
EVOLUCION ZONAL DE LA AFLUENCIA AL METRO DE SANTIAGO: UN ENFOQUE AGREGADO MULTIVARIADO

Sergio R. Jara Díaz

Universidad de Chile

Casilla 228-3, Santiago Chile, 6894206

Andrés Vargas González

Secretaría Ejecutiva

Comisión de Planificación de Inversiones

en Infraestructura de Transporte

Ahumada 48 Piso 5, Santiago Chile, 6710935

RESUMEN

Durante los últimos años, la demanda por transporte ha sido analizada en detalle a nivel individual, con evidentes avances en términos de sus formas funcionales, estimación, e interpretación. Por otra parte, se cuenta con modelos de transporte y uso de suelo para explicar la evolución de actividades económicas, de tal forma que la demanda por transporte urbano es claramente entendida a nivel de sistema. Este cuadro general se aplica perfectamente a Santiago, donde un conjunto de modelos desagregados de elección de modos se encuentra disponible, y un modelo estratégico (ESTRAUS) ha sido diseñado para la evaluación de proyectos de gran envergadura, considerando la operación conjunta de todos los modos de transporte.

Sin embargo, parece también necesario entender un fenómeno específico de demanda tal como lo es la evolución de viajes en un modo particular, el cual también puede ser analizado en forma agregada. En efecto, la predicción de viajes mensuales es un ejercicio obligatorio para el Metro de Santiago, donde las tendencias, factores mensuales y la experiencia se combinan para la predicción de flujos e ingresos, y la planificación de operaciones a nivel anual.

En este artículo se presenta el diseño y estimación de un conjunto de modelos estructurales destinados a entender y predecir la evolución de la demanda por Metro en Santiago considerando viajes mensuales totales y día laboral para cada una de las líneas que componen la red. Además, se presentan los antecedentes inmediatos existentes para la modelación de la demanda agregada de la red de Metro (Jara Díaz y Paredes, 1993) y se avanza en la dirección de eliminar las variables de rezago obtenidas en este caso, de tal forma de entender y predecir de mejor forma el fenómeno.

Las dimensiones fundamentales de viajes (generación, distribución y elección de modo) son capturados por factores como actividad económica, alcance espacial y competencia modal, los cuales son traducidos en variables como empleos, zonas de influencia, disponibilidad de automóvil, tarifas, ingresos y otras. Los resultados muestran un efecto claro de cada una de estas variables (o su combinación), en la evolución de viajes en Metro, tanto a nivel global como por línea.

El conjunto de modelos resultantes es ofrecido como una herramienta intermedia de gran utilidad para la planificación que realice el Metro de Santiago.

1. INTRODUCCIÓN

La demanda por viajes en el Metro de Santiago recibe la influencia de múltiples factores que pueden explicar su creciente evolución desde su puesta en operación. Así, el aumento de la actividad económica en la ciudad, la prolongación de la cobertura espacial de cada una de las líneas de Metro, la modificación de la oferta de otros modos, o bien la modificación de sus propias tarifas, contribuyen de alguna forma a entender parte de esa evolución ya sea en términos agregados como en detalle.

En este artículo se pretende entender la evolución de la demanda agregada por Metro a nivel de red y por línea, considerando la afluencia mensual total y promedio día laboral, de tal forma de identificar en forma específica el rol de las variables agregadas que influyen discrecionalmente sobre la afluencia en cada uno de los casos. Se intenta encontrar así una herramienta sólida y flexible a la vez, que permita explicar y predecir los cambios en la afluencia al Metro de Santiago.

En la siguiente sección se presenta la formulación general del problema y sus antecedentes. En la tercera sección se presenta una descripción de la información utilizada para la calibración de los modelos de demanda. La cuarta sección contiene el análisis de los modelos finalmente obtenidos. Por último se presenta una síntesis de este trabajo.

2. FORMULACIÓN GENERAL Y ANTECEDENTES

Cuando se analiza el fenómeno de demanda por viajes en Metro, es posible distinguir diversos factores que incidan en su evolución: aquellos que inducen más viajes en general, aquellos que modifican la estructura de la matriz origen-destino, aquellos que varían la disponibilidad modal y aquellos que cambian las características operativas ya sea del propio modo como la de los restantes. Estos factores, representados a través de la mayor o menor actividad económica, mayor extensión de la red de Metro y las ventajas (desventajas) comparativas que posee sobre el resto de los modos, permiten expresar la demanda agregada como (Jara Díaz y Paredes, 1993):

$$Y_m = f(Z, G, A_t, D)$$



- donde Y_m : Afluencia total del Metro.
 Z : Vector de variables asociadas a las zonas de influencia del Metro.
 G : Vector de variables de generación de viajes.
 At : Vector de atributos de los modos entre todos los pares.
 D : Indicadores de disponibilidad de modos.

Para el caso de Santiago, el único modelo existente bajo este enfoque considera rezagos con respecto al mes anterior (rezago inercial Y_t) y al mismo mes del año anterior (rezago estacional Y_e), los cuales aparecen explicando más del 50% del flujo en estudio (ver tabla N° 1); si bien esto genera una mejor reproducción de la serie, no favoreció la comprensión global del fenómeno en términos causales, ni su predicción, tal como lo muestran las figuras 1 y 2.

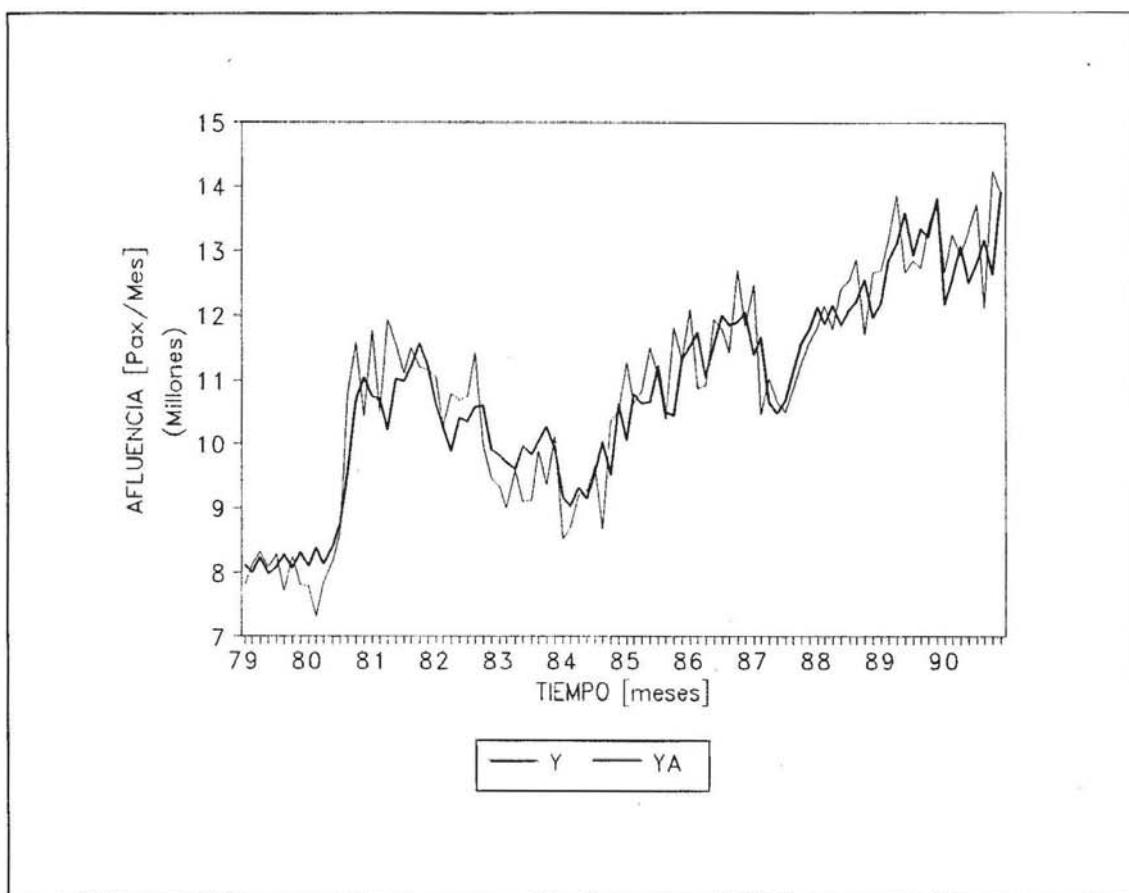


Figura 1 : Ajuste modelo con rezagos (1979-1990)

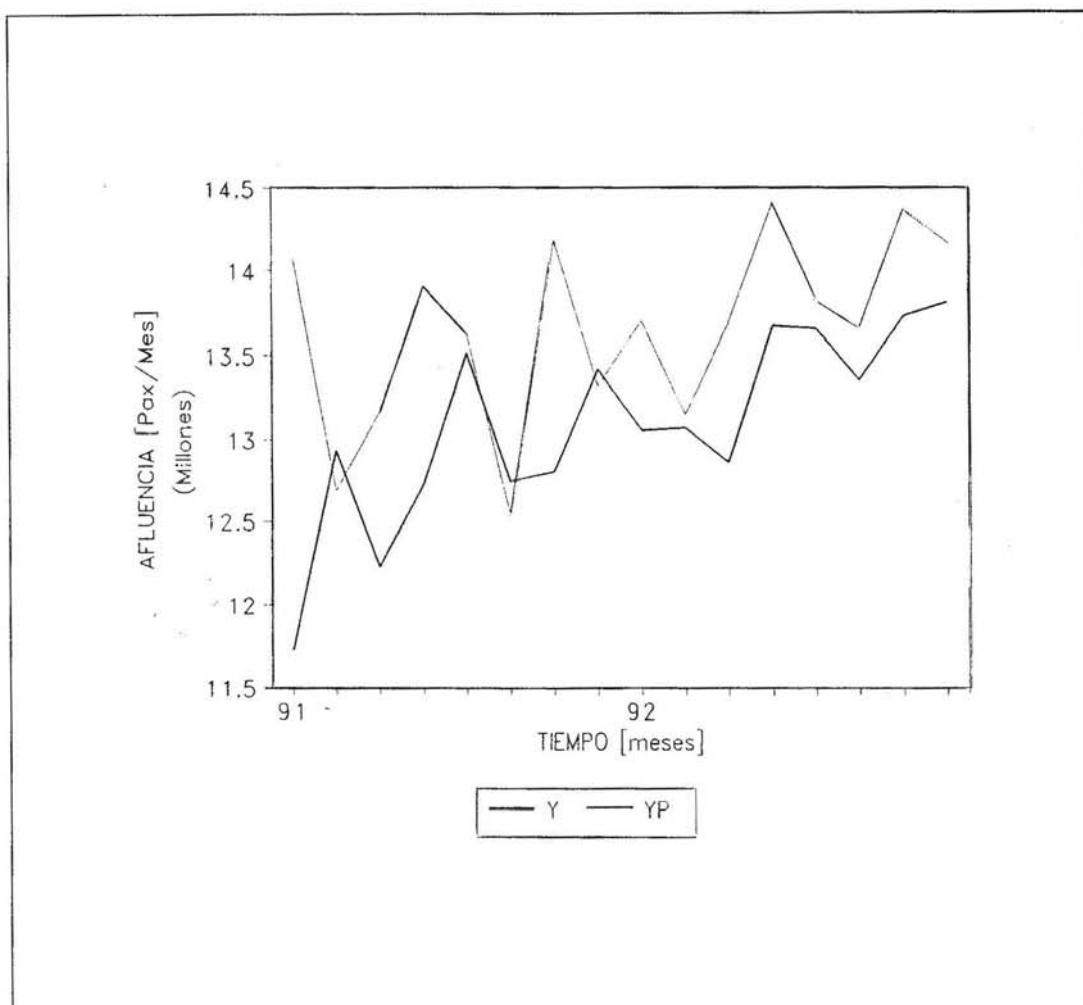


Figura 2 : Predicción modelo con rezagos (1991-1992)

Por otra parte, existe evidencia empírica en varios casos de ferrocarriles extranjeros, como en Fowkes et.al (1985), Jones y Nichols (1983) y Owen y Phillips (1987), en donde se trata el problema de la demanda agregada considerando diferencias entre las distintas líneas de la red y distintos períodos del día, tomando en consideración variables de la misma naturaleza que las utilizadas para el caso de Santiago, a excepción, en general, de los flujos rezagados.

Estos antecedentes motivan la búsqueda de un nuevo modelo para la red de Metro, el cual no debiera depender de rezagos, permitiendo predicciones adecuadas de la demanda. Por otra parte, debido a las distintas características y comportamientos de los usuarios diferenciados por línea 1 y línea 2 del Metro, parece sensato estudiar la existencia de factores que pudiesen influir en forma distinta en cada uno de los casos, de tal forma de modelar separadamente las demandas en cada caso.

Con este objeto, es necesario identificar con mayor precisión los factores que pudieran incidir en la explicación de la demanda cuando se analizan agregaciones a nivel de red o por línea. En efecto, aun

cuando se espera que aquellas variables como el empleo, las tarifas y el número de estaciones se mantengan explicando parte de la evolución de la demanda, existen antecedentes que ayudan a identificar nuevos factores que permiten modelar de mejor forma la afluencia en cada uno de los casos. Dentro de éstos destaca el efecto del ingreso sobre los usuarios del Metro, la consideración del taxi colectivo como modo alternativo y la disponibilidad efectiva de los modos auto y bus, dado que no todo el parque vehicular es el que efectivamente compite con el Metro.

3. DESCRIPCION DE LA INFORMACION

En esta sección se presenta la base de datos utilizada para la calibración de los modelos, su fuente de información y la forma en que ésta fue obtenida.

En cuanto a la afluencia del Metro, utilizada como variable dependiente en nuestros modelos, se recolectó información mensual para el total de viajes y promedio día laboral correspondientes a la red, línea 1 y línea 2.

Respecto de las variables explicativas posibles de utilizar, para representar el efecto generador de viajes se decidió utilizar el número de empleos existentes en el Área Metropolitana (EMP), los milímetros mensuales de agua caída (PP) y la remuneración promedio que poseen los habitantes de la ciudad (ING). Para captar las zonas de influencia que tiene el Metro se utilizó el número de estaciones (NE), mientras que para recoger el efecto de la disponibilidad que tienen los restantes modos de transporte fueron considerados los permisos de circulación de autos (AC) y buses (BC) de aquellas comunas que tienen un aporte significativo de usuarios al Metro y la correspondiente restricción vehicular (R). Finalmente, para representar los atributos de cada uno de los modos se consideraron las tarifas en el caso del Metro, bus y taxi-colectivo (PM, PB y TC) y el precio de un litro de bencina para el caso del auto (BENC).

La tabla N° 2 muestra el detalle de la información, la forma en que se dispone y su fuente. La tabla N° 3 muestra la media, rango y coeficiente de variación de las variables para la serie 1979-1992, considerando sólo los meses de comportamiento económico comparable (Abril a Noviembre), excluyendo así aquellos meses correspondientes a período de vacaciones (Enero y Febrero) o de actividades especiales (Diciembre y Marzo). La tabla N° 4 entrega los valores de la matriz de correlación parcial de las variables, a partir de lo cual se puede concluir que no debiera existir problemas graves de multicolinealidad; esta característica se mantiene en el análisis de correlación para las variables por línea.

En las figuras 3 y 4 se muestra la evolución de las nuevas variables incorporadas, las cuales son el ingreso y las tarifas de los modos considerados para la modelación. De ellas se observa que, salvo el caso del taxi-colectivo, en general existe un crecimiento de las variables en los últimos 10 años; esto también es válido cuando se analiza el resto de las variables, lo que en definitiva explica los signos de la matriz de correlación, sin que signifique necesariamente una relación causal.

4. MODELOS RESULTANTES Y ANALISIS

En general, en los modelos de demanda calibrados se consideró formas funcionales lineales y cuadráticas. En este último caso, las variables fueron desviadas en torno a su valor medio. Cabe destacar que las combinaciones utilizadas en las especificaciones cuadráticas, son realizadas a partir de las variables ING(I), NE(N), PM(M), PB(P), TC(T), BENC(B), AC(A) y BC (L).

Además, las formulaciones contemplan variables generadas a partir de aquellas presentadas en la tabla N° 2. Tal es el caso de la variable EPP (empleo-precipitaciones), la cual recoge la disminución del efecto generador que posee el empleo, producto de las precipitaciones. Otras variables generadas corresponden a las tarifas y precios divididos por el ingreso (PMI, PBI, TCI, BENCI), el cual se interpreta como el efecto real que las tarifas tienen sobre la demanda por Metro. Para aquellos casos en que el modelo obtenido presenta términos de primer orden de las tarifas corregidas por el ingreso, debe tenerse presente que las variables de segundo orden también consideran esta corrección.

Para la calibración de los modelos se utilizó el software Time Series Processor (TSP), mientras que la elección de los mejores modelos en cada uno de los casos analizados se realizó mediante la aplicación de un test de comparación econométrica (Davison y Mackinnon, 1981).

La forma de analizar los resultados de estos modelos debe ser tanto por su bondad de ajuste, como por el signo, valor e interpretación que tengan los parámetros obtenidos en cada uno de las agregaciones; los parámetros de primer orden se entenderán como la variación marginal de la demanda respecto de la variable asociada, manteniendo constante el resto de los efectos.

En la tabla N° 5 se presentan los resultados obtenidos para la modelación de la afluencia mensual de la red, línea 1 y línea 2.

La tabla N° 6 presenta los resultados obtenidos para la modelación de la afluencia promedio dia laboral, correspondiente a la red, línea 1 y linea 2.

Un primer análisis que surge de estos resultados es el que se refiere a la obtención de un nuevo modelo para la red de Metro, considerando viajes totales mensuales. Al comparar éste con aquel que considera rezagos, se visualiza que, si bien las variables de generación y de alcance espacial resultan ser las mismas, el efecto que éstas poseen sobre la demanda resulta superior y más significativo en el nuevo modelo. Lo anterior no ocurre con la disponibilidad de los modos alternativos, ya que en el nuevo modelo este efecto no resulta relevante.

Por su parte, en el nuevo modelo se considera una corrección de las tarifas por ingreso, captando la importancia real que los usuarios le dan a este atributo al momento de elegir un modo de transporte. Se notará que el nuevo modelo considera efectos de segundo orden del empleo y las tarifas. En este sentido, parece intuitivamente atractiva la disminución del efecto generador del empleo a medida que este crece en línea 1; no así en el caso global. En el caso de las tarifas, los signos de segundo orden son los esperados. En cuanto a las elasticidades propias, cabe destacar que ésta resulta menor que la obtenida en el modelo con rezagos.



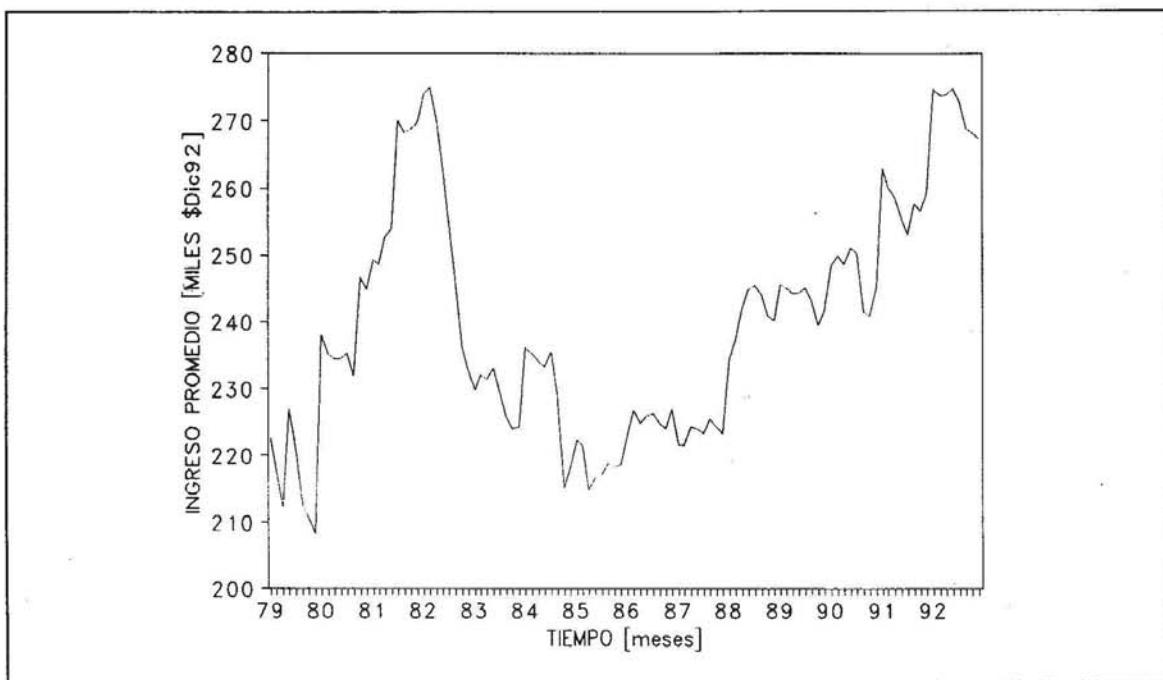


Figura 3 : Evolución mensual del ingreso (1979-1992)

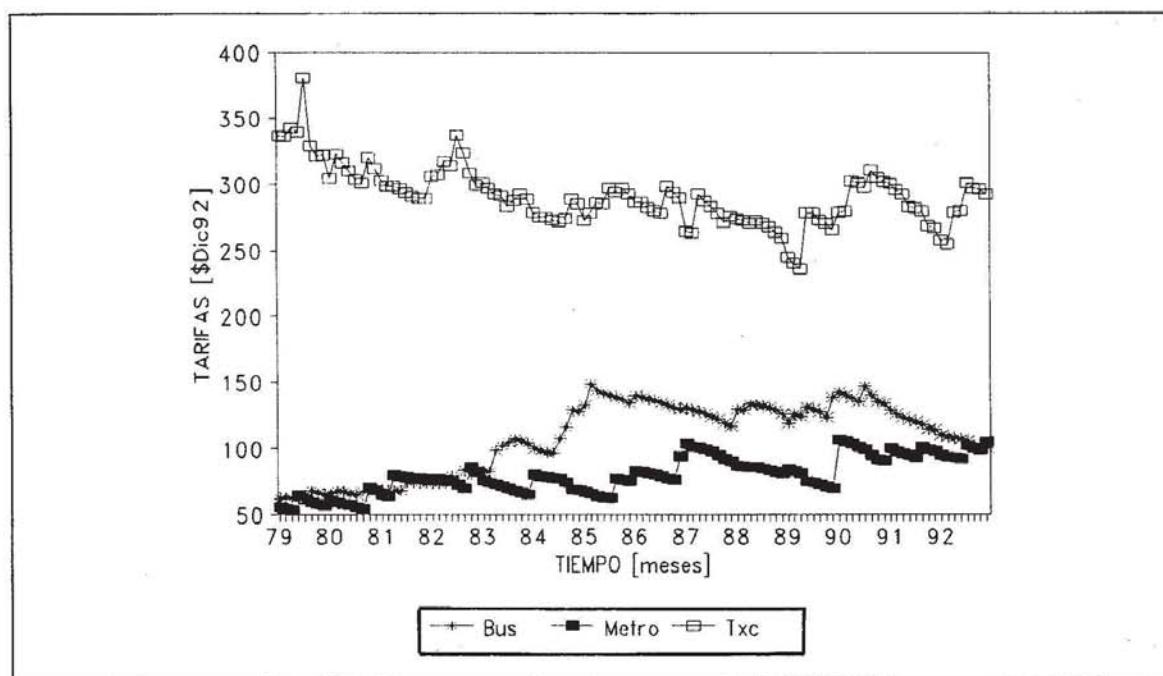


Figura 4 : Evolución mensual de las tarifas (1979-1992)

Al realizar un análisis del conjunto de modelos obtenidos, destaca el efecto que posee el empleo como variable generadora de viajes, el cual resulta satisfactorio en cada una de los modelos obtenidos. Para el caso de los modelos mensuales, la variación esperada de la demanda en la red de Metro era de a lo menos 4 viajes adicionales por cada nuevo empleo, siendo la variación resultante equivalente a 4.6 viajes por cada empleo.

A lo anterior se agrega el hecho que, tanto en el caso de la demanda mensual como en la correspondiente al promedio en un día laboral, la suma de los aumentos de demanda correspondientes a línea 1 y línea 2, producto de la generación de nuevos empleos coincide con el resultado del aumento obtenido de la modelación de la red, siendo siempre mayor el aporte de empleos en línea 1.

Por otra parte, cuando se modela la demanda mensual total, es decir considerando fines de semana y festivos, se detecta un efecto del ingreso sobre los viajes en línea 2. Sin embargo, cuando se modela la afluencia promedio en un día laboral, no se detecta tal efecto.

Otro resultado interesante que resulta del análisis conjunto de los modelos es el que se refiere a las elasticidades propias. En general éstas resultan en magnitud un poco inferior a la cifra manejada por el Departamento de Planificación del Metro hasta 1994 (-0.20), y el análisis de los resultados por línea y para la red, resulta ser bastante consistente. Debe destacarse que, a pesar de las diferencias en las estimaciones puntuales de la elasticidad en la modelación mensual de la demanda (-0.15, -0.11 y -0.14 para línea 1, red y línea 2 respectivamente), los tres valores son estadísticamente iguales con un alto grado de confiabilidad. Aun así, es posible captar el efecto esperado de la mayor elasticidad en línea 2 (-0.17) con respecto a la de línea 1 (-0.10), cuando se modela un día promedio laboral de la demanda.

Respecto al efecto de la tarifa de los restantes modos del sistema, los resultados indican que en general el modo bus parece ser real alternativa al Metro sólo para los usuarios de línea 2 (elasticidad precio cruzado 0.18), mientras que el taxi-colectivo lo es para los usuarios de línea 1 (elasticidad precio cruzado 0.56).

Finalmente debe destacarse que, al igual que en los resultados obtenidos por Jara-Díaz y Paredes (1993), el efecto generador de viajes que posee el empleo es evidentemente disminuido por las precipitaciones, efecto que resulta ser robusto, en especial cuando se modela la red de Metro.

5. SINTESIS Y CONCLUSIONES

A partir de la información obtenida, fue posible calibrar diversos modelos de demanda por viajes en Metro, correspondiente a las agregaciones por línea y total. Así, fue posible encontrar formulaciones agregadas para la demanda por línea, y se encontró un modelo alternativo para el caso de la demanda en la red de Metro. Esto último significó superar el uso de variables con rezago, las cuales poseían un alto grado de explicación de la demanda en modelos anteriores.

Por otra parte, los resultados muestran que el uso de un enfoque multivariado es útil para captar el rol de cada una de las variables, bajo condiciones *ceteris paribus*. Dentro de estos resultados son



particularmente relevantes la obtención de valores relativamente bajos de la elasticidad precio, un efecto generador del empleo de más de cuatro viaje mensuales (tres veces superior al obtenido en modelos anteriores), el rol de las precipitaciones y un efecto mayor al estimado anteriormente, diferenciado por línea, del aumento del número de estaciones.

El paso siguiente en este tipo de investigación parece ser entender mejor algunos aspectos específicos como son los efectos temporales y el rol de los escolares, aspectos que adquieren particular relevancia a partir de las nuevas experiencias tarifarias del Metro.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido parcialmente financiada por FONDECYT, Proyecto 1950737. Agradecemos la colaboración de Dario Contreras.

REFERENCIAS

- Davison, R. and Mackinnon, J. (1981). Several Test for Model Specification in the Presence of Alternative Hypothesis, **Econometrica**, vol. 49, No. 3, pp. 781-793.
- Fowkes, A.S., Nash, C.A., and Whiteing, A.E. (1985). Understanding Trends in Inter-City Rail Traffic in Great Britain. **Transportation Planning and Technology**, vol. 10, No. 1, pp. 65-80.
- Jara-Díaz, S. y Paredes, A. (1993). **Modelo Estructural para la Demanda por Viajes en el Metro de Santiago**. Actas del VI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte.
- Jones, I.S., and Nichols, A.J. (1983). The Demand for Inter-City Rail Travel in the United Kingdom. **Journal of Transportation Economics and Policy**, vol. 17, No. 2, pp. 133-153.
- Owen, A.D., and Phillips, D.A. (1987). The Characteristic of Railway Passenger Demand. **Journal of Transportation Economics and Policy**, vol. 21, pp. 231-253.
- Paredes, A. (1993). **Modelación Estructural de la Demanda Agregada por Viajes en Metro en Santiago**. Memoria de Ingeniero Civil, U. de Chile.

TABLA N° 1: Modelo con rezagos de la afluencia mensual al Metro

VARIABLES	PARAMETROS
FLUJO TENDENCIAL (Yt)	0.54 (7.31)
FLUJO ESTACIONAL (Ye)	0.20 (3.76)
EMPLEOS (EMP)	1.52 (3.63)
Nº ESTACIONES (NE)	112.7 E3 (2.74)
Nº AUTOS EFECTIVOS (AU)	-4687.6 (1.52)
TARIFA DEL METRO (PM)	-23068 (2.52)
TARIFA DEL BUS (PB)	1711.6 (0.46)
EMPLEO*PRECIPITACIONES (EPP)	-1.517 E-2 (1.90)
R_c^2	0.91
DW	0.38
Nº OBSERVACIONES	91
ELASTICIDAD PRECIO	-0.146 (2.52)

Fuente: Jara Diaz y Paredes (1993)



TABLA N° 2 : Descripcion de la informació

GRUPO	INFORMACION	VARIABLE	FORMA	SERIE	FUENTE
ZONAS DE INFLUENCIA (Z)	- N° ESTACIONES	NE	- MENSUAL	76-92	- METRO S.A
GENERACION (G)	- EMPLEOS	EMP	- ANUAL - MENSUAL	76-86 87-92	- INE - INE
	- PRECIPITACIONES	PP	- MENSUAL	75-92	- DGA
	- INGRESO	ING	- MENSUAL	78-92	- INE
ATRIBUTOS (At)	- TARIFA METRO - TARIFA BUS - PRECIO BENCINA - TARIFA TAXI COLECTIVO	PM PB BENC TC	- MENSUAL - MENSUAL - MENSUAL - MENSUAL	76-92 78-92 78-92 76-92	- METRO S.A - INE - INE - INE
DISP.MODOS (D)	- PERMISOS DE CIRCULACION	AC BC	- ANUAL	77-90 91 92	- MINTRATEL - MUNICIP. - INE
	- RESTRICCION	R	- MENSUAL	86-92	- MINTRATEL

TABLA N° 3 : Estadística descriptiva de las variables

VAR.	UNIDAD	MEDIA	D. Std.	MINIMO	MAXIMO	COEF.VAR
Y	[pax/mes]	11261100	1874378	7311049	14408600	0.17
Y1	[pax/mes]	8579009	1230334	5718679	10694400	0.14
Y2	[pax/mes]	2682109	830013	1592370	4178898	0.31
YL	[pax/día]	469060	78686	315655	597808	0.17
YL1	[pax/día]	362155	52193	248036	452577	0.14
YL2	[pax/día]	106904	33121	63691	166450	0.31
ING	[\$Dic92]	239854	17699	208257	274889	0.07
EMP	[empleo]	1521570	246218	1103900	2015620	0.16
PP	[mm/mes]	41.84	55.69	0	344.3	1.33
PB	[\$Dic92]	107.91	27.44	61.67	148.75	0.25
BENC	[\$Dic 92]	185.46	22.92	144.28	242.38	0.12
TC	[\$Dic 92]	289.18	23.17	236.69	380.54	0.08
PM	[\$Dic 92]	79.87	14.21	53.23	107.14	0.18
PM1	[\$Dic 92]	87.15	18.23	53.23	118.46	0.21
PM2	[\$Dic 92]	58.31	15.91	35.1	95.34	0.27
NE	[estación]	35.07	2.72	28	37	0.08
NE1	[estación]	23.19	2.25	17	24	0.1
NE2	[estación]	11.88	0.94	11	13	0.08
AC	[mil autos]	199.49	28.22	130.41	253.07	0.14
A1C	[mil autos]	169.66	26.02	96.38	218.33	0.15
A2C	[mil autos]	61.68	12.95	37.58	84.63	0.21
BC	[mil buses]	3.27	0.46	2.46	4.58	0.14
B1C	[mil buses]	2.09	0.34	1.56	3.31	0.16
B2C	[mil buses]	1.85	0.52	0.74	3.01	0.28

TABLA N° 4 : Matriz de correlación

VAR.	Y	ING	EMP	PP	PB	BENC	PM	TC	NE	AC	BC
Y	1.00										
ING	0.56	1.00									
EMP	0.84	0.48	1.00								
PP	-0.12	0.09	-0.10	1.00							
PB	0.59	-0.15	0.53	-0.08	1.00						
BENC	-0.32	-0.75	-0.33	-0.03	0.39	1.00					
PM	0.70	0.46	0.70	0.06	0.53	-0.21	1.00				
TC	-0.59	-0.26	-0.63	0.06	-0.56	0.08	-0.53	1.00			
NE	0.80	0.40	0.61	0.00	0.68	-0.12	0.72	-0.70	1.00		
AC	0.26	0.22	0.11	-0.06	0.15	-0.19	0.19	0.04	0.19	1.00	
BC	0.01	-0.08	0.10	-0.18	0.03	-0.09	-0.10	0.17	-0.19	0.50	1.00

TABLA N° 5 : Modelos de afluencia total mensual

PARAMETROS ESTIMADOS	Línea 1 (Y1)	Red (Y)	Línea 2 (Y2)
β_{CTE}	8.5 E6 (78.5)	10.3 E6 (72.44)	2.6 E6 (75.9)
β_{EMP}	3.6 (10.4)	4.6 (15.3)	1.0 (3.8)
β_{EPP}	-	-0.2 E-2 (2.1)	-0.4 E-3 (2.5)
β_{PM}	-15090 (3.0)	-	-
β_{TC}	16432 (4.0)	-	-
β_{PMI}	-	-36774 (1.9)	-16132 (3.1)
β_{PBI}	-	14341 (1.8)	10601 (3.8)
β_{NE}	218820 (3.2)	387790 (11.3)	560640 (7.7)
β_{EE}	-0.3 E-5 (2.3)	0.8 E-5 (6.4)	-
β_{P2}	-	2737 (4.6)	-
β_{MP}	-	2402 (1.7)	-
β_{TN}	7334 (3.1)	-	-
β_{TT}	299 (2.6)	-	-
β_{BT}	-	-	380 (2.7)
Nº OBS. (N)	98	112	98
R_c^2	0.84	0.90	0.97
DW	1.94	1.51	1.89
$F_{N-K, K-1}$	68	127	416
\mathcal{E}_{PM}	-0.15 (3.0)	-0.11 (1.9)	-0.14 (3.1)



TABLA N° 6 : Modelos de afluencia promedio día laboral

PARAMETROS ESTIMADOS	Línea 1 Laboral (YL1)	Red Laboral (YL)	Línea 2 Laboral (YL2)
β_{CTE}	354030 (51.0)	-278490 (4.4)	107540 (62.2)
β_{EMP}	0.14 (5.7)	0.19 (7.5)	0.07 (4.9)
β_{EPP}	-0.42 E -4 (3.8)	0.56 E-4 (3.9)	-
β_{PMI}	-1012 (2.1)	-1346 (1.7)	-754 (3.9)
β_{PBI}	-	-	312 (2.0)
β_{NE}	14404 (9.3)	14275 (7.7)	16409 (4.6)
β_{PE}	-	-	-0.24 E-2 (2.2)
β_{PN}	-	-	-753.1 (2.5)
β_{MP}	64 (1.7)	-	-
Nº OBS. (N)	98	98	98
R_c^2	0.96	0.97	0.98
DW	1.80	1.77	1.93
$F_{N-K,K-1}$	364	595	630
ε_{PM}	-0.10 (2.1)	-0.10 (1.7)	-0.17 (3.9)

