



GOBIERNO DE CHILE  
Sectra

# ANÁLISIS Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO ESTRAUS

Ministerio de Planificación  
**MIDEPLAN**

INFORME EJECUTIVO

SECRETARÍA INTERMINISTERIAL DE TRANSPORTE

Santiago, Noviembre de 2005

SECTRA  
Teatinos 950, Piso 16  
Santiago Chile  
Teléfono 56-2-6710935  
Fax 56-2-6966477  
[www.sectra.cl](http://www.sectra.cl)

# ÍNDICE

	Pág.
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1-1</b>
<b>2 REVISION METODOLÓGICA DE ESTRAUS (TAREA 1) .....</b>	<b>2-3</b>
2.1 MODALIDADES DE OPERACIÓN DE ESTRAUS.....	2-4
2.1.1 Distribución – Partición Modal – Asignación (D-PM-A) .....	2-4
2.1.2 Partición Modal – Asignación (PM-A).....	2-4
2.1.3 Distribución - Elección de Horario - Partición Modal – Asignación (D- EH-PM-A) .....	2-5
2.1.4 Modelación de ESTRAUS con Red Multimodal de Transporte Público .....	2-5
<b>3 DEFINICIONES INICIALES (TAREA 2) .....</b>	<b>3-6</b>
3.1 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	3-6
3.2 NÚMERO DE ZONAS DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	3-6
3.3 PERÍODOS DE MODELACIÓN .....	3-7
3.4 PROPÓSITOS DE VIAJE .....	3-8
3.5 MODOS DE TRANSPORTE.....	3-9
3.6 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
<b>4 DEFINICION Y CONSTRUCCIÓN DE REDES DE TRANSPORTE (TAREA 3 Y TAREA 5) .....</b>	<b>4-13</b>
4.1 DEFINICIÓN DE REDES .....	4-13
4.2 RED VIAL ESTRATÉGICA.....	4-14
4.3 REDES DE TRANSPORTE PÚBLICO .....	4-16
4.3.1 Red de Servicios de Buses .....	4-16
4.3.2 Red de Metro .....	4-17
4.3.3 Red de Servicios de Taxicolectivos.....	4-18

<b>5</b>	<b>RESULTADOS GENERALES DE LA CALIBRACIÓN.....</b>	<b>5-20</b>
5.1	GENERACIÓN Y ATRACCIÓN DE VIAJES .....	5-20
5.1.1	Tasas ACM .....	5-21
5.1.2	Modelos de RLM .....	5-24
5.2	CALIBRACIÓN DE LA RED VIAL ESTRATÉGICA .....	5-28
5.3	CALIBRACIÓN DE REDES DE TRANSPORTE PÚBLICO .....	5-29
5.4	CALIBRACIÓN SIMULTÁNEA DE MODELOS DE DISTRIBUCIÓN Y PARTICIÓN MODAL .....	5-30
5.4.1	Modelos Definitivos Para 11 Modos .....	5-31
5.4.2	Modelos Definitivos Para 6 Modos (Red Multimodal) .....	5-34
<b>6</b>	<b>CALIBRACIÓN DEL MODELO CON ELECCIÓN DE HORARIO .....</b>	<b>6-36</b>
<b>7</b>	<b>VALIDACIÓN DEL MODELO ESTRAUS .....</b>	<b>7-42</b>
7.1	PARTICIÓN MODAL Y DISTRIBUCIÓN.....	7-42
7.2	NIVELES DE SERVICIO .....	7-43
7.3	PERFILES DE CARGA EN LÍNEAS DE METRO .....	7-44
7.4	REPARTICIÓN DE VIAJES ENTRE SUB-PERÍODOS EN MODELO CON ELECCIÓN DE HORARIO .....	7-46
<b>8</b>	<b>TAREAS Y DESARROLLOS COMPLEMENTARIOS.....</b>	<b>8-47</b>
8.1	ACTUALIZACIÓN FACTORES DE EXPANSIÓN DE VERDI.....	8-47
8.2	MODELAMIENTO DE TAXIS VACÍOS .....	8-48
8.3	MODELAMIENTO DE CAMIONES .....	8-49
8.4	MODELAMIENTO DEL MODO TRANVÍA .....	8-50
8.5	TRATAMIENTO DE VIAJES EXTERNOS.....	8-51
8.6	RAZÓN DE VELOCIDAD ENTRE BUSES Y AUTOS.....	8-52
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>9-55</b>

## 1 INTRODUCCIÓN

El presente documento corresponde al Informe Ejecutivo del Estudio “Análisis y Actualización del Modelo ESTRAUS”, cuyo objetivo principal fue la **recalibración de los modelos de demanda y oferta que forman parte del modelo de equilibrio simultáneo ESTRAUS**, validando el modelo con el comportamiento observado del sistema de transporte urbano para el año 2001.

Para lograr el objetivo principal del Estudio, se definieron una serie de objetivos específicos, los cuales conformaron un total de 14 Tareas especificadas en las Bases de Licitación. Estas Tareas se indican a continuación:

- T-1 REVISION METODOLÓGICA DE ESTRAUS
- T-2 DEFINICIONES INICIALES
- T-3 DEFINICION DE REDES DE TRANSPORTE
- T-4 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA
- T-5 CONSTRUCCIÓN DE REDES DE TRANSPORTE
- T-6 CALIBRACIÓN DE MODELOS DE REDES
- T-7 CALIBRACIÓN MODELOS DE DEMANDA
- T-8 VALIDACIÓN DEL MODELO DE EQUILIBRIO SIMULTÁNEO
- T-9 SIMULACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE URBANO EN UN AÑO FUTURO
- T-10 ACTUALIZACIÓN DE FACTORES DE EXPANSIÓN UTILIZADOS EN VERDI
- T-11 MODELAMIENTO DE TAXIS VACÍOS
- T-12 MODELAMIENTO DE CAMIONES
- T-13 MODELAMIENTO DEL MODO TRANVÍA
- T-14 INSTALACIÓN DE ESTRAUS EN EL COMPUTADOR DEL MANDANTE

En los Capítulos siguientes se describe gruesamente el contenido y objetivos de cada una de las 14 Tareas recién expuestas, y los principales resultados obtenidos en cada caso. Finalmente, se presenta un Capítulo

EJECUTIVO

---

con las principales conclusiones y recomendaciones generales asociadas a los resultados obtenidos y enfoque metodológico considerado, de tal suerte de explotar con eficacia las potencialidades de la última versión del modelo ESTRAUS.

## **2 REVISION METODOLÓGICA DE ESTRAUS (TAREA 1)**

La presente tarea se enmarcó en el análisis de ESTRAUS, un modelo de equilibrio simultáneo oferta-demanda para analizar y evaluar sistemas multimodales de transporte urbano, con múltiples clases de usuarios. La versión más elaborada de este modelo desarrollado por SECTRA (ESTRAUS 5.5.3.p) considera equilibrio entre las etapas de distribución, partición modal y asignación; restricción de capacidad de las vías y restricción de capacidad de los vehículos que prestan servicios de transporte público. Además, considera la alternativa de escoger, para determinados usuarios, el período de realización del viaje; a dicha alternativa se le ha denominado elección de horario de viaje.

Por otra parte, en términos de las decisiones de demanda (elección de destinos según un modelo de distribución doblemente acotado de maximización de la entropía, y elección de horario y de modos de acuerdo a un modelo de partición modal de tipo logit jerárquico o multinomial), ESTRAUS las puede suponer simultáneas (distribución, partición modal y elección de horario al mismo nivel jerárquico) o secuenciales. La asignación sobre las redes de transporte público y privado es de equilibrio determinístico y supone que los viajeros se comportan de acuerdo al primer principio de Wardrop. Las generaciones y atracciones de viajes son exógenas al modelo y en consecuencia las relaciones de largo plazo existentes entre el sistema de transporte y el sistema de actividades no son modeladas por él..

## **2.1 Modalidades de Operación de ESTRAUS**

En esta sección se reportan las diferentes modalidades en las cuales es factible utilizar el modelo, las que entregan mayor flexibilidad para adaptarse de mejor manera a diferentes problemas. De esta forma, el modelo ESTRAUS permite tratar adecuadamente problemas con demanda fija y demanda variable, a niveles de Distribución de viajes, Partición Modal e incluso Elección del período de viaje por parte del usuario. Estas nuevas modalidades de operación fueron implementadas dentro de ESTRAUS en el contexto del Estudio “Análisis, Desarrollo y Mantenimiento de Modelos de Transporte Urbano, VI Etapa” (MIDEPLAN-SECTRA, en ejecución); sin embargo, la estimación de los nuevos modelos (calibración) se desarrolló en el contexto del presente Estudio.

### **2.1.1 Distribución – Partición Modal – Asignación (D-PM-A)**

Esta modalidad de uso de ESTRAUS es la tradicionalmente empleada en la modelación de sistemas de transporte urbano, particularmente en el caso de Santiago. Sin embargo, en el contexto del presente Estudio, se obtuvo el parámetro asociado a la distribución de viajes ( $\phi$ ), levantando el supuesto de considerarlo igual a uno. Se mantuvieron los mismos 11 modos disponibles, excepto en el caso de la modelación con red multimodal cuya situación particular se expone en el punto 2.1.4 siguiente.

### **2.1.2 Partición Modal – Asignación (PM-A)**

Esta modalidad alternativa de ESTRAUS, que considera modelos de demanda específicos, permite evaluar proyectos que puedan generar cambios en la partición modal y en la asignación de viajes, pero no necesariamente en la distribución. En esta modalidad, en lugar de introducir los vectores de generación y atracción de viajes por propósito y categoría de viajero, deben introducirse matrices de viaje según propósito y categoría de usuarios.

### **2.1.3 Distribución - Elección de Horario - Partición Modal – Asignación (D-EH-PM-A)**

Esta nueva modalidad incorpora en la decisión de los viajeros, el horario en el que éstos realizan su viaje. La decisión quedará determinada por los modelos de demanda, la disponibilidad de horario y los niveles de servicio percibidos en cada horario. La modelación con elección de horario se realizó para el período punta mañana, considerando 2 horarios: 7:30 a 8:30 hrs (horario 1) y de 6:30 a 7:30 hrs. (horario 2). También se definieron modelos de demanda específicos para esta modalidad. Debe considerarse que en este último caso deben introducirse los vectores de generación y atracción de viaje (por propósito y categoría) para el lapso completo (6:30 a 8:30 hrs).

### **2.1.4 Modelación de ESTRAUS con Red Multimodal de Transporte Público**

Como parte del Estudio, se incorporó una alternativa de modelación con ESTRAUS, que define un modo único de transporte público, que incluye a los modos Bus, Metro y Bus-Metro. A esta red única se le denominó red multimodal, y permite captar de mejor manera la modelación de sistemas integrados de transporte público. Bajo este enfoque de modelación, se consideran sólo 6 modos (Autochofer, Autoacompañante, Caminata, Taxi, Taxicolectivo y Transporte Público).

### **3 DEFINICIONES INICIALES (TAREA 2)**

En este Capítulo se presentan una serie de antecedentes que permitieron caracterizar a los agentes del Sistema de Transporte Urbano de Santiago (operadores y usuarios), para efectos de una correcta modelación de dicho sistema con ESTRAUS.

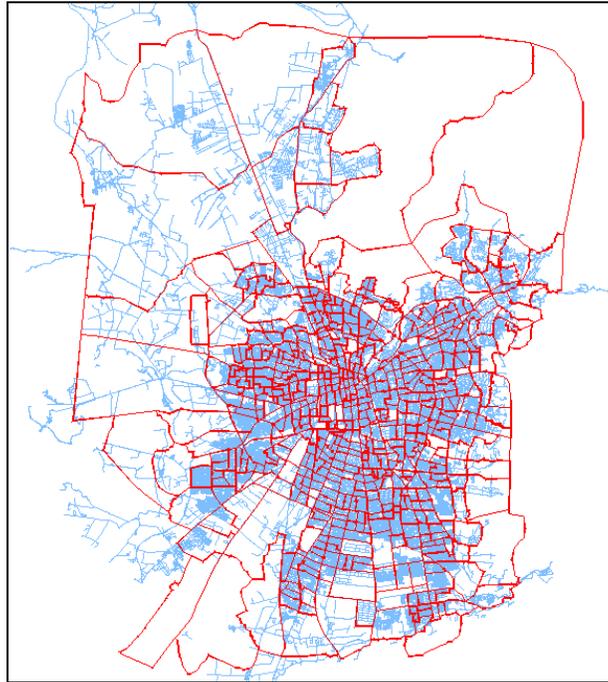
#### **3.1 Análisis de la Información Disponible**

Se revisó la encuesta a hogares realizada en el contexto de la EOD-2001, que corresponde a la **principal fuente de información para la calibración de los modelos de oferta y demanda de ESTRAUS**. El análisis de consistencia se enfocó fundamentalmente en detectar aquella información que impide realizar una calibración adecuada de los modelos econométricos considerados en ESTRAUS.

#### **3.2 Número de Zonas del Área de Estudio**

La desagregación geográfica adoptada en el presente estudio consideró un total de 630 zonas, de las cuales 618 corresponden a zonas internas (urbanas) y 12 a zonas externas.

**Figura 3.1**  
**Zonificación de ESTRAUS: 618 Zonas Internas**

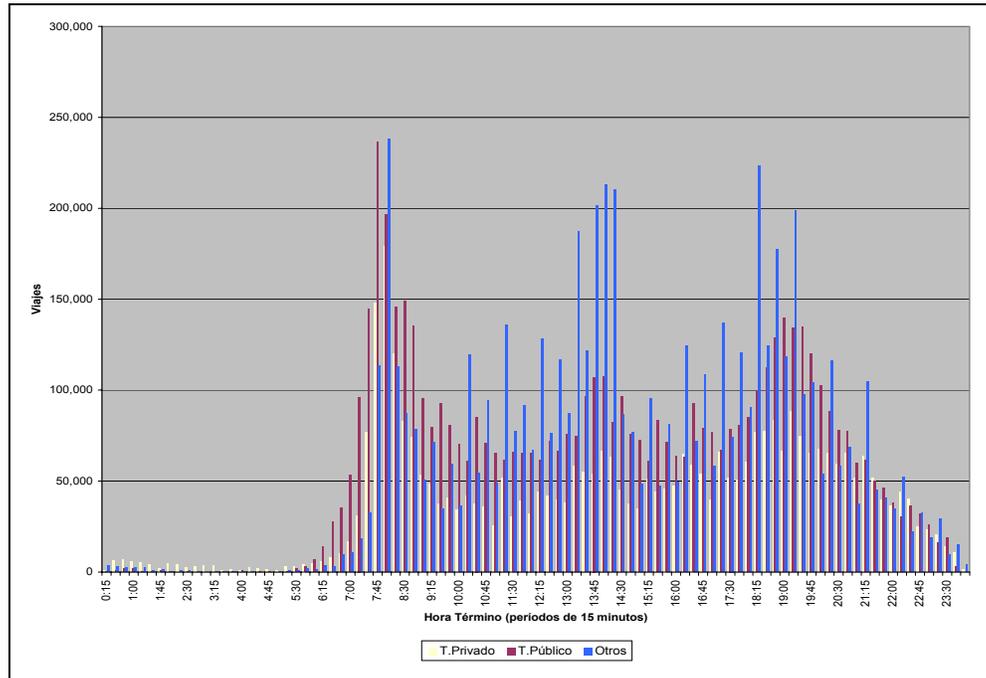


### **3.3 Períodos de Modelación**

La definición de los períodos de modelación punta y fuera de punta, se sustenta en el análisis diagramas de distribución horaria de viajes separados por modo y contruidos contabilizando cada viaje en un solo intervalo (período de 15 minutos), correspondiente al punto medio de su desarrollo (tiempo medio de viaje). A partir de ellos, se escogieron períodos que representen condiciones de operación típicas y en torno de los cuales se pueda suponer una homogeneidad razonable en cuanto a dichas condiciones.

A partir de distintos análisis, se determinó que el período punta de una hora a considerar estaría representado por el intervalo de 7:30 a 8:30 hrs; sin embargo, para el análisis de elección de horario, la modelación consideró dos subperíodos: 6:30 a 7:30 hrs. y 7:30 a 8:30 hrs. El período fuera de punta corresponde a una hora promedio de operación del sistema, que preferentemente incluya el lapso 10:00 -12:00 hrs. La modelación es consistente con la operación del sistema en un día hábil de época normal.

**Figura 3.2**  
**Distribución Horaria de Viajes Diarios**



**Tabla 3.1**  
**Síntesis de Viajes Según Período y Total Diario**

Período	Punta Mañana
Punta Mañana (*)	1.209.165
Fuera de Punta (*)	574.791
<b>Total Diario</b>	<b>15.459.029</b>

(\*): viajes modelables por ESTRAUS.

### 3.4 Propósitos de Viaje

La consideración de distintos propósitos de viaje tiene como objetivo estratificar a un primer nivel la demanda con el fin de predecir mejor las decisiones de los usuarios respecto de la generación, distribución y partición modal. La estratificación utilizada se basa en la definición de propósitos considerada en la EOD-2001.

Como resultado, para el período punta mañana (7:30 a 8:30 hrs.) se definieron 4 propósitos: Trabajo, Estudio 1 (educación básica), Estudio 2 (educación media y superior) y Otros. En fuera de punta (hora promedio

entre 10:00 y 12:00 hrs.) se definieron 3 propósitos: Trabajo, Estudio y Otros. La desagregación en punta mañana realizada para los viajes con propósito Estudio se fundamenta en que los estudiantes de educación básica presentan un comportamiento distinto a los restantes, principalmente por que ellos tienen una menor independencia y no perciben tarifa en transporte público. En la modelación con elección de horario, se consideraron los mismos propósitos que en punta mañana.

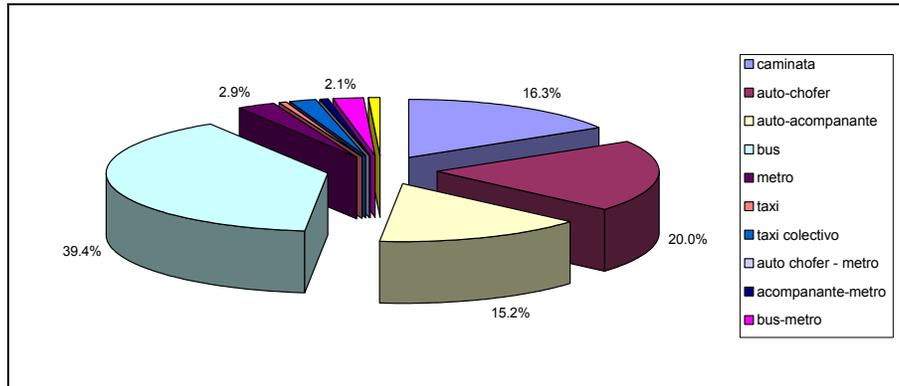
**Tabla 3.2**  
**Síntesis de Viajes por Propósito y Período**

Propósito	Punta Mañana	Fuera de Punta
TRABAJO	502.494	125.797
ESTUDIO 1	207.013	23.643
ESTUDIO 2	234.245	
OTROS	265.413	425.351
<b>TOTAL</b>	<b>1.209.165</b>	<b>574.791</b>

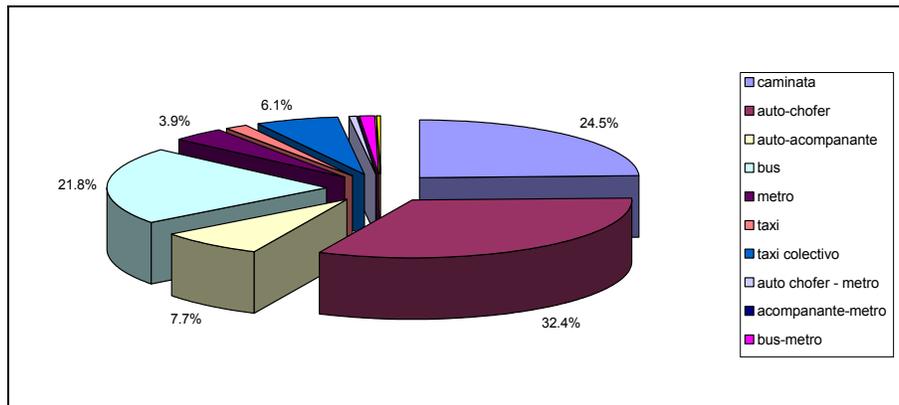
### 3.5 Modos de Transporte

La elección de modos de transporte a considerar requirió de analizar la relevancia de los distintos modos para satisfacer la demanda por transporte. Como resultado, se definieron 11 modos de transporte para los distintos períodos de modelación, cuya partición modal agregada se muestra en las siguientes figuras; dicha gráficas ilustran la partición modal para un lapso más amplio, que es consistente con el período de calibración de modelos de demanda.

**Figura 3.3**  
**Partición Modal de los Viajes Punta Mañana (7:15-9:15 hrs)**



**Figura 3.4**  
**Partición Modal de los Viajes Fuera de Punta (10:00-12:00 hrs)**



Por lo tanto, los **modos puros** modelados con la actual versión de ESTRAUS son los siguientes:

- i. Caminata
- ii. Autochofer
- iii. Autoacompañante
- iv. Bus
- v. Taxicolectivo
- vi. Metro
- vii. Taxi

Complementariamente, los **modos combinados** son los siguientes:

- viii. Autochofer-Metro
- ix. Autoacompañante-Metro
- x. Bus-Metro
- xi. Taxicolectivo-Metro

Los 7 modos puros considerados y sus combinaciones (Caminata, Autochofer, Autoacompañante, Bus (más Metrobus celeste), Metro (más Tren), Taxi (más Radio-Taxi), Taxicolectivo) representan el 95% de los viajes totales detectados en la EOD-2001. Este porcentaje es de 96% en el período punta y de 98% en el período fuera de punta. Estos modos son los mismos que fueron considerados en la anterior calibración de ESTRAUS. Es importante recordar que la modalidad de ESTRAUS con red multimodal incluye sólo 6 modos: Autochofer, Autoacompañante, Caminata, Taxi, Taxicolectivo y Transporte Público (Bus, Metro y Bus-Metro).

### 3.6 Categorías de Usuarios

La demanda se estratificó en un segundo nivel de categorías, lo que permitió lograr predecir mejor las decisiones de los viajeros respecto de la generación, distribución, partición modal y asignación de los viajes. Las variables que han demostrado ser mejores para ésta categorización son **el nivel de ingreso y el número de automóviles**, a nivel de los hogares. De esta manera, este nivel de estratificación considera:

- i. **Distribución de ingreso del hogar**, estratificado en cinco niveles: Bajo, Medio- Bajo, Medio, Medio-Alto y Alto.
- ii. **Distribución de número de vehículos en el hogar**, clasificado en tres niveles: hogares sin auto, con un auto y dos o más vehículos en el hogar.

Los análisis realizados se sustentan en la técnica de análisis de clasificación múltiple (ACM), de lo que se deriva utilizar la estratificación del ingreso y número de autos que se indica en la Tabla 3.3:

**Tabla 3.3**  
**Número de Hogares Según Definición de Categorías (\$ de Abril de 2001)**

<b>Rango</b>	<b>Ingreso (\$)</b>	<b>sin auto</b>	<b>1 auto</b>	<b>2 o más</b>	<b>TOTAL</b>
Bajo	0 – 148.226	233.420	16.940	570	<b>250.930</b>
Medio-Bajo	148.227 – 296.452	349.440	89.620	2.260	<b>441.320</b>
Medio	296.453 – 592.904	272.590	169.040	18.130	<b>459.760</b>
Medio-Alto	592.905 – 1.185.808	71.490	117.730	35.280	<b>224.500</b>
Alto	1.185.809 ó más	9.110	53.030	58.860	<b>121.000</b>
<b>TOTAL</b>		<b>936.050</b>	<b>446.360</b>	<b>115.100</b>	<b>1.497.510</b>

Si bien en la Tabla 3.3 se definen 15 categorías de usuario, para efectos de calibración de los modelos no se consideraron la categorías destacadas en la Tabla, ya que el número de observaciones de usuarios de nivel de ingreso Bajo y Medio-Bajo con más de 2 Autos en el hogar es muy menor. Por lo tanto, **se consideró 13 categorías de usuario.**

## **4 DEFINICION Y CONSTRUCCIÓN DE REDES DE TRANSPORTE (TAREA 3 Y TAREA 5)**

En este Capítulo se expone el proceso de definición y construcción de las redes de transporte asociadas al Modelo ESTRAUS, según las definiciones presentadas en el Capítulo 3. De acuerdo a dichas definiciones, las redes construidas permiten modelar los 11 modos ya definidos y red multimodal para transporte público, considerando aquellos modos puros y combinaciones de éstos. La situación de oferta vial, así como la de servicios de transporte público (Buses, Metro y Taxicolectivo), es coherente con la realidad del año 2001

### **4.1 Definición de Redes**

Los modos puros, que presentan red propia y diferente al resto, son los siguientes:

- i. Autochofer
- ii. Caminata
- iii. Bus
- iv. Taxicolectivo
- v. Metro

Por otra parte, la actual versión de ESTRAUS permite modelar, además de los modos puros definidos en los puntos anteriores, viajes que son realizados en determinadas combinaciones de dichos modos. Las redes donde se asignan estos viajes combinados corresponden a la superposición de las redes de los modos puros que los conforman. Por ejemplo, los viajes que realizan la combinación Bus-Metro (o Metro-Bus) serán asignados a una red conformada tanto por la red de Metro como por la red de Bus; algo análogo ocurre por ejemplo con los viajes en Taxicolectivo-Metro o Auto-Metro..

---

## **4.2 Red Vial Estratégica**

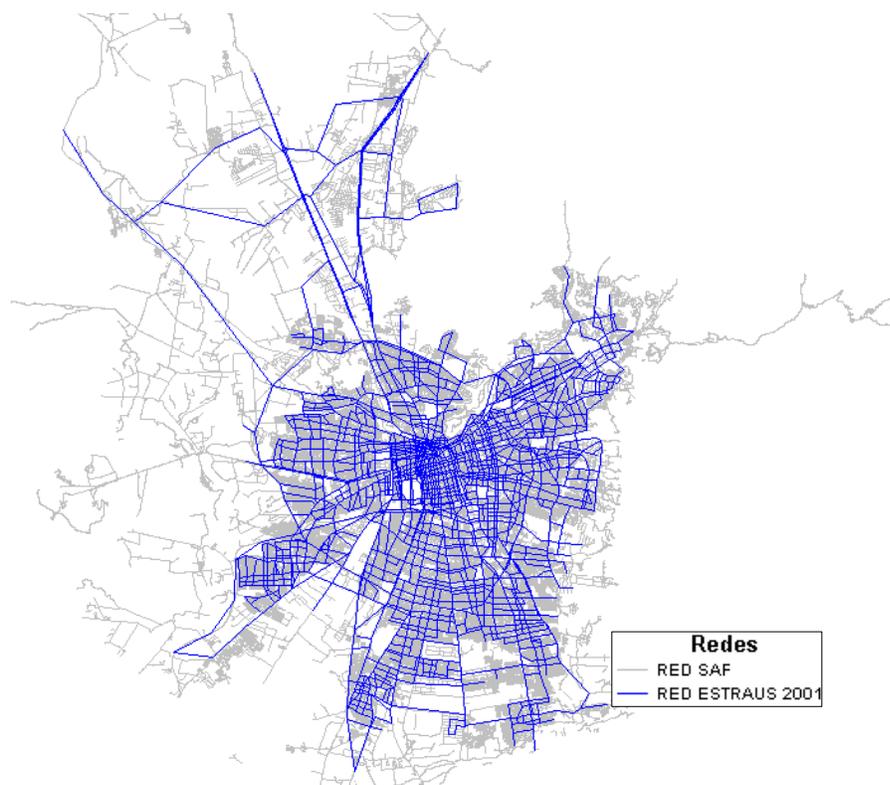
La red vial estratégica, a partir de la cual se tipifican y construyen el resto de las redes de los distintos modos de transporte considerados en la modelación ESTRAUS, representa los ejes viales e intersecciones de calles donde circulan todos los modos de transporte de superficie, principalmente Automóviles, Buses, Taxicolectivos y Taxis en general. También sobre esta red se modelan los desplazamientos de camiones.

La nueva red de ESTRAUS incorpora todos los arcos relevantes de la red de Santiago para análisis estratégico en ésta ciudad.

**Tabla 4.1**  
**Resumen de Características Topológicas de la Red Vial**

Variable	Red Punta Mañana	Red Fuera de Punta
Km de Red Vial	3.716	3.760
Nº de Arcos	6.289	6.382
Nº de Nodos	2.254	2.254
<b>Nº Intersecciones Desagregadas</b>	281	302

**Figura 4.1**  
**Red Vial Estratégica ESTRAUS**



Los arcos de la red vial se clasificaron en las 5 categorías señaladas en la Tabla 4.2:

**Tabla 4.2**  
**Descripción de Categorías de Arco en ESTRAUS**

Descripción	Categoría
Autoría	1
Troncal, Camino Interurbano	2
Céntrico con transporte Público	3
Céntrico sin transporte Público	4
<b>Calle Local, Céntrico Normal</b>	5

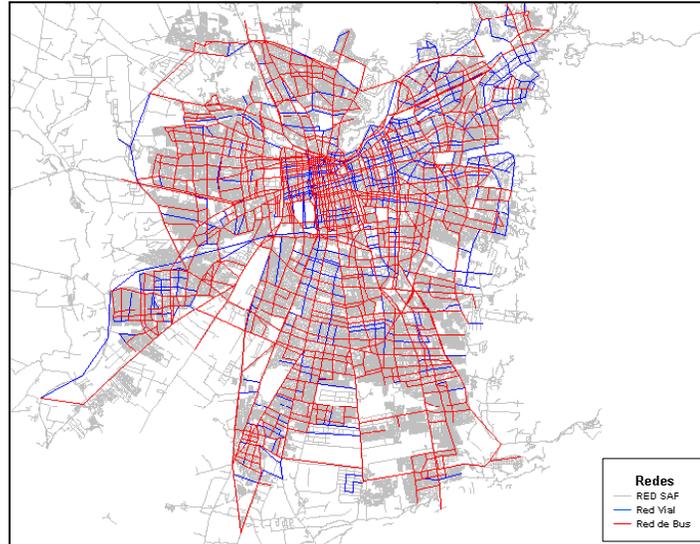
### **4.3 Redes de Transporte Público**

Las redes de transporte público consideradas para efectos del presente estudio corresponden a los siguientes modos puros: Bus, Metro y Taxicolectivo. Las redes para los viajes en modos combinados en transporte público consideran superposiciones de las siguientes redes: Bus-Metro y Taxicolectivo-Metro.

#### **4.3.1 Red de Servicios de Buses**

La red de servicios de buses de Santiago está conformada por la totalidad de servicios de Buses que operaban el año 2001 en la capital, ya sean estos pertenecientes a recorridos licitados como no licitados. La red de bus modelada abarca 2.154 kilómetros y considera 739 líneas unidireccionales; de ellos 574 son recorridos regulares de bus, 48 son recorridos de metro-bus, y 117 corresponden a servicios expresos y recorridos locales. En la Figura 4.2 se muestra la cobertura correspondiente a la red de buses en Santiago en el año base.

**Figura 4.2**  
**Cobertura de la Red de Buses Modelada en ESTRAUS**



**Tabla 4.3**  
**Resumen de Características Topológicas de la Red de Buses**

Variable	Red Punta Mañana	Red Fuera de Punta
Km de Red (cobertura espacial)	2.154	2.095
Nº de Líneas	739	739
Nº de Arcos	4.143	4.065
Nº de Nodos-Paradero	1.244	1.243

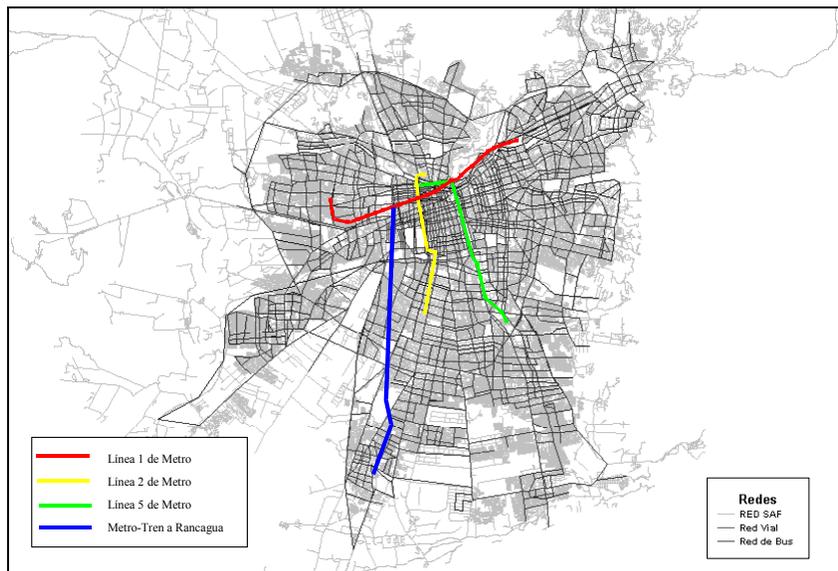
### 4.3.2 Red de Metro

La red de Metro de Santiago consideró la cobertura existente al momento de realizar la EOD-2001: Línea 1 (entre Escuela Militar y San Pablo), Línea 2 (entre Lo Ovalle y Cal y Canto) y Línea 5 (entre Bellavista de La Florida y Santa Ana). No obstante, para efectos de modelación, la red de Metro incorporó el tramo urbano del servicio de Metro-Tren a Rancagua, que cubre entre Alameda y Nos.

**Tabla 4.4**  
**Resumen de Características Topológicas de la Red de Metro**

Variable	Red Punta Mañana	Red Fuera de Punta
Km de Red	69	69
Nº de Líneas	3	3
Nº de Estaciones	63	63

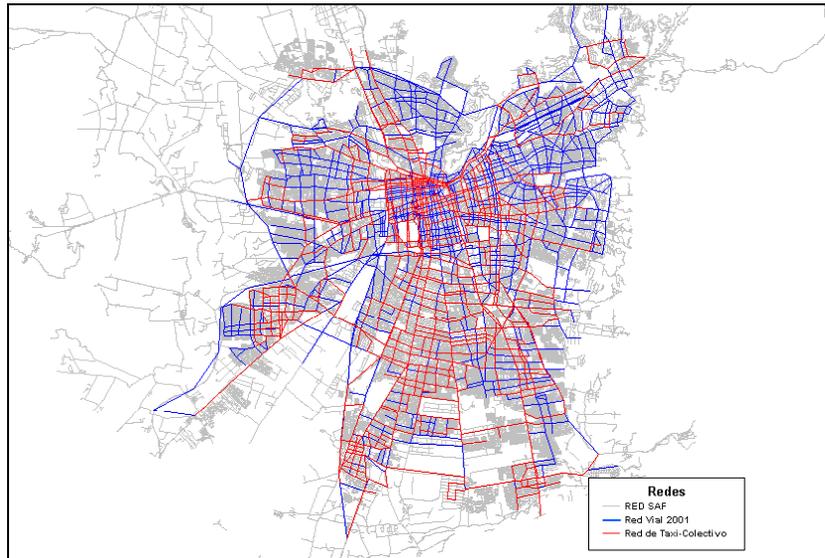
**Figura 4.3**  
**Cobertura de la Red de Metro Modelada en ESTRAUS**



### 4.3.3 Red de Servicios de Taxicolectivos

El total de servicios detectados en el estudio fue de 686. De estos servicios 412 se clasifican como troncales y el resto (274) son variantes de ellos. En la siguiente Figura se presenta la red de taxi-colectivo observada para la ciudad de Santiago:

**Figura 4.4**  
**Cobertura de la Red de Taxicolectivos Modelada en ESTRAUS**



**Tabla 4.5**  
**Resumen de Características Topológicas de la Red de Taxicolectivos**

Variable	Red Punta Mañana	Red Fuera de Punta
Km de Red (cobertura espacial)	1.191	1.156
Nº de Líneas	444	444
Nº de Arcos	2.455	2.396
Nº de Nodos-Paradero	716	716

## 5 RESULTADOS GENERALES DE LA CALIBRACIÓN

A continuación se reportan los resultados más relevantes de la calibración del modelo ESTRAUS, particularmente en lo referente a la calibración de redes y modelos de demanda. **Los resultados reportados corresponden al período punta mañana en la modalidad D-PM-A (ver 2.1.1)**, ya que esta ha sido la tradicionalmente utilizada en la evaluación de proyectos de transporte en Santiago. Se reportan las generaciones y atracciones de viaje por propósito a nivel comunal, y los principales resultados de ajuste en las distintas redes, así como también de Partición Modal, Distribución; adicionalmente, se reportan también los perfiles de carga de las Líneas de Metro.

Es importante destacar que la calibración de los distintos modelos de demanda para el período punta mañana (Generación y Atracción, Distribución y Partición Modal), se realizó a base de información de viajes para un lapso de 2 horas (7:15 a 9:15 hrs). Para el período fuera de punta, el lapso fue de 10:00 a 12:00 hrs. Los valores correspondientes a los períodos de 2 horas fueron ajustados mediante factores específicos obtenidos de la EOD-2001 para llevarlos a valores horarios usados por el modelo ESTRAUS.

### 5.1 Generación y Atracción de Viajes

Como ya se mencionó, la construcción de los modelos de Generación y Atracción de viajes para la predicción se basó en el uso de información de la EOD-2001 para viajes en día hábil entre las 7:15 y las 9:15 hrs. De esta forma, se dispuso de una mayor cantidad de información para la construcción de los distintos modelos de demanda. Sin embargo, la simulación del período punta mañana del año 2001 consideró los viajes entre las 7:30 y 8:30 hrs.

La calibración de los modelos de Generación y Atracción de viajes combina la técnica de Análisis de Clasificación Múltiple (tasas ACM) modelos de Regresión Lineal Múltiple (RLM). Se calibró modelos específicos según:

## EJECUTIVO

- i. Tipo de viaje y enfoque de modelación: basado en el hogar de ida o BHI (ACM), basado en el hogar de retorno o BHR (RLM) y no basado en el hogar o NBH (RLM).
- ii. Propósito de viaje: trabajo, estudio básica, estudio media y superior, y otros.
- iii. Período del día: punta mañana y fuera de punta.

### 5.1.1 Tasas ACM

En la Tabla 5.1 se presenta el total de viajes en el período punta mañana para los distintos propósitos y tipos, a su vez, la Tabla 5.2 muestra los viajes generados para el período fuera de punta.

**Tabla 5.1**  
**Resumen de Viajes Generados. 07:15-09:15**

Tipo de viaje	Trabajo		Estudio 1		Estudio 2		Otro	
	Viajes	%	Viajes	%	Viajes	%	Viajes	%
bhi	789,290	90.8%	239,449	98.1%	299,045	98.7%	337,929	71.8%
bhr	2,934	0.3%	346	0.1%	298	0.1%	98,861	21.0%
nbh	77,399	8.9%	4,312	1.8%	3,488	1.2%	34,055	7.2%
Total	869,623	100.0%	244,108	100.0%	302,831	100.0%	470,844	100.0%

**Tabla 5.2**  
**Resumen de Viajes Generados. 10:00-12:00**

Tipo de viaje	Trabajo		Estudio		Otro	
	viajes	%	viajes	%	viajes	%
bhi	92,408	40.8%	28,528	88.3%	440,500	50.6%
bhr	3,992	1.8%	0	0.0%	288,384	33.1%
nbh	130,107	57.4%	3,775	11.7%	142,117	16.3%
Total	226,507	100.0%	32,303	100.0%	871,001	100.0%

Las Tablas y Figuras siguientes presentan los modelos ACM seleccionados correspondientes a los distintos propósitos en punta mañana y fuera de punta.

**Tabla 5.3**  
**Modelo de Tasa ACM, Punta Mañana: 7:15-9:15, Propósito Trabajo,**  
**Moneda (\$) de Noviembre de 2001**

Ingreso del hogar		Número de autos			Total
Rango	Ingreso (\$)	sin auto	1 auto	2 o más	
Bajo	0 – 148.226	0.0920	0.2566	0.4340	0.1673
Medio-Bajo	148.226 – 296.452	0.3013	0.4659	0.6433	0.3766
Medio	296.452 – 592.904	0.5526	0.7172	0.8946	0.6279
Medio-Alto	592.904 – 1.185.808	0.8104	0.9750	1.1524	0.8858
Alto	1.185.808 ó más	0.6977	0.8623	1.0397	0.7731
Total		0.4517	0.6163	0.7937	0.5271

**Tabla 5.4**  
**Modelo de Tasa ACM, Punta Mañana: 7:15-9:15, Propósito Estudio-1 (Básica),**  
**Moneda (\$) de Noviembre de 2001**

Ingreso del hogar		Número de autos			Total
Rango	Ingreso (\$)	sin auto	1 auto	2 o más	
Bajo	0 – 148.226	0.0837	0.1512	0.1845	0.1116
Medio-Bajo	148.226 – 296.452	0.1144	0.1819	0.2152	0.1422
Medio	296.452 – 592.904	0.1437	0.2112	0.2446	0.1716
Medio-Alto	592.904 – 1.185.808	0.1187	0.1861	0.2195	0.1465
Alto	1.185.808 ó más	0.2769	0.3444	0.3778	0.3048
Total		0.1320	0.1995	0.2328	0.1599

**Tabla 5.5**  
**Modelo de Tasa ACM, Punta Mañana: 7:15-9:15, Propósito Estudio-2 (Media y Superior),**  
**Moneda (\$) de Noviembre de 2001**

Ingreso del hogar		Número de autos			Total
Rango	Ingreso (\$)	sin auto	1 auto	2 o más	
Bajo	0 – 148.226	0.0678	0.1491	0.2670	0.1073
Medio-Bajo	148.226 – 296.452	0.1414	0.2227	0.3407	0.1810
Medio	296.452 – 592.904	0.1872	0.2685	0.3864	0.2267
Medio-Alto	592.904 – 1.185.808	0.1817	0.2630	0.3810	0.2213
Alto	1.185.808 ó más	0.2771	0.3584	0.4763	0.3166
Total		0.1602	0.2414	0.3594	0.1997

**Tabla 5.6**  
**Modelo de Tasa ACM, Punta Mañana: 7:15-9:15, Propósito Otros,**  
**Moneda (\$) de Noviembre de 2001**

Ingreso del hogar		Número de autos			Total
Rango	Ingreso (\$)	sin auto	1 auto	2 o más	
Bajo	0 – 148.226	0.1291	0.2354	0.3274	0.1760
Medio-Bajo	148.226 – 296.452	0.1435	0.2498	0.3418	0.1904
Medio	296.452 – 592.904	0.1764	0.2826	0.3747	0.2233
Medio-Alto	592.904 – 1.185.808	0.1806	0.2869	0.3790	0.2275
Alto	1.185.808 ó más	0.4157	0.5220	0.6141	0.4627
Total		0.1788	0.2850	0.3771	0.2257

**Tabla 5.7**  
**Modelo de Tasa ACM Fuera de Punta: 10:00 a 12:00 hrs, Propósito Trabajo,**  
**Moneda (\$) de Noviembre de 2001**

Ingreso del hogar		Número de autos			Total
Rango	Ingreso (\$)	sin auto	1 auto	2 o más	
Bajo	0 – 148.226	0.0053	0.0428	0.0822	0.0224
Medio-Bajo	148.226 – 296.452	0.0282	0.0657	0.1051	0.0453
Medio	296.452 – 592.904	0.0577	0.0952	0.1346	0.0748
Medio-Alto	592.904 – 1.185.808	0.0596	0.0971	0.1365	0.0767
Alto	1.185.808 ó más	0.1085	0.1460	0.1854	0.1256
Total		0.0446	0.0821	0.1215	0.0617

**Tabla 5.8****Modelo de Tasa ACM Fuera de Punta: 10:00 a 12:00 hrs., Propósito Estudio (Básica, Media y Superior), Moneda (\$) de Noviembre de 2001**

Ingreso del hogar		Número de autos			Total
Rango	Ingreso (\$)	sin auto	1 auto	2 o más	
Bajo	0 – 148.226	0.0012	0.0082	0.0631	0.0080
Medio-Bajo	148.226 – 296.452	0.0000	0.0063	0.0612	0.0061
Medio	296.452 – 592.904	0.0106	0.0177	0.0726	0.0175
Medio-Alto	592.904 – 1.185.808	0.0355	0.0425	0.0974	0.0423
Alto	1.185.808 ó más	0.0450	0.0521	0.1069	0.0518
Total		0.0122	0.0193	0.0741	0.0191

**Tabla 5.9****Modelo de Tasa ACM Fuera de Punta: 10:00 a 12:00 hrs., Propósito Otros, Moneda (\$) de Noviembre de 2001**

Ingreso del hogar		Número de autos			Total
Rango	Ingreso (\$)	sin auto	1 auto	2 o más	
Bajo	0 – 148.226	0.1671	0.2968	0.4597	0.2362
Medio-Bajo	148.226 – 296.452	0.1883	0.3179	0.4809	0.2513
Medio	296.452 – 592.904	0.2597	0.3894	0.5523	0.3257
Medio-Alto	592.904 – 1.185.808	0.2506	0.3802	0.5432	0.3123
Alto	1.185.808 ó más	0.3988	0.5285	0.6914	0.4584
Total		0.2384	0.3626	0.5256	0.2975

**5.1.2 Modelos de RLM**

Los resultados de esta calibración son buenos. En términos generales, se puede indicar que los modelos de Regresión Lineal Múltiple calibrados para representar la generación de viajes no basados en el hogar (nbh) y basados en el hogar de retorno (bhr), son robustos, obteniéndose coeficientes de correlación múltiple adecuados. En la Tabla 5.10 los modelos obtenidos.

**Tabla 5.10****Modelos de Generación de Viajes (bhr + nbh), Período Punta, sin Intercepto**

<b>Variable Explicativa</b>	<b>TRABAJO</b>	<b>ESTUDIO-1</b>	<b>ESTUDIO-2</b>	<b>OTROS</b>
Superficie Construida de Servicios (m2)	0,002			
Superficie Construida de Educación (m2)		0,001		
Matriculas Totales (matric.)	0,042			
Superficie Construida de Educación (m2)			0,001	
Número de Hogares (hogares)				0,047
Viajes al Trabajo, bhr+nbh, P. Mañana (viajes)				0,796
D2_TRA	0,002			
D2_ES1		0,004		
D3_ES2			0,003	
D4_ES2			0,001	
Coef. de Regresión Múltiple Ajustado (%)	94,03%	81,70%	90,33%	95,37%
Número de Observaciones	37	37	37	37

Donde:

D2\_TRA: 1\*SCON\_SERV para las comunas Providencia, Las Condes y Ñuñoa, 0 en otro caso.

D2\_ES1: 1\*SCON\_EDUC para las comunas Conchalí, Lo Prado, Estación Central o La Reina, 0 en otro caso.

## EJECUTIVO

D3\_ES2: 1\*SCON\_EDUC para las comunas Providencia y Vitacura, 0 en otro caso.

D4\_ES2: 1\*SCON\_EDUC para las comunas Las Condes y La Cisterna, 0 en otro caso.

**Tabla 5.11**  
**Modelos de Generación de Viajes (bhr +nbh), Fuera de Punta, sin**  
**Intercepto**

Variable Explicativa	TRABAJO	ESTUDIO	OTROS
Superficie Construida de Servicios (m2)	0,008		
Superficie Construida de Comercio (m2)			0,016
Superficie Construida de Educación (m2)		0,001	
Superficie Construida Habitacional (m2)			0,001
Superficie Total Construida (m2)	0,0005		
Matriculas Totales (matric.)			0,120
D3_TRA	0,017		
D4_TRA	-0,010		
D2_EST		0,004	
D1_OTR			0,031
D2_OTR			-0,014
Coef. de Regresión Múltiple Ajustado (%)	98,78%	46,89%	99,15%
Número de Observaciones	37	37	37

Donde:

D3\_TRA: 1\*SCON\_SERV para las comunas Quilicura y Maipu, 0 en otro caso.

D4\_TRA: 1\*SCON\_SERV para las comunas Independencia y Puente Alto, 0 en otro caso.

D2\_EST: 1 para las comunas Ñuñoa o Lo Barnechea, 0 en otro caso.

D1\_OTR: 1\*SCON\_COM para las comunas San Bernardo, Puente Alto y Estación Central, 0 en otro caso.

D2\_OTR: 1\*SCON\_COM para las comunas Recoleta, Peñalolen y Ñuñoa, 0 en otro caso.

**Tabla 5.12**  
**Modelos de Atracción de viajes (bhi+ nbh), Punta de la Mañana, sin Intercepto**

Variable Explicativa	TRABAJO	ESTUDIO-1	ESTUDIO-2	OTROS
Superficie Construida de Servicios (m2)	0,0489			
Superficie Construida de Industrias (m2)	0,0047			
Superficie Construida Habitacional (m2)	0,0034			
Superficie Total Construida (m2)		0,0007		
Matriculas de Enseñanza Básica (matric.)		0,1616		
Superficie Construida Habitacional (m2)				0,0016
Superficie Construida de Educación (m2)				0,0343
Número de Hogares (hogares)			0,0658	
Matriculas de Enseñanza Media (matric.)			0,4326	
Matriculas de Enseñanza Superior (matric.)			0,5082	
Viajes al Trabajo, bhr+nbh, P. Mañana (viajes)				
Coef. de Regresión Múltiple Ajustado (%)	99,64%	95,90%	98,82%	97,42%
Número de Observaciones	37	37	37	37

**Tabla 5.13**  
**Modelos de Atracción de viajes (bhi + nbh), Fuera de Punta sin Intercepto**

Variable Explicativa	TRABAJO	ESTUDIO	OTROS
Superficie Construida de Comercio (m2)			0,0147
Superficie Total Construida (m2)			0,0033
Matriculas de Enseñanza Básica (matric.)			0,0527
Matriculas de Enseñanza Superior (matric.)		0,1611	
Viajes al Trabajo, bhl+nbh, P. Mañana (viajes)	0,2811		
D3_TRA	0,1261		
D4_TRA	-0,1193		
D3_EST		0,2273	
Coef. de Regresión Múltiple Ajustado (%)	99,30%	98,64%	98,50%
Número de Observaciones	37	37	37

Donde:

D3\_TRA: 1\*A\_TRA\_AM para las comunas Est. Central, La Florida, Recoleta o Vitacura, 0 en otro caso.

D4\_TRA: 1\*A\_TRA\_AM para las comunas Quilicura o Ñuñoa, 0 en otro caso.

D3\_EST: 1\*MAT\_SUP para las comunas Las Condes o Macul, 0 en otro caso.

## 5.2 Calibración de la Red Vial Estratégica

Dentro de ESTRAUS, particularmente en el módulo de asignación, el tiempo de viaje en transporte privado ( $t_a$ ) dentro de un arco  $a$  en función del flujo del arco se definió como una función tipo BPR (**B**ureau of **P**ublic **R**oads) de la forma:

$$t_a = t_a^0 \left( 1 + \alpha \left( \frac{f_a}{k_a} \right)^\beta \right) \quad (1)$$

donde:

$t_a^0$ : tiempo de viaje a flujo libre en el arco  $a$ .

$f_a$ : flujo total en el arco  $a$ .

$k_a$ : capacidad del arco  $a$ .

$\alpha, \beta$ : parámetros a calibrar.

La función (1) es monótona creciente estricta, puesto que la totalidad de sus parámetros son positivos y además  $\beta > 1$ . Esta propiedad permite aplicar las condiciones de optimalidad a la función objetivo que considera ESTRAUS asegurando la unicidad de la solución. En la siguiente Tabla se reportan los valores obtenidos para los parámetros de las funciones BPR en punta mañana y fuera de punta:

**Tabla 5.14**  
**Parámetros BPR por Categoría de Arco Período y Período**

CATEGORIA DE ARCO	PUNTA MAÑANA		FUERA DE PUNTA	
	ALFA	BETA	ALFA	BETA
1	0,3949	3.2089	0,5136	3,2323
2	0,0675	6.9158	0,0675	6,2049
3	1,4470	7.6440	1,2220	7,7440
4	1,5715	2.9573	1,2043	2,9573
5	1,0356	2.8073	1,0168	2,9573
Correlación (*)	81,1%		61,2%	

(\*) entre flujos modelados y observados.

### 5.3 Calibración de Redes de Transporte Público

La etapa de la calibración consistió básicamente en revisar detalladamente la accesibilidad de las zonas. Para esto, se utilizó como herramienta la actual interfaz gráfica del modelo ESTRAUS. Los parámetros de la función de costo generalizado también se calibraron mediante el método de Hooke & Jeeves, en el contexto del Estudio “Análisis Modernización de Transporte Público, V ETAPA” (MIDEPLAN-SECTRA, 2003).

Los parámetros de tiempo de viaje, caminata y espera considerados para la asignación son respectivamente:  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 3,63$  y  $\gamma = 1,93$ . Las funciones de costo generalizado ( $c_s$ ) de las secciones de ruta de la red de Bus presentan la siguiente forma funcional general:

$$c_s = t_v + 1,93 \cdot \underbrace{\left[ \frac{1,0}{f_s} + 4,75 \cdot \left( \frac{V_s + \tilde{V}_s}{K_s} \right)^{5,81} \right]}_{t_e} + 3,63 \cdot t_c + \frac{1}{3,62} \cdot \text{tarifa} \quad (2)$$

donde:

$t_v$ : tiempo de viaje en vehículo (en minutos).

$t_e$ : tiempo de espera en paradero (en minutos).

$t_c$ : tiempo de acceso y egreso al servicio (en minutos).

$f_s$ : frecuencia nominal (buses por minuto) de la sección de ruta  $s$ .

$V_s$ : flujo de pasajeros (pasajeros/hora) que viajan entre el nodo inicial y final de la sección de ruta  $s$ .

$\tilde{V}_s$ : flujo de pasajeros (pasajeros/hora) que compite con  $V_s$  por la capacidad de las líneas que pertenecen a la sección de ruta  $s$ .

$K_s$ : capacidad (pasajeros/hora) de la sección de ruta  $s$ .

$\text{tarifa}$ : costo monetario (\$) de acceder a la sección de ruta  $s$ .

Los parámetros numéricos de la expresión (2) fueron extraídos del Estudio de Diseño (Análisis Modernización Transporte Público, V ETAPA, Volumen II, Capítulo 6; SECTRA 2003). Estos corresponden a los valores más confiables para efectos de reproducción de perfiles de carga, ya que han sido estimados y validados hace poco tiempo. Por otra parte, la modelación conjunta en el contexto de una red multimodal (Bus + Metro), la constante de atractividad del Metro, a definir dentro de los arcos de acceso, es de 46,9.

#### **5.4 Calibración Simultánea de Modelos de Distribución y Partición Modal**

La metodología se basó en resolver un problema de optimización bi-nivel, en el cual se maximiza la función de verosimilitud (nivel superior) sujeto a restricciones asociadas al equilibrio en el sistema de transporte. Una particularidad de esta metodología es que existe consistencia entre los parámetros considerados a nivel de Asignación en las distintas redes (tiempo de acceso, espera, viaje, costo, etc.) y los considerados en el modelo de Partición Modal, a partir de los cuales se obtienen también las expresiones de costo generalizado del modelo de Distribución.

### 5.4.1 Modelos Definitivos Para 11 Modos

En las siguientes Tablas se reportan los modelos de demanda definitivos utilizados para la validación de ESTRAUS en Punta Mañana y Fuera de Punta. Particularmente, se reportan los valores de los parámetros definitivos y su significancia estadística, para los distintos propósitos considerados en cada período. Debe recordarse que en Punta Mañana se consideraron 4 propósitos de viaje: Trabajo, Estudio-1, Estudio-2 y Otros; para Fuera de Punta, se consideraron sólo 3 propósitos: Trabajo, Estudio y Otros. Estos modelos, específicamente para el propósito Trabajo, difieren marginalmente de los expuestos en los Capítulos previos debido a que **se incorporó en la calibración simultánea la variable asociada al precio de los terrenos**, que se utilizó como proxy del costo por estacionamiento. Por otra parte, las variables consideradas fueron todas lineales (requisito del modelo ESTRAUS), estratificando según rango de ingreso de los viajeros mediante variables dummy en el costo de viaje o mediante el uso de la variable costo dividido por ingreso (cosing).

En la Tabla 5.15 se exponen los modelos de demanda para el período Punta Mañana y en la Tabla 5.16 para el período Fuera de Punta. Debe notarse que **para el caso de Fuera de Punta, se corrigieron las constantes** modales para mejorar la reproducción de la Partición Modal. Cada parámetro es especificado de manera genérica como  $\theta_{\text{modo}}$ , corresponde a la constante modal específica del “modo”,  $\theta_{\text{tvmodo}}$  corresponde al parámetro del tiempo de viaje del “modo”,  $\theta_{\text{cost}}$  al parámetro del costo (genérico),  $\theta_{\text{modo}}$  es el parámetro de las variables dummy de ingreso,  $\theta_{\text{cosing}}$  es el parámetro de la variable “cosing” y  $\theta_{\text{cost-estac}}$  es el parámetro de la proxy de estacionamiento. El parámetro  $\Phi$  es el del modelo de distribución.

**Tabla 5.15**  
**Modelos de Demanda Definitivos Punta Mañana 2001 (7:15 – 9:15 hrs.)**

PARÁMETRO	TRABAJO		ESTUDIO-1		ESTUDIO-2		OTROS	
	VALOR	TEST-T	VALOR	TEST-T	VALOR	TEST-T	VALOR	TEST-T
$\theta_{cam}$	0.9616	6.5690	0.8291	9.3990	-0.6959	-7.1400	2.2644	16.3980
$\theta_{ach}$	-1.3064	-9.0324	-	-	-3.3313	10.7620	0.2597	1.1760
$\theta_{aac}$	-2.2195	-14.1708	-1.6250	-3.6020	-2.7697	11.0270	-1.1588	-5.0040
$\theta_{met}$	0.7738	2.9792	0.0730	0.1990	0.6225	3.9610	1.2542	1.9520
$\theta_{taxi}$	-2.3393	-13.8120	-	-	-6.0008	-9.9520	-1.3049	-7.6870
$\theta_{txc}$	-0.2506	-1.1010	-	-	-4.2687	15.0560	0.1809	0.6700
$\theta_{ach-met}$	-3.6193	-4.5308	-	-	-4.8093	-7.4900	0.7776	0.5130
$\theta_{aac-met}$	-2.9931	-5.4368	-	-	-5.2780	10.5840	-	-
$\theta_{bus-met}$	-1.9898	-7.3200	-3.4512	-3.4190	-1.4834	10.3050	-2.5649	10.8720
$\theta_{txc-met}$	-1.2346	-3.1770	-	-	-3.5624	-9.1740	-1.6530	-1.9570
$\theta_{cost}$	-0.0036	-7.8240	-	-	-	-	-0.0015	-6.5240
$\theta_{d2}$	0.0011	2.4650	-	-	-	-	-	-
$\theta_{d3}$	0.0016	3.3518	-	-	-	-	0.0002	1.0440
$\theta_{d4}$	0.0020	4.2840	-	-	-	-	0.0002	0.7890
$\theta_{d5}$	0.0026	5.6916	-	-	-	-	0.0002	0.9280
$\theta_{autos}$	1.3680	14.3419	2.4544	6.1250	1.0937	6.7890	1.3481	8.0320
$\theta_{cam}$	-0.0673	-16.9640	-0.0217	-5.7710	-0.0222	10.5250	-0.0618	16.3860
$\theta_{tvach}$	-0.0091	-2.2531	-	-	-0.0222	10.5250	-0.0283	-4.1980
$\theta_{tvaac}$	-0.0700	-16.6548	-0.0217	-5.7710	-0.0222	10.5250	-0.0459	-7.8970
$\theta_{tvbus}$	-0.0182	-12.9124	-0.0217	-5.7710	-0.0222	10.5250	-0.0091	-4.3450
$\theta_{tvtxc}$	-0.0548	-10.1413	-	-	-0.0222	10.5250	-0.0484	-6.7480
$\theta_{tvmet}$	-0.0216	-5.9911	-0.0217	-5.7710	-0.0222	10.5250	-0.0284	-2.9920
$\theta_{vtaxi}$	-0.0091	-2.2531	-	-	-0.0222	10.5250	-0.0283	-4.1980
$\theta_{tvach-met}$	-0.0256	-1.3791	-	-	-0.0222	10.5250	-0.1412	-4.8050
$\theta_{tvaac-met}$	-0.0279	-3.2743	-	-	-0.0222	10.5250	-0.1412	-4.8050
$\theta_{tvbus-met}$	-0.0106	-3.9054	-0.0217	-5.7710	-0.0222	10.5250	-0.0091	-4.3450
$\theta_{tvtxc-met}$	-0.0183	-4.0340	-	-	-0.0222	10.5250	-0.0484	-6.7480

## EJECUTIVO

$\theta_{\text{cosing}}$	-	-	-	-	-0.0134	-2.7490	-	-
$\theta_{\text{cost-estac}}$	-0.0001	-5.2000	-	-	-	-	-	-
$\Phi$	0.4601	15.3431	0.5032	3.2900	0.5814	8.4720	0,6256	13.2660

**Tabla 5.16**  
**Modelos de Demanda Definitivos Fuera de Punta 2001 (10:00 – 12:00 hrs.)**

PARÁMETRO	TRABAJO		ESTUDIO		OTROS	
	VALOR	TEST-T	VALOR	TEST-T	VALOR	TEST-T
$\theta_{\text{cam}}$ (*)	3.6414	13.1895	2.7197	2.675	1.9242	26.906
$\theta_{\text{ach}}$ (*)	-0.1526	-0.126	-2.4544	-3.975	-1.4423	-8.845
$\theta_{\text{aac}}$ (*)	-1.4153	-3.5206	-2.3776	-3.757	-1.3522	-14.406
$\theta_{\text{met}}$ (*)	2.8943	2.6954	0.7539	2.618	0.5867	2.48
$\theta_{\text{taxi}}$ (*)	-0.8448	-6.1586	-1.18425	-2.372	-1.9906	-16.778
$\theta_{\text{txc}}$ (*)	-0.4666	-0.0848	-2.6799	-6.254	0.4952	2.322
$\theta_{\text{ach-met}}$ (*)	-5.3547	-4.4962	-	-	-1.1823	-0.313
$\theta_{\text{aac-met}}$ (*)	-2.6026	-2.2853	-	-	0.6177	-0.249
$\theta_{\text{bus-met}}$ (*)	-2.1201	-10.2825	-1.6481	-5.774	1.8778	-18.394
$\theta_{\text{txc-met}}$ (*)	-0.9721	-0.2362	-3.0327	-5.389	-0.0801	-1.84
$\theta_{\text{bus}}$ (*)	-0.0289	-	-0.06032	-	0.0987	-
$\theta_{\text{cost}}$	-	-	-0.0007	-1.6710	-0.0018	12.5490
$\theta_{\text{d2}}$	-	-	-	-	-	-
$\theta_{\text{d3}}$	-	-	-	-	0.0008	5.6340
$\theta_{\text{d4}}$	-	-	-	-	0.0010	6.3940
$\theta_{\text{d5}}$	-	-	-	-	0.0013	6.8250
$\theta_{\text{autos}}$	1.0363	5.9999	1.3447	4.2690	1.0912	12.9270
$\theta_{\text{cam}}$	-0.1136	12.7663	-0.0650	-3.2830	-0.0611	30.7890
$\theta_{\text{tvach}}$	-0.0104	-0.9500	-0.0472	-2.1930	-0.0527	12.4480
$\theta_{\text{tvaac}}$	-0.0624	-3.6901	-0.0472	-2.1930	-0.1407	-2.6910
$\theta_{\text{tvbus}}$	-0.0050	-1.0905	-0.0014	-0,2180	-0.0170	13.3630
$\theta_{\text{tvtxc}}$	-0.0312	-5.6125	-0.0014	-0,2180	-0.0536	15.2350
$\theta_{\text{tvmet}}$	-0.0424	-3.0704	-0.0014	-0,2180	-0.0278	-6.6740
$\theta_{\text{tvtaxi}}$	-0.0104	-0.9500	-0.0472	-2.1930	-0.0527	12.4480
$\theta_{\text{tvach-met}}$	-0.0104	-0.9500	-0.0472	-2.1930	-0.1407	-2.6910
$\theta_{\text{tvaac-met}}$	-0.0624	-3.6901	-0.0472	-2.1930	-0.1407	-2.6910
$\theta_{\text{tvbus-met}}$	-0.0050	-1.0905	-0.0014	-0,2180	-0.0170	13.3630
$\theta_{\text{tvtxc-met}}$	-0.0312	-5.6125	-0.0014	-0,2180	-0.0536	15.2350

## EJECUTIVO

$\theta_{\text{cosing}}$	-0.0339	-3.0390	-	-	-	-
$\theta_{\text{cost-estac}}$	-0.0002	-4.1000	-	-	-	-
$\Phi$	0.6461	4.3836	1.0000	1.1880	0,7232	30.3780

(\*): corresponden a los valores ajustados.

#### 5.4.2 Modelos Definitivos Para 6 Modos (Red Multimodal)

En las siguientes Tablas se reportan los modelos de demanda definitivos utilizados para la validación de ESTRAUS en Punta Mañana y Fuera de Punta, en la modalidad con Red Multimodal. Se reportan los valores de los parámetros definitivos y su significancia estadística, para los distintos propósitos considerados en cada período.

En la Tabla 5.17 se exponen los modelos de demanda para el período Punta Mañana y en la Tabla 5.18 para el período Fuera de Punta.

**Tabla 5.17**  
**Modelos de Demanda Definitivos Punta Mañana 2001 (7:15 – 9:15 hrs.)**

PARÁMETRO	TRABAJO		ESTUDIOS-1		ESTUDIOS-2		OTROS	
	VALOR	TEST T	VALOR	TEST T	VALOR	TEST T	VALOR	TEST T
$\theta_{\text{cam}}$	1,39800	9,60000	-3,28100	-5,40000	1,47100	7,20000	2,48700	17,10000
$\theta_{\text{ach}}$	-0,77330	-5,60000	-	-	-2,22700	-7,10000	0,09736	0,40000
$\theta_{\text{aac}}$	-2,32500	-15,80000	-6,15100	-8,40000	-1,80900	-7,50000	-1,52800	-6,30000
$\theta_{\text{taxi}}$	-3,34300	-17,80000	-	-	-4,53100	-10,70000	-1,57000	-9,20000
$\theta_{\text{txc}}$	0,14690	0,70000	-	-	-3,36900	-18,20000	-1,51400	-14,80000
$\theta_{\text{cost}}$	-	-	-0,02560	-10,80000	-	-	-0,001619	-4,90000
$\theta_{\text{d2}}$	-	-	-	-	-	-	0,0000701	0,20000
$\theta_{\text{d3}}$	-	-	-	-	-	-	0,0004564	1,40000
$\theta_{\text{d4}}$	-	-	-	-	-	-	0,000718	2,00000
$\theta_{\text{d5}}$	-	-	-	-	-	-	0,00102	2,80000
$\theta_{\text{autos}}$	1,43100	14,70000	1,94900	5,00000	1,08800	6,90000	1,45900	8,50000
$\theta_{\text{tcam}}$	-0,06084	-15,50000	-0,06023	-6,90000	-0,07265	-12,80000	-0,06742	-18,00000
$\theta_{\text{tvach}}$	-0,01423	-3,50000	-	-	-0,02571	-3,60000	-0,01014	-1,70000
$\theta_{\text{tvaac}}$	-0,01423	-3,50000	-0,06023	-6,90000	-0,02571	-3,60000	-0,01014	-1,70000
$\theta_{\text{tvbus}}$	-0,00310	-1,70000	-0,06023	-6,90000	-0,00757	-2,80000	-0,002434	-1,00000
$\theta_{\text{tvtxc}}$	-0,05769	-10,60000	-	-	-0,00757	-2,80000	-0,002434	-1,00000
$\theta_{\text{vtaxi}}$	-0,01423	-3,50000	-	-	-0,02571	-3,60000	-0,01014	-1,70000
$\theta_{\text{cosing}}$	-0,01689	-7,60000	-	-	-0,00926	-2,00000	-	-
$\theta_{\text{cost-estac}}$	-0,00009	-5,10000	-	-	-	-	-	-
$\Phi$	0,4601	-	0,5032	-	0,5814	-	0,6256	-

**Tabla 5.18**  
**Modelos de Demanda Definitivos Fuera de Punta 2001 (10:00 – 12:00 hrs.)**

PARÁMETRO	TRABAJO FP		OTROS		ESTUDIOS	
	VALOR	TEST T	VALOR	TEST T	VALOR	TEST T
$\theta_{cam}$	1,4220	7,2000	2,4910	28,6000	-0,5633	-2,8000
$\theta_{ach}$	-0,1631	-0,6000	-0,9592	-7,4000	-3,1330	-5,9000
$\theta_{aac}$	-2,1070	-7,3000	-1,4170	-10,1000	-3,1510	-5,7000
$\theta_{taxi}$	-1,4010	-6,8000	-2,3990	-19,5000	-2,6140	-5,7000
$\theta_{txc}$	0,3567	0,6000	0,4730	3,5000	-2,5380	-7,5000
$\theta_{cost}$	-	-	-	-	-0,0008	-2,5000
$\theta_{autos}$	0,9600	5,9000	1,0270	11,6000	1,0960	3,6000
$\theta_{vcam}$	-0,0625	-10,8000	-0,0662	-31,1000	-0,0082	-1,3000
$\theta_{vach}$	-0,0625	-10,8000	-0,0254	-4,7000	-0,0082	-1,3000
$\theta_{vaac}$	-0,0625	-10,8000	-0,0415	-7,0000	-0,0082	-1,3000
$\theta_{vtpub}$	-0,0165	-5,3000	-0,0061	-3,6000	-0,0082	-1,3000
$\theta_{vtxc}$	-0,0871	-5,7000	-0,04971	-13,6000	-0,0082	-1,3000
$\theta_{vtaxi}$	-0,0625	-10,8000	-0,0254	-4,7000	-0,0082	-1,3000
$\theta_{cosing}$	-0,0162	-4,2000	-0,01724	-8,8000	-	-
$\theta_{cost-estac}$	-0,0002	-4,6000	-	-	-	-
$\Phi$	0,6461	-	0,7272	-	0,9979	-

## 6 CALIBRACIÓN DEL MODELO CON ELECCIÓN DE HORARIO

El enfoque metodológico considerado, es capaz de conciliar adecuadamente el tipo de modelo a calibrar y la información efectivamente disponible para obtener una calibración adecuada, obteniendo un planteamiento consistente.

Si bien en un principio se pretendió calibrar los parámetros de los modelos de demanda con **elección de horario** a partir de los datos de la EOD-2001, el análisis detallado de dicha información imposibilita desarrollar dicho proceso, básicamente porque ella no contiene los elementos necesarios.

Complementariamente, esta empresa analizó la posibilidad de realización un experimento de preferencia declaradas (PD) de carácter complementario para modelar la elección de horario de las personas, dados algunos antecedentes existentes. Sin embargo, este presenta mínimas garantías de que dichos resultados puedan ser implementados a los modelos de demanda de ESTRAUS, ya que se detectan diferencias muy significativas en los valores de los parámetros de los modelos de PD en relación a aquellos calibrados con PR a partir de la EOD-2001 y que se implementarán en ESTRAUS. Es decir, los resultados obtenidos mediante PD no son internalizables (funcionales) en un modelo como es ESTRAUS.

Dado lo anterior, la mejor alternativa factible que permite obtener valores de los parámetros requeridos en el contexto de **ESTRAUS**, y dada la información disponible, corresponde a una en que la estimación de los parámetros específicos asociados a la elección de horario se realice de tal forma que:

- i. La realización de **viajes totales modelados** en los distintos períodos considerados sea lo más similar posible a la observada en la EOD-2001.
- ii. La **partición modal modelada** en cada período sea muy similar a la partición modal observada en la EOD-2001.

- iii. Los **perfiles de carga** modelados de las Líneas de la red de Metro en ambos períodos sea los más similar posible a los observados en la EOD de Metro.
- iv. Los **niveles de servicio medios del sistema** sean reproducidos en forma adecuada (para esto la EOD-2001 sí provee de cierta información). Naturalmente las características de tarifas (p.ej. metro) y otros elementos son propios de cada sub-período.

Para lograr los cuatro aspectos claves recién definidos, que corresponden a su vez a análisis de validación del modelo, se realizaron ajustes a los modelos de demanda obtenidos; es decir, para el mejor modelo obtenido para modelar el lapso punta mañana (7:30 – 8:30 hrs.) se le incorporará la potencialidad de elección horaria.

Este ajuste consideró la variación en las constantes modales específicas de cada uno de los modos definidos, dentro de los cuatro propósitos considerados. Es decir, se mantendrán los valores de los parámetros asociados a las variables explicativas para los modelos de demanda de ambos períodos, variando únicamente las constantes modales. Las constantes modales serán modificadas a partir de la siguiente expresión:

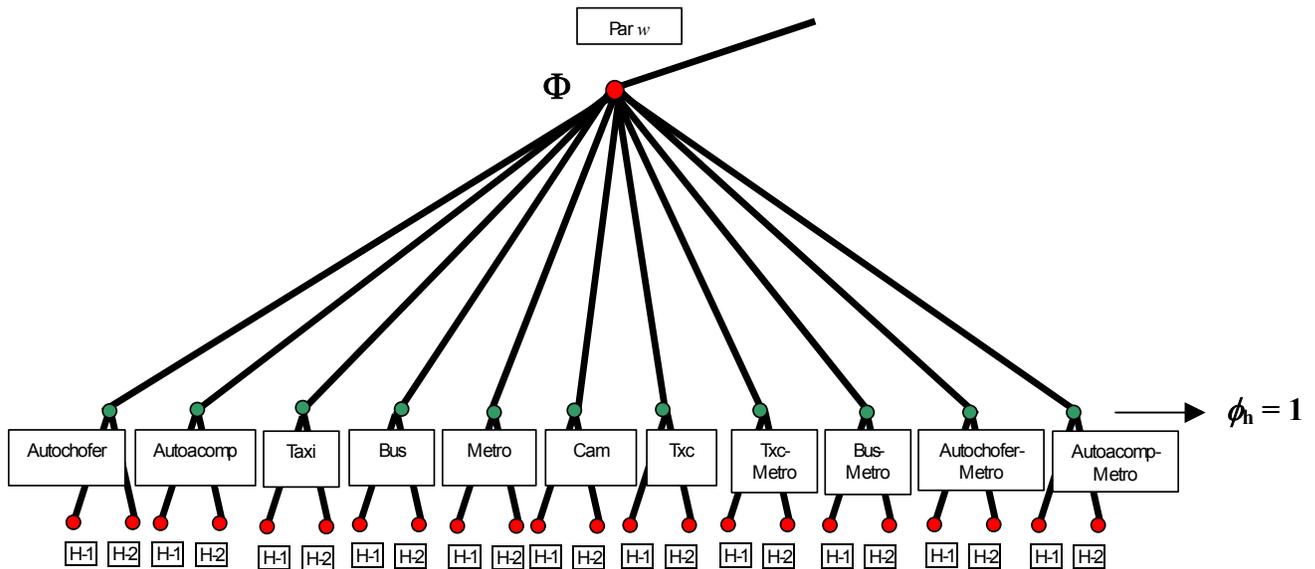
$$\theta_m^* = \theta_m - \ln\left(\frac{p_m}{P_m}\right) \quad (3)$$

donde  $\theta_m$  es la constante modal del modo  $m$  resultante del proceso de calibración,  $\theta_m^*$  es la constante modal corregida,  $p_m$  es la partición modal modelada y  $P_m$  es la partición modal observada del modo  $m$ .

De esta forma, aspectos relevantes como por ejemplo el valor subjetivo del tiempo de los distintos viajeros, se mantienen en esta nueva modalidad de operación de ESTRAUS, logrando además compatibilidad de versiones y resultados (con/sin elección horaria).

El ajuste realizado implica por lo tanto que los modelos de demanda (funciones de utilidad indirecta condicionada) para los distintos modos serán prácticamente las mismas entre ambos períodos, diferenciándose únicamente por la constante modal, que corresponden como ya se dijo al parámetro de ajuste del proceso (ver ecuación (3)). **Esto implica suponer un parámetro  $\phi_h = 1$  para la elección de horario, razón por la cual el modelo D-PM-EH-A es idéntico al modelo D-EH-PM-A.** Recordar que en la última versión de ESTRAUS no existe la modalidad PM-EH-A o EH-PM-A. En la Figura 6.1 se observa la estructura jerárquica de los modelos de demanda considerando elección de horario de viaje.

**Figura 6.1**  
**Estructura Jerárquica Para Elección de Horario**



En síntesis, cada modo de transporte (11 modos en el caso de los propósitos Trabajo, Otros y Estudio-2, 5 modos en Estudio-1) presenta una función de utilidad para cada período (H-1 y H-2) con los mismos parámetros en las variables explicativas, pero con una constante modal propia para cada período.

La búsqueda de los valores de las constantes modales se realizó mediante procesos iterativos a partir de (3), los que finalizaron cuando la capacidad reproductiva del modelo, en términos de número de viajes totales en cada horario, partición modal en cada horario y perfiles de carga del metro en cada horario fueron aceptables. Evidentemente, este enfoque requirió de la realización de un elevado número de simulaciones de ESTRAUS.

Es importante indicar que el resultado de este procedimiento es coherente con la aplicación computacional que implementa el modelo ESTRAUS. Detalles de esta pueden consultarse en estudio "Análisis de la Temporalidad de los Viajes". Finalmente, debe precisarse que **las redes del horario 1 (7:30-8:30) corresponden a las redes que fueron construidas específicamente para el período punta mañana, mientras que las redes del horario 2 (6:30-7:30) corresponden a las redes construidas para el período fuera de punta**; esta última simplificación se justifica dado la inexistencia de información para el horario 6:30-7:30.

En las siguientes Tablas se reportan las nuevas constantes modales, especificando las diferencias con las constantes modales originales, para los 2 horarios de modelación, para las modalidades D-PM-A con 11 modos y 6 modos de la red multimodal. Debe considerarse que los valores reportados han sido obtenidos de manera iterativa, ya que la ecuación (3) no considera los cambios en los niveles de servicio generados por cambios en las particiones modales, así como tampoco el efecto del parámetro  $\Phi$  de distribución.

**Tabla 6.1**  
**Constantes Modales Horario 1 D-PM-A 11 Modos (7:30 – 8:30 hrs.)**

PARÁMETRO	TRABAJO	ESTUDIO-1	ESTUDIO-2	OTROS
$\theta_{cam}$	0.9340	1.5864	0.2702	2.7508
$\theta_{ach}$	-0.7506	-	-3.3734	1.0366
$\theta_{aac}$	-1.3539	-1.0972	-2.2461	-0.3541
$\theta_{met}$	0.7923	0.3515	0.9432	0.5619
$\theta_{taxi}$	-1.5015	-	-4.9571	-0.6844
$\theta_{txc}$	0.1873	-	-2.7169	0.1784
$\theta_{ach-met}$	-2.4116	-	-5.3370	3.7084
$\theta_{aac-met}$	-2.0694	-	-3.8463	3.3563
$\theta_{bus-met}$	-1.9213	-3.2974	-1.0396	-2.4107
$\theta_{txc-met}$	-1.1512	-	-2.8929	-0.0140
$\theta_{bus}$	0.3105	0.5000	0.4601	0.1201

**Tabla 6.2**  
**Constantes Modales Horario 2 D-PM-A 11 Modos (6:30 – 7:30 hrs.)**

PARÁMETRO	TRABAJO	ESTUDIO-1	ESTUDIO-2	OTROS
$\theta_{cam}$	-0.2303	-2.7946	-3.2377	0.6502
$\theta_{ach}$	-2.0065	-	-6.1015	-1.0055
$\theta_{aac}$	-2.9200	-3.3497	-4.1148	-2.0941
$\theta_{met}$	-0.6704	-2.7851	-1.9683	-0.3759
$\theta_{taxi}$	-3.1060	-	-4.9210	-2.1109
$\theta_{txc}$	-2.0272	-	-5.3417	-0.8259
$\theta_{ach-met}$	-4.1931	-	-5.1163	0.7776
$\theta_{aac-met}$	-4.0318	-	-5.0328	-
$\theta_{bus-met}$	-2.9487	-2.3275	-2.0328	-3.4017
$\theta_{txc-met}$	-3.4623	-	-3.8502	-0.8657
$\theta_{bus}$	-0.3997	-1.4093	-0.8760	-1.2260

**Tabla 6.3**  
**Constantes Modales Horario 1 RMM (7:30 – 8:30 hrs.)**

PARÁMETRO	Ajustado	Ajustado	Ajustado	Ajustado
$\theta_{cam}$	1.7594	-3.1260	2.4230	3.0988
$\theta_{ach}$	-0.2104	-	-2.8672	0.8039
$\theta_{aac}$	-1.6687	-5.9514	-1.2491	-0.8113
$\theta_{taxi}$	-2.4626	-	-4.3262	-0.7487
$\theta_{txc}$	0.9833	-	-2.8193	-1.8257
$\theta_{pub}$	0.1058	2.1334	0.4429	0.1431

**Tabla 6.4**  
**Constantes Modales Horario 2 RMM (6:30 – 7:30 hrs.)**

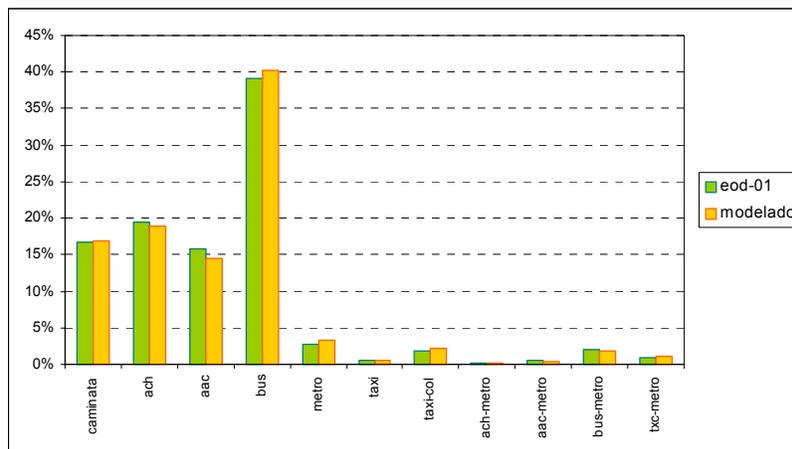
PARÁMETRO	Ajustado	Ajustado	Ajustado	Ajustado
$\theta_{cam}$	0.5931	-7.5128	-1.0856	0.9955
$\theta_{ach}$	-1.3713	-	-5.1956	-1.0874
$\theta_{aac}$	-2.8908	-8.4531	-3.0723	-2.3321
$\theta_{taxi}$	-4.0806	-	-4.2490	-2.1423
$\theta_{txc}$	-0.9996	-	-5.2359	-2.7325
$\theta_{tpub}$	-0.3551	-0.1412	-0.7804	-1.0976

## 7 VALIDACIÓN DEL MODELO ESTRAUS

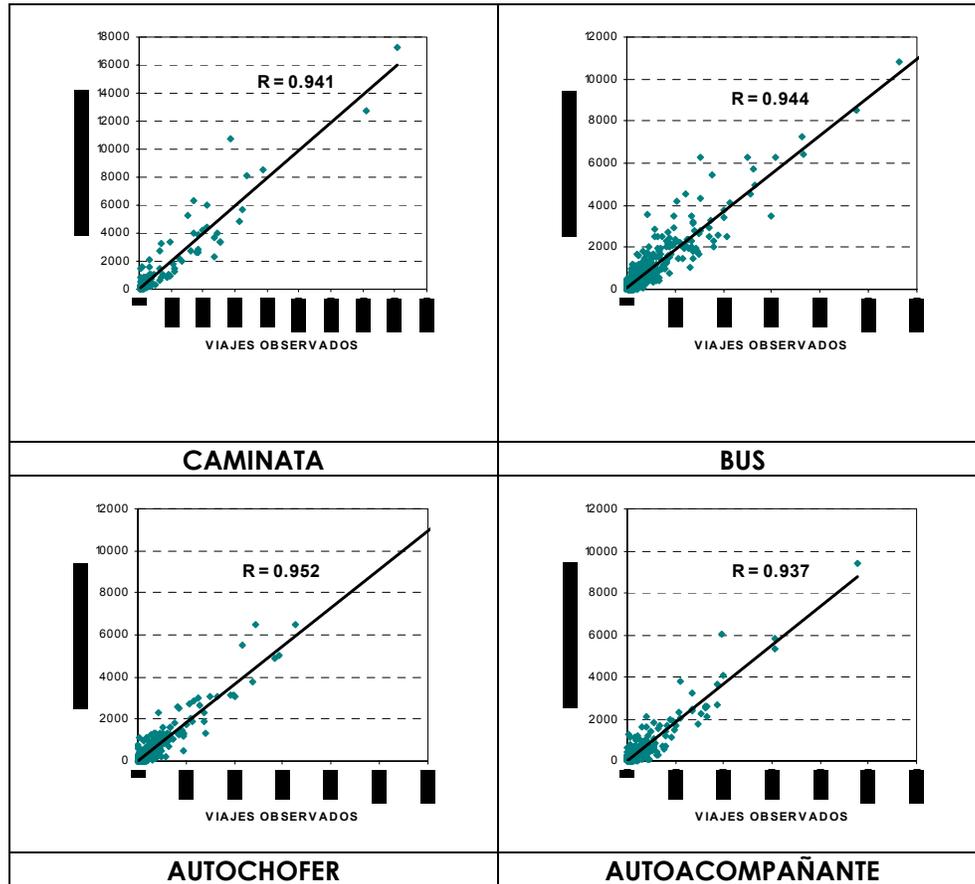
### 7.1 Partición Modal y Distribución

En la Figura 7.1 se reporta la partición modal estimada por el nuevo modelo (simultáneo), mientras que en la Figura 7.2 se reporta la partición modal a nivel comunal para los cuatro modos más relevantes, figura que permite apreciar además la calidad de la reproducción del modelo de distribución.

**Figura 7.1**  
**Partición Modal EOD vs Modelada Punta Mañana 2001**



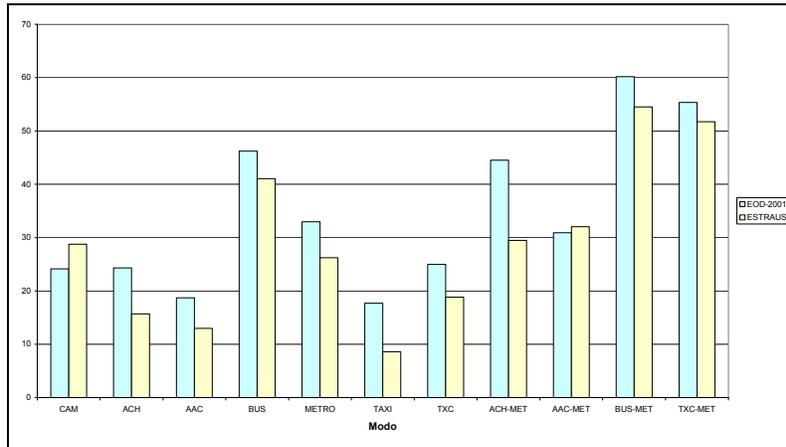
**Figura 7.2**  
**Partición Modal Comunal EOD vs Modelada Punta Mañana 2001**



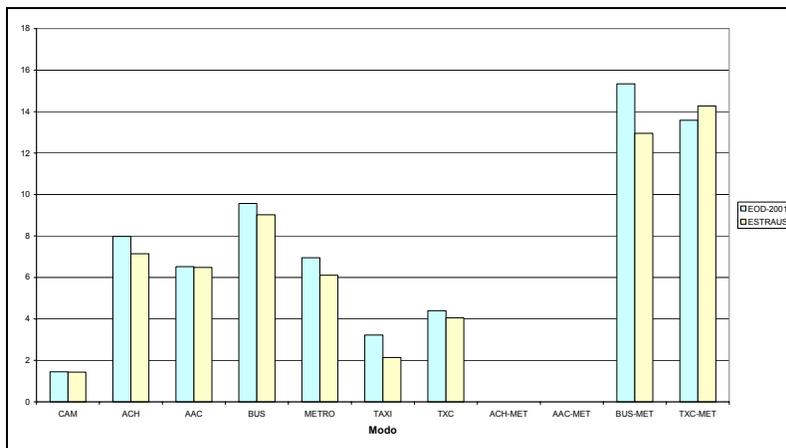
## 7.2 Niveles de Servicio

A continuación se reportan los tiempos y distancias medias de viaje modelados y su comparación con los observados:

**Figura 7.3**  
**Tiempo Total de Viaje EOD vs Modelado Punta Mañana 2001**



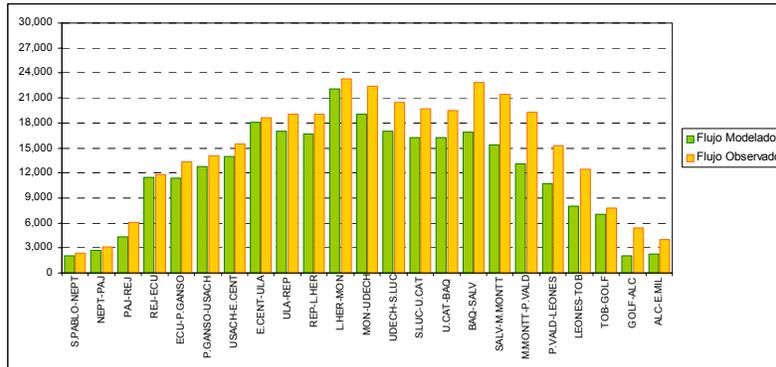
**Figura 7.4**  
**Distancia Total de Viaje EOD vs Modelado Punta Mañana 2001**



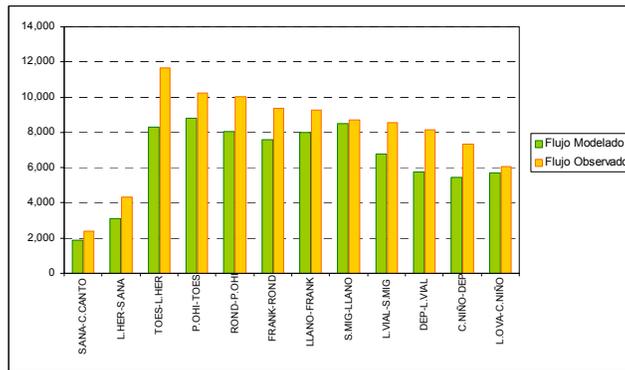
### 7.3 Perfiles de Carga en Líneas de Metro

A continuación se reportan los perfiles de carga modelados y su comparación con los observados para el período punta mañana:

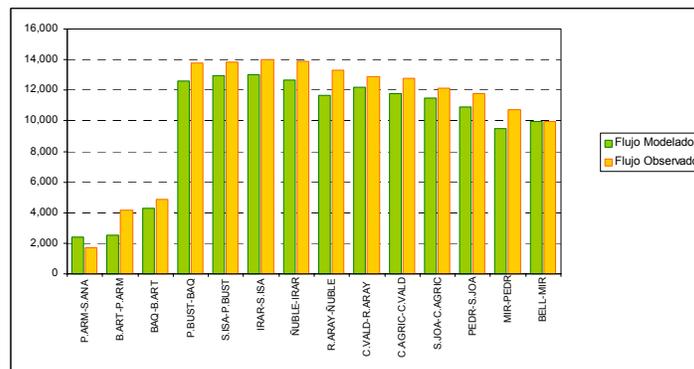
**Figura 7.5**  
**Perfil de Carga Línea 1 P-O EOD-Metro vs Modelado**



**Figura 7.6**  
**Perfil de Carga Línea 2 S-N EOD-Metro vs Modelado**



**Figura 7.7**  
**Perfil de Carga Línea 5 S-N EOD-Metro vs Modelado**



## 7.4 Repartición de Viajes Entre Sub-Períodos en Modelo con Elección de Horario

La repartición de viajes en cada período de modelación es la siguiente (la leve diferencia en el total de viajes se debe a la convergencia en los factores de balanceo):

**Tabla 7.1**  
**Repartición de Viajes por Horario D-PM-A 11 Modos**

HORARIO	MODELADO		EOD-2001	
<b>H-1 (7:30 – 8:30)</b>	1,247,636	78.8%	1,209,166	76.4%
<b>H-2 (6:30 – 7:30)</b>	335,651	21.2%	374,230	23.6%
<b>TOTAL</b>	<b>1,583,287</b>	<b>100.0%</b>	<b>1,583,396</b>	<b>100.0%</b>

**Tabla 7.2**  
**Repartición de Viajes por Horario RMM**

HORARIO	MODELADO		EOD-2001	
<b>H-1 (7:30 – 8:30)</b>	1,205,831	76.2%	1,209,166	76.4%
<b>H-2 (6:30 – 7:30)</b>	377,517	23.8%	374,230	23.6%
<b>TOTAL</b>	<b>1,583,348</b>	<b>100.0%</b>	<b>1,583,396</b>	<b>100.0%</b>

La repartición de viajes en cada período de modelación es la siguiente (la leve diferencia en el total de viajes se debe a la convergencia en los factores de balanceo):

## **8 TAREAS Y DESARROLLOS COMPLEMENTARIOS**

### **8.1 Actualización Factores de Expansión de VERDI**

Los modelos que se proponen en este estudio corresponden a dos períodos del día: “punta mañana” y “fuera de punta”. No obstante, para la evaluación de proyectos, es necesario expandir los resultados a valores diarios y sobre todo, a un total anual. Es necesario por otra parte considerar dos factores de expansión:

- i. Factor de Expansión de los Costos (Oferta)
- ii. Factor de Expansión de los Viajes (Demanda)

El factor de expansión para la demanda es global para el sistema (todos los modos en conjunto). Por otro lado, la oferta si puede ser tratada con distintos factores de expansión para cada modo. Los modos para los cuales se calculó un factor de expansión de la oferta, son los siguientes:

- i. Autochofer
- ii. Bus
- iii. Metro
- iv. Taxicolectivo

Para el caso del factor de expansión de la demanda, se consideró todos los modos incorporados en ESTRAUS. En la Tabla 8.1 se presentan los factores de expansión de oferta y de la demanda, para los distintos modos considerados.

**Tabla 8.1**  
**Factores de Expansión Calculados para ESTRAUS**

Modo	Factor de Expansión Costos		Factor de Expansión Demanda	
	Punta AM	Fuera de Punta	Punta AM	Fuera de Punta
<b>Autochofer</b>	1.030	4.050	<b>1.035</b>	<b>4.874</b>
<b>Bus, Sist. Actual</b>	1.437	4.130		
<b>Bus, Sist. Reestruc</b>	1.338	4.259		
<b>Metro</b>	1.184	4.021		
<b>Taxicolectivo</b>	802	4.786		

Los factores de expansión obtenidos son similares a los considerados en estudios anteriores. Se calcularon factores para los modos más relevantes, los cuales pueden ser utilizados en el módulo VERDI u otra metodología de evaluación de proyectos.

## 8.2 Modelamiento de Taxis Vacíos

Una de las limitaciones existentes en la anterior versión de ESTRAUS era la imposibilidad de modelar el efecto que induce en el sistema la operación de taxis vacíos circulando en la red. Dicha limitación fue superada como parte del presente Estudio mediante un enfoque consistente con la formulación analítica actual.

La metodología implementada se basa en el trabajo realizado por Wong et al (1998), que propone un modelo para describir cómo los taxis vacíos y ocupados se mueven en una red de transporte para buscar a sus usuarios y proveer servicios de transporte.

La modelación de taxis vacíos antes descrita, se incorporó en ESTRAUS de manera opcional mediante la modificación de un parámetro de ejecución (por defecto se usa la modelación tradicionalmente considerada, que no calcula taxis vacíos y supone tiempos de espera fijos para los usuarios de taxi). La implementación considera la posibilidad de que exista más de un modo de la clase taxi, opción actualmente existente

en ESTRAUS (por ejemplo, para modelar servicios de taxi con distinto estándar de calidad).

Para implementar en ESTRAUS esta nueva modelación, se intervino al interior de la iteración del algoritmo de diagonalización que resuelve el problema de equilibrio simultáneo, incorporándose modificaciones en la fase I del algoritmo de Evans (Frank-Wolfe modificado para considerar demanda variable).

### **8.3 Modelamiento de Camiones**

En la versión anterior del modelo ESTRAUS, el flujo de camiones sobre la red vial estratégica era tratado de manera simplificada (se consideran como flujo fijo dentro de secuencias de arcos que representan eventuales rutas de camiones).

En el marco del presente Estudio se implementó un nuevo tratamiento para los camiones consistente en asignación con demanda fija. Se asigna una matriz de desplazamientos de camiones sobre una subred apta para la operación de estos vehículos.

En caso de existir tarifas sobre los arcos, se usan los ponderadores de tarifa correspondientes a la clase de usuario que debe ahora definir el modelador para el chofer de camión. Luego, la matriz de viajes fija de camiones (provista exógenamente por el modelador), se asigna sobre estas rutas mínimas. De esta forma, los viajes de camión asignados influyen a su vez (a la iteración siguiente), en los costos de viaje entre el par OD sobre el que se cargaron. El resumen de los desplazamientos de la matriz de camiones se resumen en la Tabla 8.2:

**Tabla 8.2**  
**Resumen de Matriz de Camiones**

Atributo	Punta Mañana	Fuera de Punta
Nº de Zonas	618	618
Nº de Pares O-D	381.924	381.924
Desplazamientos Totales	9.534	9.288
Nº de Ceros	379.656	379.656
% de Ceros	99,4%	99,4%
Correlación (*)	86,9%	85,9%

(\*): correlación entre los flujos observados y modelados de camiones

#### **8.4 Modelamiento del Modo Tranvía**

El objetivo principal de esta tarea fue estimar un modelo de demanda para un modo inexistente en la actualidad en Santiago de Chile, un Tranvía o Metro Ligero.

Para alcanzar los objetivos antes mencionados se diseñó una encuesta de Preferencias Declaradas (PD) en donde los individuos escogían, para distintas situaciones hipotéticas, el modo a utilizar para realizar un viaje determinado. Se planteó que los individuos escogieran entre realizar dicho viaje en Bus o Tranvía, o bien entre Metro y Tranvía (dependiendo del modo elegido actualmente). El desarrollo de esta encuesta consideró un enfoque metodológico especial, en que las alternativas experimentales se sitúan en torno a rangos típicos de niveles de servicio enfrentados por cada viajero (experimento "customized")

Los modelos de demanda calibrados correspondieron a modelos Logit de tipo bimodales, en los cuales las alternativas de elección para los usuarios de Bus fueron Bus Moderno (estándar TRANSANTIAGO) y Tranvía, y para los usuarios de Metro fue de Metro y Tranvía.

Se calibraron, para cada alternativa de elección (Bus moderno – Tranvía o Metro – Tranvía), y para cada propósito de viaje (Trabajo, Estudio y Otros) entre 7 y 15 modelos alternativos, partiendo siempre de las

especificaciones más generales hasta finalmente converger a las especificaciones más simples. A partir de estos modelos, se determinó una constante de atractividad para un TRANVÍA en el contexto de TRANSANTIAGO, directamente aplicable al modelo ESTRAUS. **El valor final para este parámetro de atractividad fue 36,5.**

## 8.5 Tratamiento de Viajes Externos

La última versión de ESTRAUS incorpora la posibilidad de modelar viajes externos al sistema de transporte urbano de estudio, no sólo en transporte privado, sino también en transporte público. Para ello, es factible definir matrices de viajes externos (transporte privado y transporte público) las cuales son incorporadas en el proceso de equilibrio del modelo (son sumadas a las matrices generadas por ESTRAUS a partir de los vectores de generación y atracción). De esta forma, se reproducen de mejor manera los perfiles de carga observados, particularmente en el caso de la red de Metro.

En el caso del transporte privado, como ya se sabe, se pueden definir tantas matrices de viajes externos como clases de usuarios se desee analizar. Para el caso del transporte público, se define una matriz por modo (ESTRAUS no considera multiclase en transporte público); los modos son Bus, Metro y Taxicolectivo (además de los modos combinados). Las matrices fijas de viajes externos se definen al interior del directorio del modo al que pertenecen.

En la siguiente Tabla se resume la cantidad de viajes externos en transporte privado y público, para cada período de modelación:

**Tabla 8.3**  
**Total de Viajes Externos en Transporte Privado**

INGRESO	Punta Mañana	Fuera de Punta
Auto	33.400	43.984
<b>TOTAL PRIVADO</b>	<b>33.400</b>	<b>43.984</b>
Bus	41.015	20.196
Bus-Metro	3.514	1.985
Metro y Metrotren	440	134
<b>TOTAL PÚBLICO</b>	<b>44.969</b>	<b>22.315</b>
<b>TOTAL</b>	<b>78.369</b>	<b>66.299</b>

### 8.6 Razón de Velocidad entre Buses y Autos

La versión anterior del modelo ESTRAUS consideraba que el tiempo de viaje en Bus en un determinado arco vial es igual al tiempo de equilibrio de los Automóviles en dicho arco **multiplicado por una razón mayor que uno**. Los valores de estas razones fijas, que fueron actualizados a partir de información de la EOD-2001, se definen en el archivo Categorías\_bus\_ft.dat y se presentan en la siguiente Tabla para las 5 categorías de arco consideradas (se consideraron iguales para punta mañana y fuera de punta).

**Tabla 8.4**  
**Valores Relación Fija Entre Tiempos de Viaje en Bus y en Auto**

CATEGORÍA DE ARCO	VEL BUS / VEL AUTO
1	1,3000
2	1,5545
3	1,1068
4	1,4210
5	1,4222

La limitación de este enfoque es clara: en un arco con bajos flujos vehiculares (sin congestión), los automóviles se desplazan a velocidades promedio mayores que las de los buses (detención en

## EJECUTIVO

paraderos y menores tasas de aceleración). Sin embargo, a medida que los flujos aumentan, las diferencias entre ambas velocidades disminuyen. En el límite, si la congestión es muy alta, todo el flujo opera prácticamente a la misma velocidad.

Debido a lo anterior, se puede pensar que considerar que la relación entre la velocidad de los Autos y la de los Buses es constante no es lo más adecuado y, en general, se tiende a sobreestimar esta última para situaciones de mayor congestión. Esto motivó el desarrollo de un trabajo, encargado por SECTRA, que permitió mejorar la representación existente de los tiempos de viaje en bus dentro del modelo ESTRAUS, para lo cual se utilizó la técnica de microsimulación).

Para llevar a cabo la mejora en la representación de los tiempos de viaje en Bus en el modelo ESTRAUS, se analizó con el microsimulador de tráfico GETRAM el comportamiento real del tiempo de viaje de los Buses y la relación existente entre dichos y el de los Autos, para diferentes condiciones de flujo en arcos viales donde comparten las vías de circulación. De las simulaciones realizadas fue posible observar que los tiempos de viaje entre Auto y Bus efectivamente se acercan a medida que el grado de congestión aumenta, entregando como resultado que las razones entre los tiempos no permanecen constantes como se modela normalmente en ESTRAUS.

Como resultado de este análisis se obtuvieron parámetros representativos para ser aplicados en ESTRAUS considerando una nueva formulación para el tiempo de viaje en Bus. Para ello se usa una función tipo BPR, semejante a la que utiliza el modelo para el caso del auto, que permite representar la variación en los tiempos de viaje del Bus en función del nivel de congestión presente en el arco, replicando la relación que cumple dicha curva con respecto a la de auto observada en los resultados de las simulaciones. La curva obtenida tiene la siguiente forma:

$$t_b = \underbrace{t_a^0(\phi \cdot \alpha + 1)}_{t_b^0} \cdot \underbrace{(1 + (\varepsilon \cdot (1 + \alpha) - 1))}_{\alpha_b} \cdot \left( \frac{f_a + f_b}{k} \right)^\beta \quad (4)$$

EJECUTIVO

---

donde:

- $f_a, f_b$  : Flujo de autos y buses en el arco, respectivamente.  
 $t_a^0$  : Tiempo de viaje en el arco a flujo libre para los autos.  
 $k$  : Capacidad del arco.  
 $\alpha, \beta$  : Parámetros de la curva tiempo-flujo para los autos.

Los valores de los parámetros  $\phi, \varepsilon$  de la expresión anterior fueron calibrados para el caso de Santiago, obteniendo valores de 0,429 y 0,660 respectivamente.

Para efectos de las simulaciones con ESTRAUS que se presentan en los volúmenes siguientes, se consideró el enfoque expuesto en la sección 8.2 (razón de velocidad fija entre Bus y Auto), particularmente los parámetros expuestos en la Tabla 8.4. La justificación de ello fue que dicho enfoque garantiza, en el contexto de la calibración del modelo para el año 2001, que los resultados estimados por ESTRAUS reproduzcan de manera más precisa tanto los niveles de servicio de ambos modos como el tamaño de flota de Buses. Los resultados obtenidos de ESTRAUS, y que se exponen en el Volumen 3, así lo demuestran.

---

## 9 CONCLUSIONES GENERALES

Como resultado del presente Estudio se dispone de una versión actualizada y validada del modelo de transporte urbano ESTRAUS para la realidad de Santiago. Los resultados obtenidos demuestran que la capacidad reproductiva del modelo ESTRAUS en su nueva versión es buena, y muy superior a cualquier proceso de calibración realizado anteriormente, lo que permite por lo tanto utilizar con confianza el modelo en etapas de predicciones futuras del sistema de transporte urbano de Santiago. La buena calidad de los resultados obtenidos se explica principalmente por dos aspectos: la concepción e implementación de nuevas metodologías de calibración de los modelos de demanda y oferta de transporte, y la disponibilidad de datos adecuados para la calibración de los modelos bajo los nuevos enfoques metodológicos, los que además permitieron validar los resultados obtenidos. El enfoque metodológico considerado como parte del presente Estudio puede extenderse para la calibración de ESTRAUS en el contexto de otras ciudades de Chile, como Concepción y Valparaíso.

La calibración incluyó además la implementación de nuevas potencialidades al modelo ESTRAUS, que permiten realizar simulaciones más realistas y al mismo tiempo extraer una mayor cantidad de información útil para el análisis y evaluación de proyectos y planes de transporte para Santiago. Entre estos aspectos destacan la capacidad de modelar camiones y taxis vacíos, así como también la posibilidad de analizar nuevos esquemas tarifarios integrados sobre el transporte público.

Adicionalmente, se dejó operativa una versión de ESTRAUS que simula la operación del sistema para los períodos punta mañana y fuera de punta del año 2005, la cual incluye la totalidad de proyectos de transporte que debieran estar operativos para entonces, entre los que se destacan, además de proyectos menores, las Concesiones Viales Urbanas, las nuevas líneas y extensiones de la red de Metro, y el Plan TRANSANTIAGO con sus nuevos trazados de buses y esquema de tarifa integrada.

En síntesis, se dispone de una actualizada y poderosa herramienta de análisis, la cual ha demostrado ser robusta, general y sumamente flexible como para ser utilizada en estudios estratégicos de transporte urbano de Santiago.