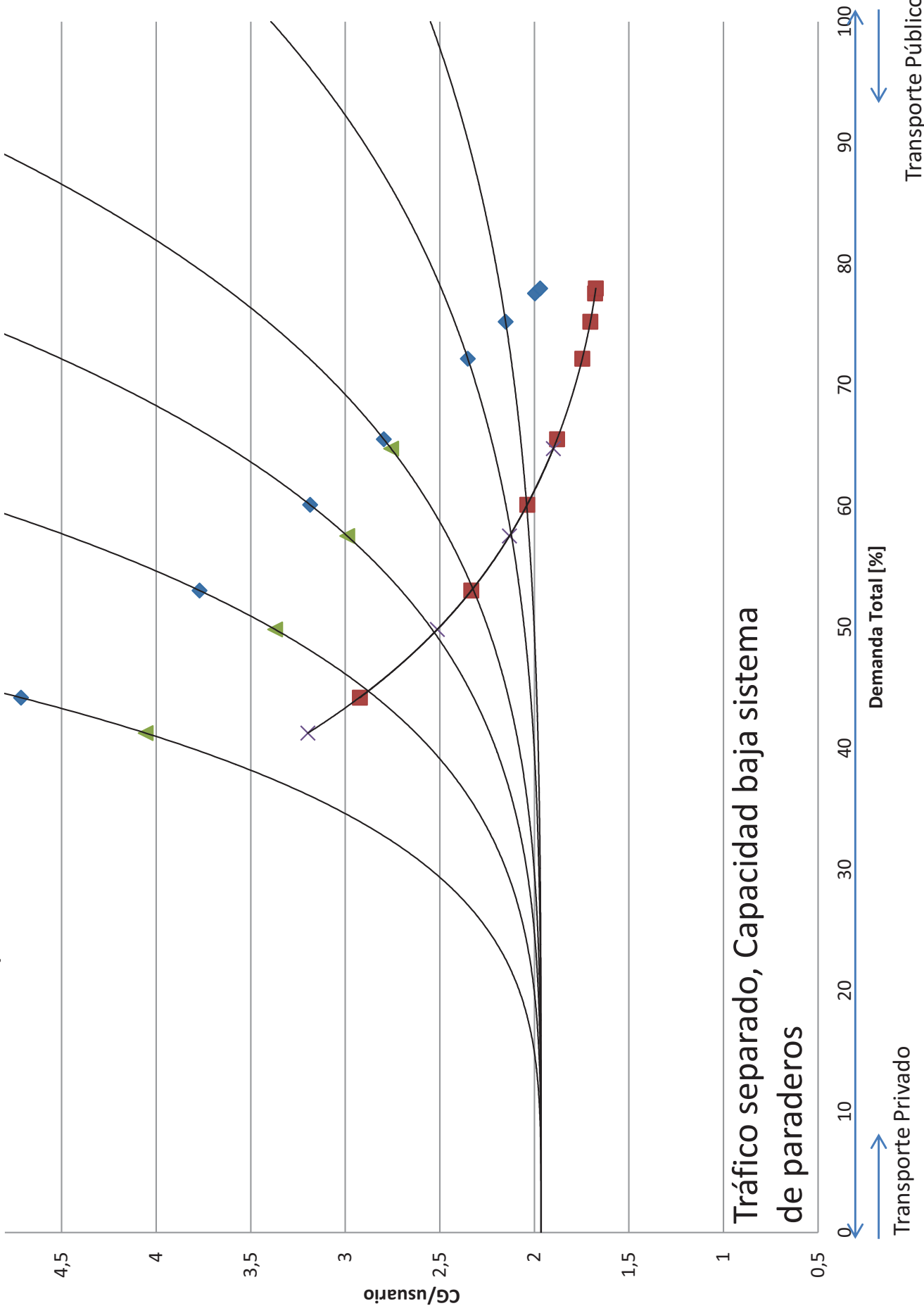
Costos Generalizados y Distribución modal para distintas Capacidades Viales



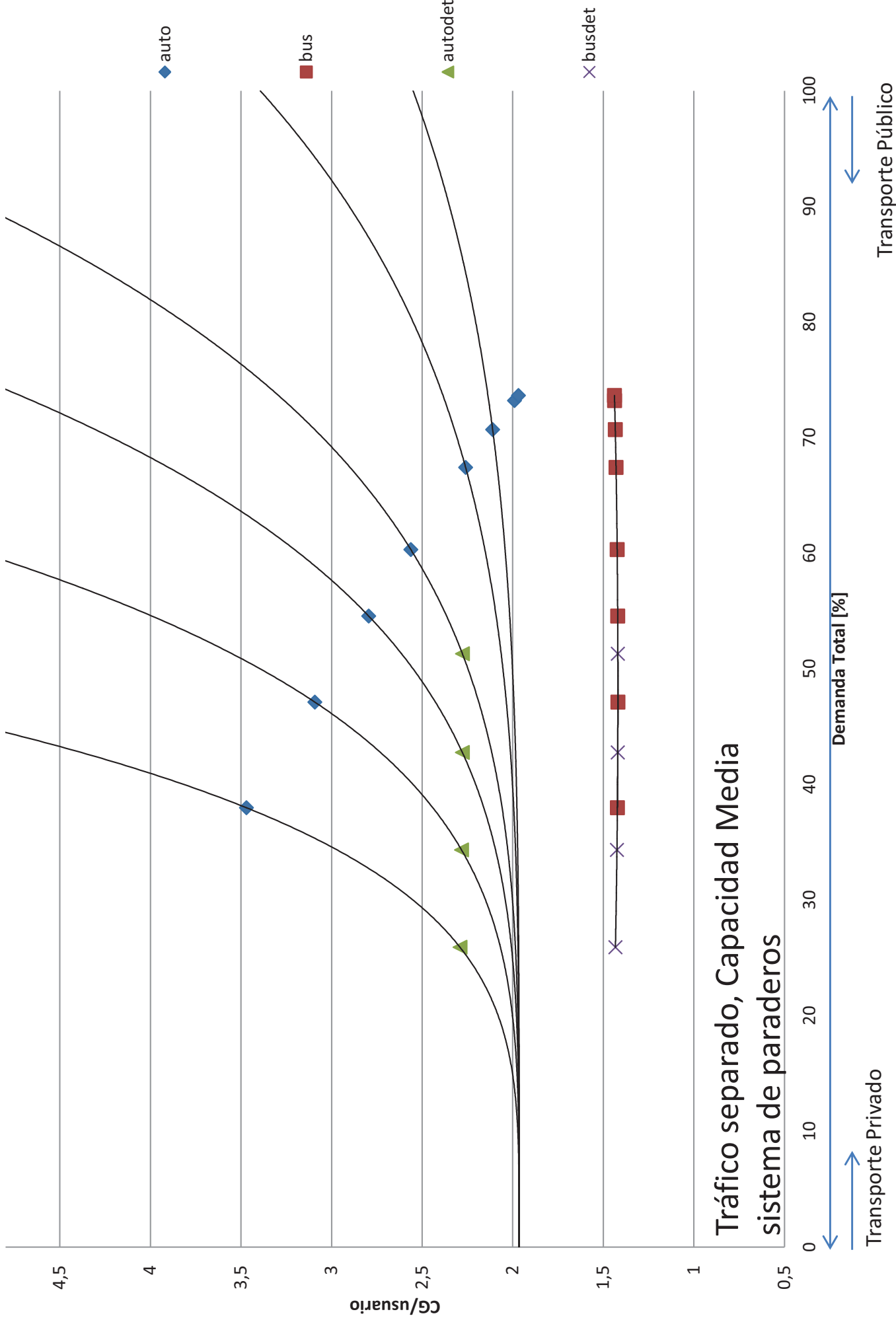
Costos Generalizados y Distribución modal para distintas Capacidades Viales



Costos Generalizados y Distribución modal para distintas Capacidades Viales, Sólo Período Peak, Demanda = 5000



Costos Generalizados y Distribución modal para distintas Capacidades Viales, Sólo Período Peak, Demanda =5000

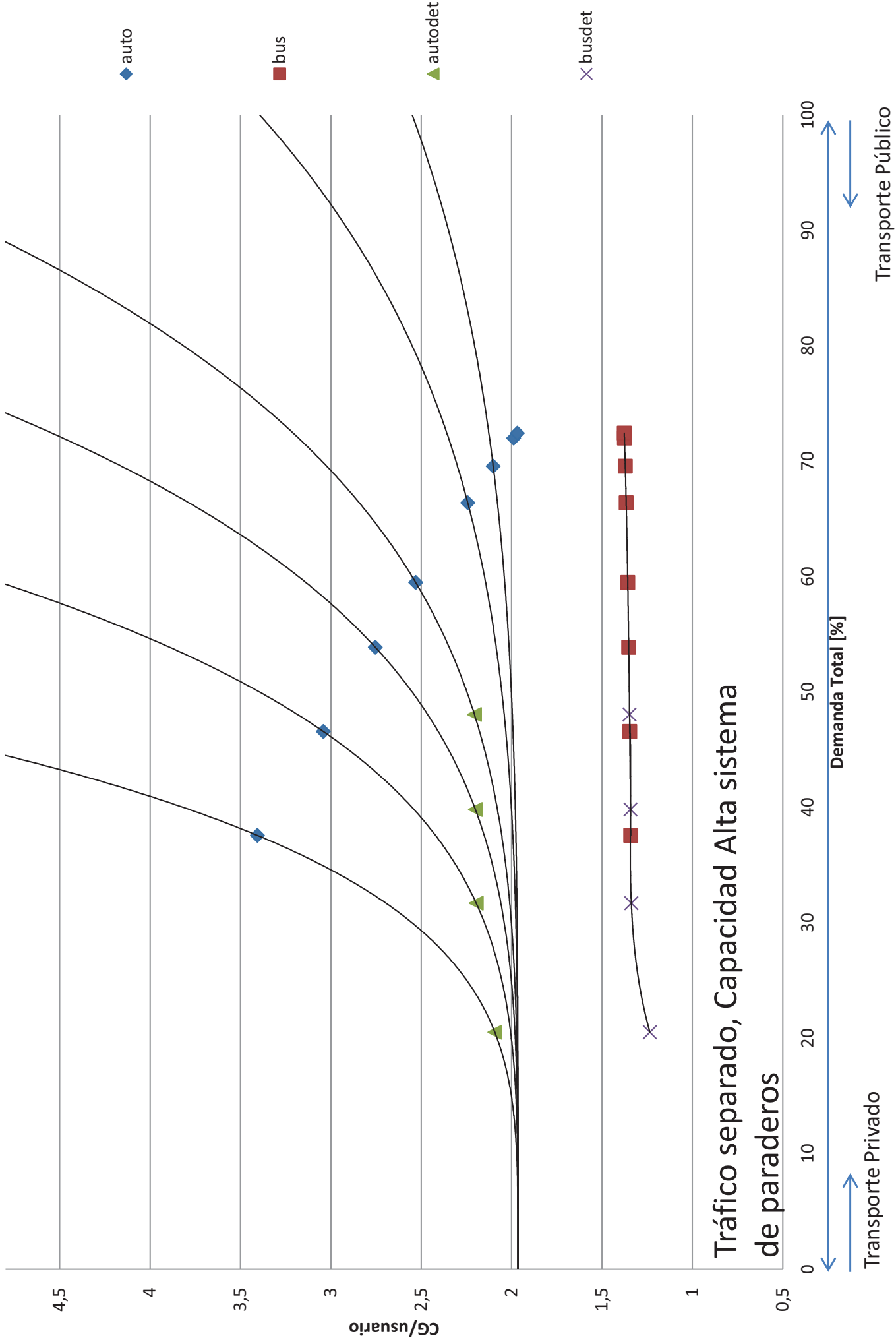


Tráfico separado, Capacidad Media sistema de paraderos

Transporte Privado

Transporte Público

Costos Generalizados y Distribución modal para distintas Capacidades Viales, Sólo Período Peak, Demanda =5000

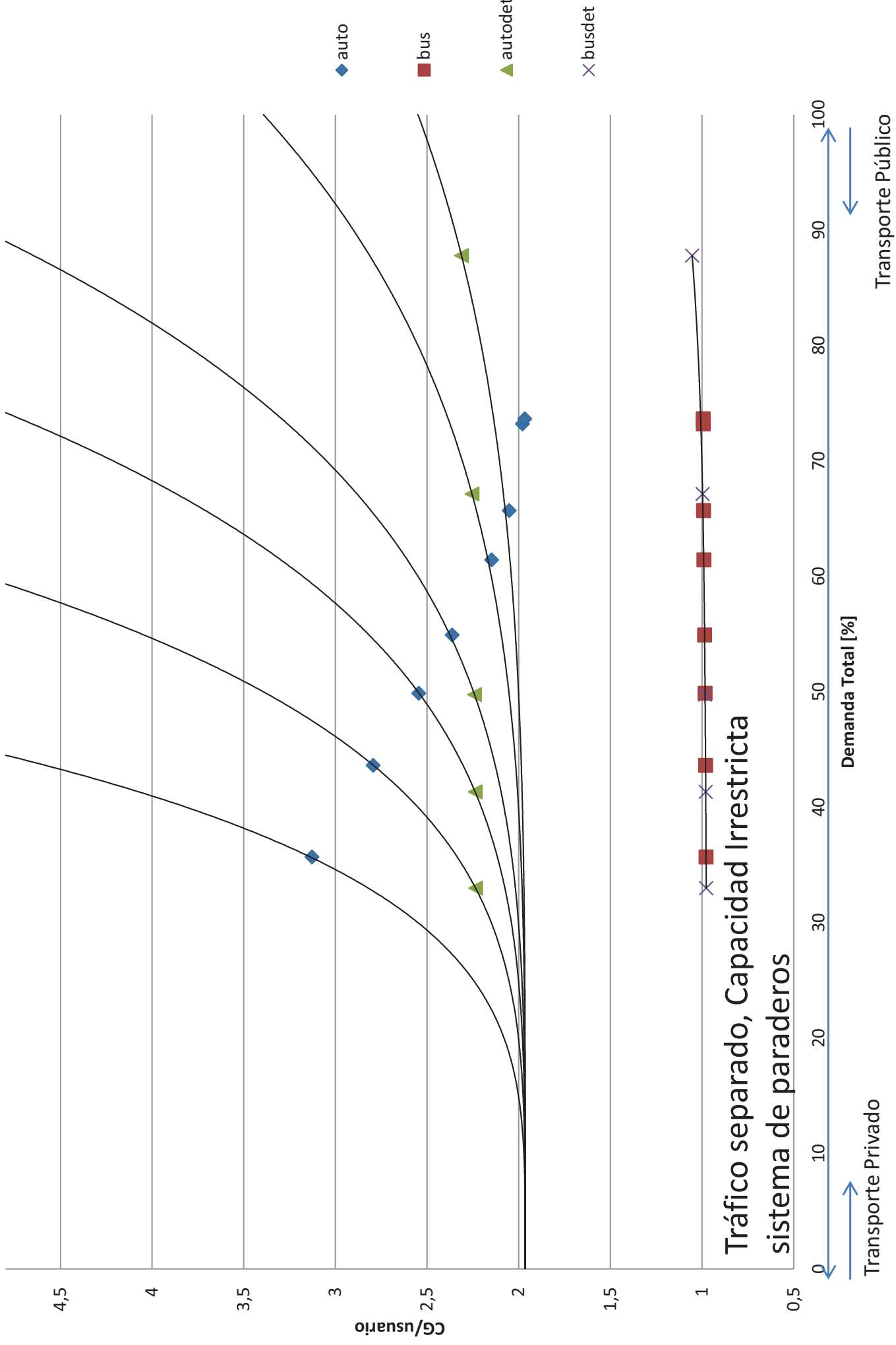


Tráfico separado, Capacidad Alta sistema de paraderos

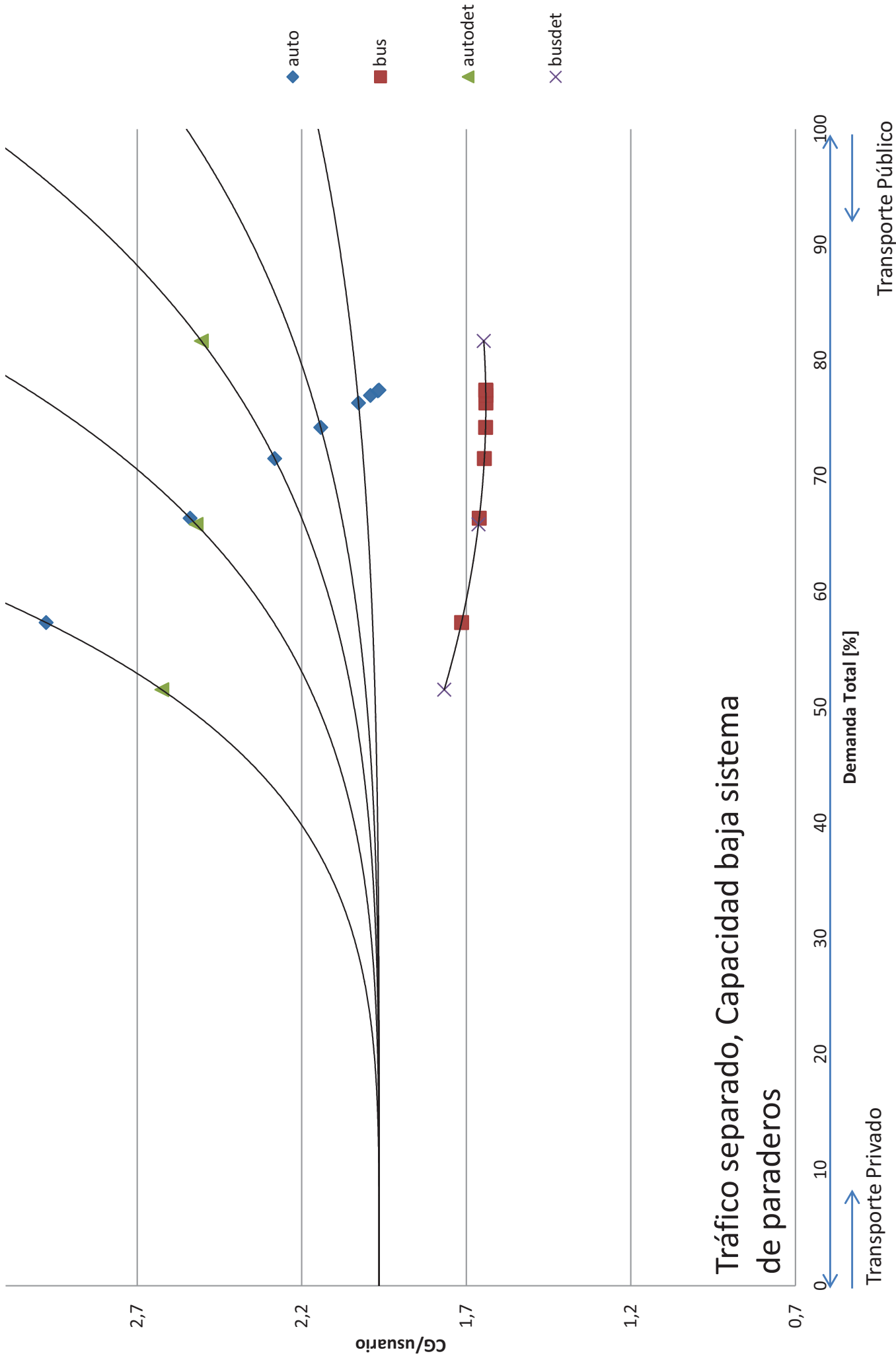
Transporte Privado

Transporte Público

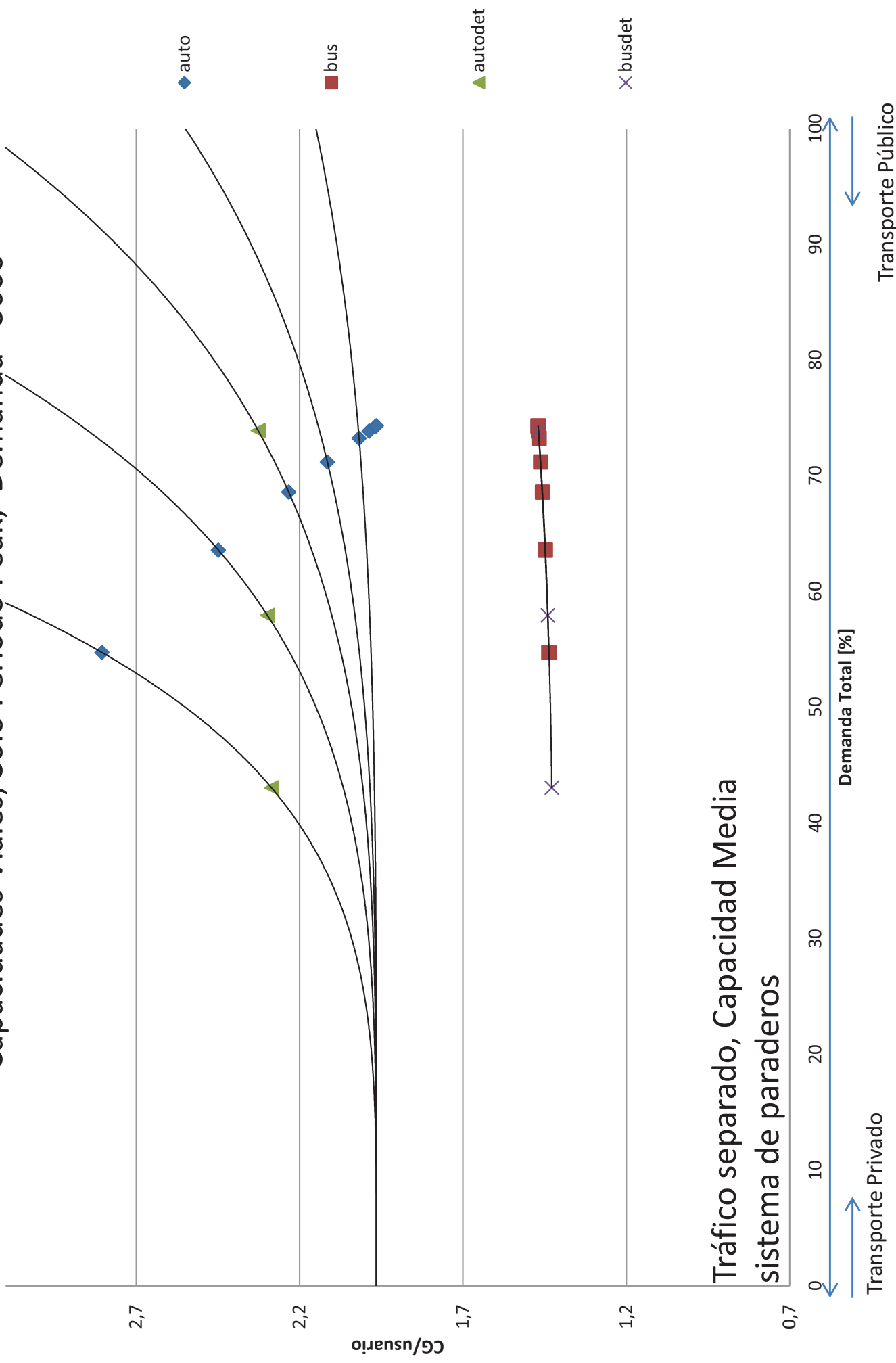
Costos Generalizados y Distribución modal para distintas Capacidades Viales, Sólo Período Peak, Demanda =5000



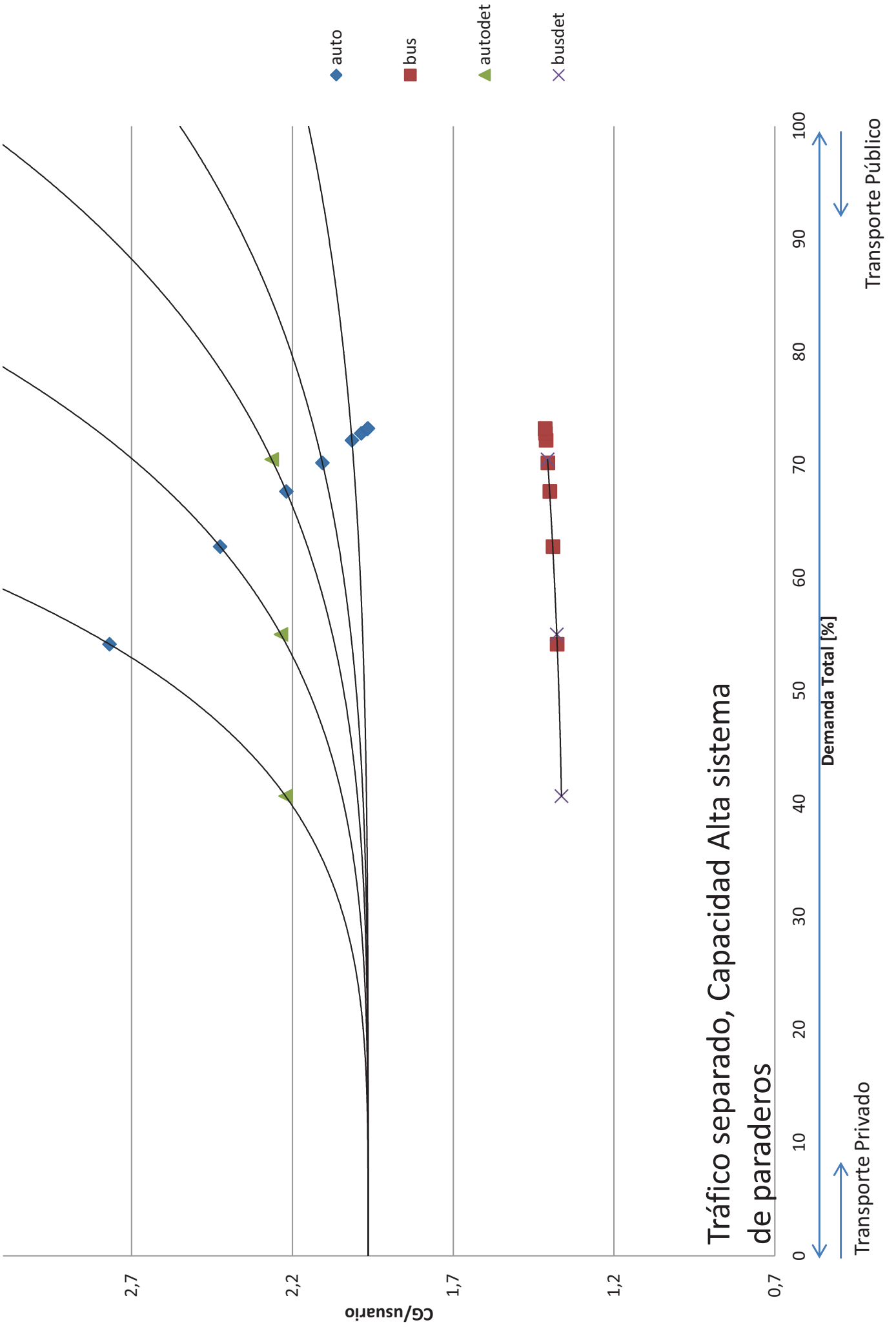
Costos Generalizados y Distribución modal para distintas Capacidades Viales, Sólo Período Peak, Demanda =3000



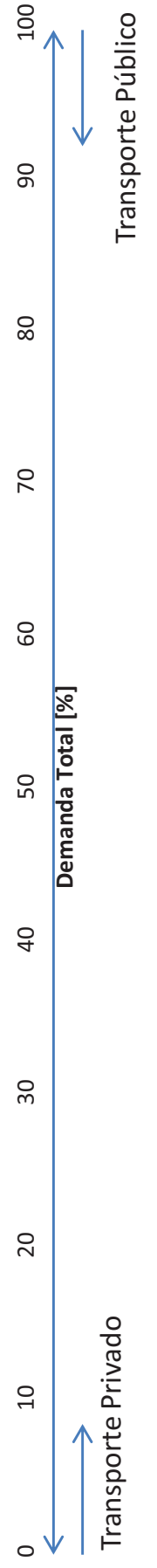
Costos Generalizados y Distribución modal para distintas Capacidades Viales, Sólo Período Peak, Demanda = 3000



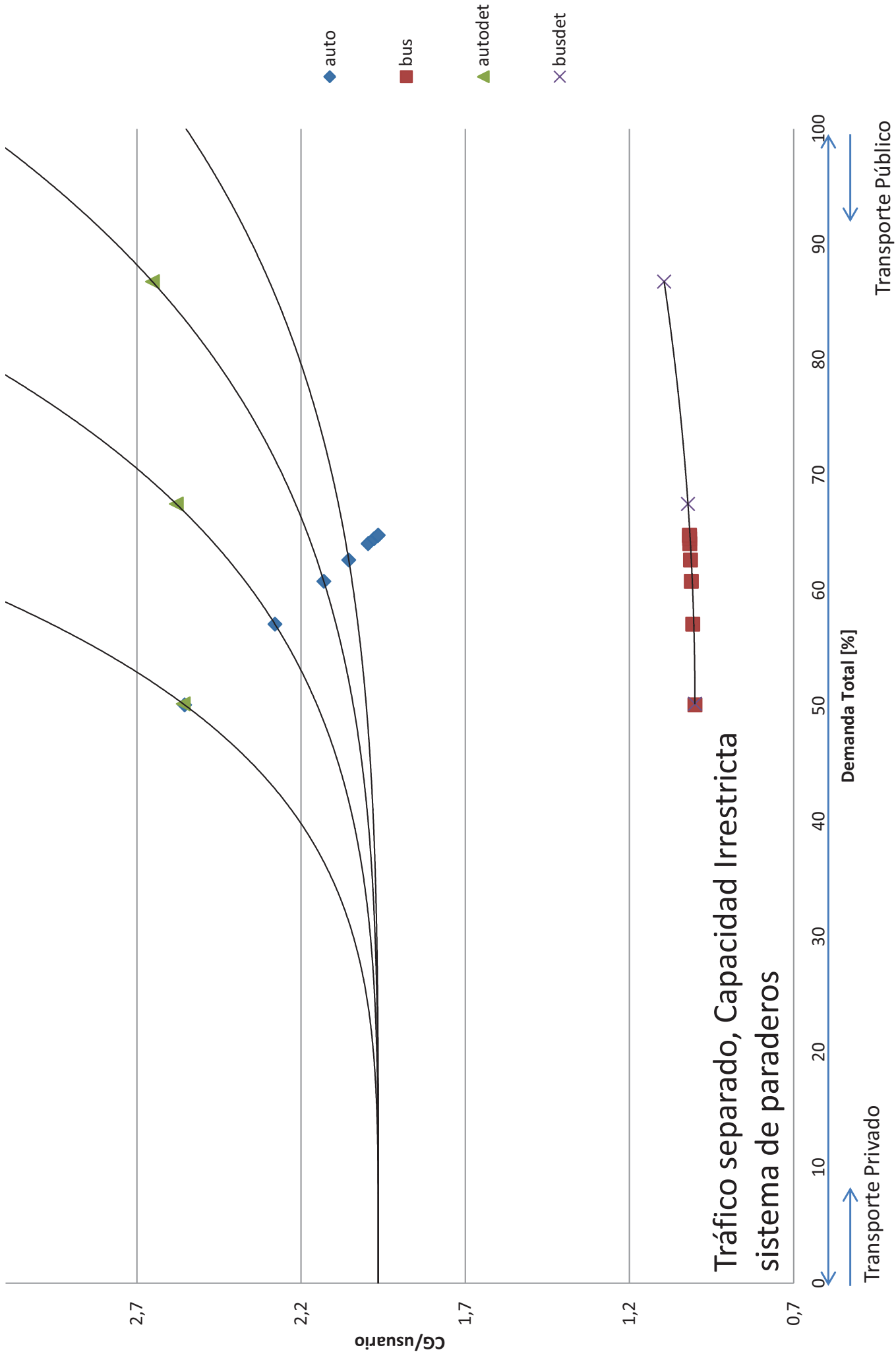
Costos Generalizados y Distribución modal para distintas Capacidades Viales, Sólo Período Peak, Demanda =3000



Tráfico separado, Capacidad Alta sistema de paraderos



Costos Generalizados y Distribución modal para distintas Capacidades Viales, Sólo Período Peak, Demanda =3000



Tráfico separado, Capacidad Irrestringida sistema de paraderos

Transporte Privado

Transporte Público

Costos Generalizados		PEAK					
VE con 0 Subs		AUTO		BUS		Dif-auto	Dif-bus
		Q=3600	Q=4800	Q=3600	Q=4800		
1	caso normal	-3,0502	-2,5266	-1,54602	-1,51166	0,5236	0,03436
2	Dism cte modal auto(-0,5)	-2,7556	-2,3336	-1,55686	-1,52221	0,422	0,03465
3	Dism cte modal auto(-1)	-2,5188	-2,1729	-1,6471	-1,5452	0,3459	0,10196
4	No existe cong. en los paraderos	-2,9628	-2,4829	-1,3861	-1,3913	0,4799	-0,0052
5	No existe cong. en la vía	-3,05032	-2,52664	-1,54609	-1,51164	0,52368	0,03445
6	Δ- 30%poblacion	-2,58162	-2,19592	-1,50637	-1,50267	0,3857	0,0037

Costos Generalizados		OFF-PEAK					
VE con 0 Subs		AUTO		BUS		Dif-auto	Dif-bus
		Q=3600	Q=4800	Q=3600	Q=4800		
1	caso normal	-2,0398	-1,9215	-1,2063	-1,2174	0,11837	-0,01107
2	Dism cte modal auto(-0,5)	-1,9709	-1,9072	-1,1904	-1,1924	0,06366	-0,002
3	Dism cte modal auto(-1)	-1,9263	-1,8983	-1,1587	-1,1777	0,02795	-0,01896
4	No existe cong. en los paraderos	-2,0297	-1,9198	-1,1724	-1,1846	0,10988	-0,01221
5	No existe cong. en la vía	-2,0398	-1,9215	-1,2062	-1,2175	0,11835	-0,01129
6	Δ- 30%poblacion	-1,92897	-1,89835	-1,24838	-1,24949	0,03062	-0,00111

Análisis de sensibilidad- Modelos de demanda y funciones de congestión de paraderos

	Modelo de demanda Estocástico							
	3600 [veh/h]				4800 [veh/h]			
	Capacidad Sistema				Capacidad Sistema			
	Baja	Media	Alta	Irrestriccta	Baja	Media	Alta	Irrestriccta
Tarifa Bus [\$/km]	0,0737	0,0765	0,0649	0,0597	0,0838	0,0809	0,0667	0,0613
Frecuencia Peak [bus/h]	57,27	123,39	102,71	135,64	67,29	101,03	81,30	114,05
Tamaño Bus [pax]	65,62	34,28	41,60	33,24	41,00	31,42	39,85	31,91
Velocidad Auto Peak [km/h]	10,11	14,70	15,22	18,37	18,34	22,79	23,57	28,73
Velocidad Bus Peak [km/h]	14,73	29,25	31,03	52,37	19,94	29,66	31,11	52,68
Partición Auto peak [%]	53,02	47,13	46,59	43,65	65,51	60,32	59,50	54,51
Partición Bus peak [%]	46,98	52,87	53,41	56,35	34,49	39,68	40,50	45,49

	Modelo de demanda Determinístico							
	3600 [veh/h]				4800 [veh/h]			
	Capacidad Sistema				Capacidad Sistema			
	Baja	Media	Alta	Irrestriccta	Baja	Media	Alta	Irrestriccta
Tarifa Bus [\$/km]	0,0729	0,0706	0,0657	0,0585	0,0829	0,0781	0,0650	0,0606
Frecuencia Peak [bus/h]	54,50	134,32	134,15	155,68	66,77	117,39	100,18	123,62
Tamaño Bus [pax]	73,68	39,10	40,72	34,43	42,25	33,18	41,47	32,51
Velocidad Auto Peak [km/h]	12,39	32,11	36,79	34,49	18,95	32,35	36,19	34,17
Velocidad Bus Peak [km/h]	13,39	28,58	31,14	52,07	19,62	29,41	31,04	52,54
Partición Auto peak [%]	49,81	34,34	31,71	32,99	64,74	51,31	48,06	49,76
Partición Bus peak [%]	50,19	65,66	68,29	67,01	35,26	48,69	51,94	50,24

Análisis de sensibilidad- Modelos de demanda y funciones de congestión de paraderos (Demanda Total=3000)

	Modelo de demanda Estocástico							
	3600 [veh/h]				4800 [veh/h]			
	Capacidad Sistema				Capacidad Sistema			
	Baja	Media	Alta	Irrestringida	Baja	Media	Alta	Irrestringida
Tarifa Bus [\$/km]	0,110763876	0,087258702	0,073429252	0,066163967	0,121716709	0,090360958	0,076866095	0,06767003
Frecuencia Peak [bus/h]	68,79887242	62,14677724	51,7952646	72,64825808	61,47826519	51,64451356	44,3189003	65,40748013
Tamaño Bus [pax]	23,46746152	28,12886831	34,49161478	28,34582697	20,1316275	26,76961453	32,27482272	27,4068344
Velocidad Auto Peak [km/h]	23,35234952	25,8383483	26,58584279	32,26162722	40,41581662	42,54193443	43,23290454	48,15657168
Velocidad Bus Peak [km/h]	25,30466572	30,03947728	31,38201415	53,43996441	26,59299269	30,18511791	31,4977334	53,63684692
Partición Auto peak [%]	0,663638564	0,635808643	0,627812018	0,570984388	0,74215468	0,711978394	0,702003203	0,626539172
Partición Bus peak [%]	0,336361436	0,364191357	0,372187982	0,429015612	0,25784532	0,288021606	0,297996797	0,373460828

	Modelo de demanda Determinístico							
	3600 [veh/h]				4800 [veh/h]			
	Capacidad Sistema				Capacidad Sistema			
	Baja	Media	Alta	Irrestringida	Baja	Media	Alta	Irrestringida
Tarifa Bus [\$/km]	0,110006896	0,085600458	0,070911945	0,069343493	0,130935797	0,091846345	0,077037343	0,085086257
Frecuencia Peak [bus/h]	69,08212785	69,8149442	59,4627363	58,99367611	48,76556215	47,84755253	44,00923106	32,01305942
Tamaño Bus [pax]	23,74130984	28,91547116	36,31954821	26,43453798	18,02145002	26,16499161	32,17182245	19,83005023
Velocidad Auto Peak [km/h]	23,81381688	31,38348049	34,47235129	22,38204687	24,23412612	30,16276179	32,99221979	20,8402436
Velocidad Bus Peak [km/h]	25,20369679	29,95403794	31,28770158	53,84135396	27,42776612	30,24971173	31,50314055	55,26533288
Partición Auto peak [%]	0,658312459	0,579430832	0,550070892	0,675110298	0,816911221	0,739181081	0,705029757	0,867745713
Partición Bus peak [%]	0,341687541	0,420569168	0,449929108	0,324889702	0,183088779	0,260818919	0,294970243	0,132254287

Bienestar Social- Escenarios

CASO A

SW	BASE	SUB 45%	CON	SUB+CON	VE	VE+SUB	VE+CON	VE+SUB+CON
3000	3088,3	5272,3	18043,6	18170,3	10582,2	11410,1	11848,8	12369,5
3600	17444,7	18986,3	24161,3	24216,0	22326,6	22917,4	23224,5	23503,7
4200	25616,1	26382,8	27640,5	27750,9	28577,5	29040,1	29046,8	29261,7
4800	30320,5	30418,0	30280,4	30474,8	32462,2	32840,6	32580,7	32852,0

CASO B

SW	BASE	SUB 45%	CON	SUB+CON	VE	VE+SUB	VE+CON	VE+SUB+CON
3000	7656,3	10144,2	28781,5	28975,5	24791,8	25714,8	27063,4	27561,8
3600	22090,5	23828,6	32136,0	32281,8	31436,6	32092,9	32957,6	33318,1
4200	30095,5	31068,6	33886,4	34053,6	34878,7	35480,1	35786,8	36080,9
4800	34542,3	34916,5	35300,7	35513,2	37207,7	37686,7	37536,1	37836,3