

## **MODELO ESTRUCTURAL PARA LA DEMANDA POR VIAJES EN EL METRO DE SANTIAGO.**

**Sergio R. Jara Díaz**  
**Angélica Paredes Castillo**  
Universidad de Chile  
Casilla 228-3, Santiago de Chile

### **RESUMEN**

Esta investigación se orienta a justificar, proponer y estimar una función de Demanda Agregada por Viajes en Metro (DAVM), sobre la base de variables, también agregadas, que capturen factores estructurales, para así contar con una herramienta que permita entender y predecir la evolución de la afluencia al Metro de Santiago. La factibilidad del enfoque es sugerida por el carácter de operador masivo del Metro, y avalada por el análisis preliminar de series de afluencia mensual. La idea central es evitar tanto la modelación detallada a nivel de par origen destino (usual en los enfoques de tarificación) como la modelación estratégica que incluye la operación y equilibrio en todos los modos (como ESTRASUS).

El problema se enfrenta identificando variables potencialmente utilizables para representar el rol de Generación, Disponibilidad Modal y Atractividad Modal a nivel agregado, escogiendo aquellas que combinan capacidad efectiva para capturar efectos estables con la existencia de fuentes confiables de información. Además, se analiza dos tipos de efecto en el tiempo, no explicables a través de variables de generación, distribución, o partición modal de los viajes: un efecto estacional, representado por el flujo del mismo mes en el año anterior, y un efecto tendencial, capturado por el flujo del mes anterior. En cuanto a forma funcional, se postularon especificaciones lineales y cuadráticas con múltiples variaciones.

Se presenta el enfoque general adoptado y el criterio de selección de variables estructurales; éstas son descritas estadísticamente y analizadas en conjunto. Se muestran y analizan los modelos obtenidos, seleccionando aquel que es superior conceptual y económicamente, de cuyos resultados se desprende la importancia de considerar al sistema en su conjunto, incluyendo otros modos y otras políticas sectoriales cuando se observa y planifica la operación del Metro de Santiago. Entre los principales resultados cuantitativos, se detectó importantes efectos inerciales en el uso del sistema, un rol significativo de la tarifa, aunque menos importante que el usualmente asignado (elasticidad precio 0.144), y un impacto relevante de la disponibilidad de automóviles en la población.



## 1. INTRODUCCION.

El uso del sistema de Metro ha evolucionado en forma creciente desde su puesta en marcha en 1975. Naturalmente, en ello ha influido su paulatina extensión, lo que ha hecho que más habitantes de la ciudad tengan acceso a él. Pero también influyen en su uso la mayor o menor actividad económica, que incide sobre el total de viajes en Santiago, y las ventajas comparativas que el Metro ofrezca, en términos tarifarios o de servicio, frente a la competencia de (y complementación con) la locomoción de superficie y los automóviles.

En este artículo se trata de entender la evolución de la demanda agregada por viajes en Metro sobre la base de variables, también agregadas, que capturen el tipo de factores antes descritos. En la sección siguiente se presenta una formulación del problema que permite identificar la recolección de datos y la posterior modelación del fenómeno, se justifica y describe las variables elegidas y se realiza un análisis estadístico descriptivo de las mismas. En la tercera sección se describen y muestran los modelos obtenidos, y se estudia cuantitativamente el efecto de cada una de las variables. Particularmente importante resulta ver el efecto real y empírico de las tarifas sobre el uso del sistema (Goodwin y Williams, 1985; McKenzie y Goodwin, 1985), ya que es un elemento endógeno (manejado por la propia empresa) de fácil implementación en el corto plazo, cuyo impacto efectivo debe ser estudiado controlando por otros efectos, normalmente exógenos.

## 2. FORMULACION Y DATOS

La demanda por viajes en el Metro de Santiago,  $Y^M$ , puede ser vista como el resultado de la suma de los usuarios que, en cada par Origen-Destino, lo eligen. A su vez, en cada par  $i-j$  los usuarios corresponden al total de viajeros  $N_{ij}$  por la proporción que elige Metro,  $S_{ij}^M$ . Es decir

$$Y^M = \sum_i^Z \sum_j^Z N_{ij} \cdot S_{ij}^M \quad (1)$$

Esta formulación tan simple sirve para visualizar analíticamente al menos tres aspectos importantes. En primer lugar,  $Y^M$  es afectado por el total de zonas sobre las que tienen influencia, que se hace explícito a través del número de términos de las sumatorias,  $Z$ . En segundo lugar, los factores asociados a la generación de viajes (empleos o factores climáticos, por ejemplo), inciden funcionalmente a través de  $N_{ij}$ . Por último,  $S_{ij}^M$  recibe directamente la influencia de la disponibilidad de modos para ir de  $i$  a  $j$ , y de las características y tarifas de los mismos. Puesto de otra manera,

$$Y_M = f(Z, G, At, D) \quad (2)$$



donde G representa un vector de variables de generación de viajes, D contiene indicadores de disponibilidad de modos, At es el vector de atributos percibidos por los usuarios respecto a todos los modos relevantes en todos los pares.

De entre las muchas variables potenciales utilizables para representar el rol de Z, G, At y D, se decidió escoger aquellas que combinaban una capacidad efectiva de representar el efecto deseado con una razonable disponibilidad a partir de fuentes confiables; la información existente al respecto se resume en Tabla 1. Así, el nivel de empleo (Emp) en el Area Metropolitana fue escogido como la variable básica para generación, considerando también que el nivel de lluvia provoca una disminución de los viajes de carácter más discrecional; se incluyó por lo tanto los milímetros de agua caída en el mes, PP. El alcance del Metro en términos espaciales fue recogido por el número de estaciones, Ne, en tanto que se intentó captar la disponibilidad de modos alternativos a través de una medida de circulación efectiva de buses y automóviles, Bu y Au respectivamente, para lo cual se construyó índices a partir de los permisos de circulación y la restricción vehicular correspondiente al mes respectivo. El vector At incluyó las tarifas promedio de Metro (Pm) y bus (Pb) en cada mes, y el precio de la bencina, Benc. Se descartó el uso de indicadores de nivel de servicio ya que los primeros analizados presentaban pocas variaciones aparentes (tiempos promedios de viaje, cobertura, frecuencias, confort) y las fuentes eran poco confiables.

Obviamente, la variable dependiente es el flujo mensual de pasajeros movilizados por el Metro; sin embargo, debe considerarse que no todos los meses tienen el mismo número de días, razón por la cual se normalizó la serie a meses de 30 días mediante simple proporcionalidad. Por otra parte, se consideró sólo meses de comportamiento comparable de los usuarios, dejando de lado aquellos que incluían períodos de vacaciones (como Enero y Febrero) o actividades especiales (Diciembre y Marzo). Cabe señalar, por último, que se contempló la posibilidad de dos tipos de efecto en el tiempo, no explicables a través de variables de generación, distribución, o partición modal de los viajes: un efecto estacional, representado por la afluencia del mismo mes en el año anterior (Ye), y un efecto tendencial, capturado por la afluencia del mes anterior (Yt). Este tipo de fenómenos ha sido incorporado, aunque de diferente forma, en estudios anteriores (De Rus, 1990)

En la Tabla 2 se muestra la media, rango y coeficiente de variación de las variables ya descritas, considerando los meses de Abril a Noviembre entre los años 1979 y 1990. En la Tabla 3 se entregan los valores de la matriz de correlaciones entre pares variables, de donde se observa que no debería esperarse problemas serios de multicolinealidad.

TABLA 1. RESUMEN DE INFORMACION.

VARIABLE	d. Esp.	d.Temp.	PERIODO	FUENTE
Afluencia	estac.	M	76-91 (76-88)	Archivos METRO SA
	línea	M	76-91	
	línea	DL	79-91	
Pax loc col	RM	M	76-86	Bco Est.
	RM	M*	87-91	Casa de Moneda
Pasada est perm.	estac.	D	82-91	DICTUC
Tasa de ocup.	estac.	A(S)	82-91	DICTUC
Clasificación	estac.	A(S)	82-91	DICTUC
Precipitaciones	RM	D	75-91	DGM
Perm. de Circ.	RM (C)	A	77-90	MINTRATEL MUNICIP.
			91	Municip.
Lic.de Cond.	RM (C)	A (M)	86-91	Municip.
Restricción	RM	D	86-91	Archivos MINTRATEL
Tarifas METRO	línea	M	76-91	Informes METRO
Tarifas Buses	RM	M	78-91	INE
PGB, POB, DESOC.	RM	M	76-91	INE
EMPLEOS	RM	M	87-91	INE
		A	76-86	

M mensual

M\* solo algunos meses

DL día laboral

A anual

S semestral

D diario

RM Región Metropolitana

C comunas



TABLA 2. Descripción de variables, incluyendo tendencia Yt y estacionalidad Ye (91 obs)

Unidad	Media	D.E	Min	Max	C.V
YM [pax/mes]	10471300.00	2152153.22	5261981.00	14244100.00	0.21
Ye [pax/mes]	9693862.79	2722431.81	2736825.00	13870300.00	0.28
Yt [pax/mes]	10404100.00	2173624.49	5006561.00	14244100.00	0.21
Emp [empleo]	1447964.84	218312.53	1103900.00	1849200.00	0.15
Ne [estación]	33.80	4.34	22.00	37.00	0.13
Au [mil autos]	349.30	49.09	232.12	418.11	0.14
Bu [mil buses]	9.27	1.05	6.65	12.13	0.11
Pm [Dic91]	66.51	12.15	45.20	93.63	0.18
Pb [\$ Dic91]	91.32	28.56	40.16	131.99	0.31
PP [mm /mes]	45.94	60.71	0.00	344.30	1.32
Benc[\$ Dic91]	167.28	20.67	128.03	215.08	0.12

TABLA 3. Matriz de correlaciones (91 observaciones)

	YM	Ye	Yt	Emp	Ne	Au	Bu	Pm	Pb	PP
YM	1.00									
Ye	0.86	1.00								
Yt	0.94	0.85	1.00							
Emp	0.76	0.60	0.74	1.00						
Ne	0.89	0.90	0.88	0.56	1.00					
Au	0.77	0.84	0.78	0.43	0.89	1.00				
Bu	0.64	0.61	0.63	0.38	0.69	0.79	1.00			
Pm	0.69	0.77	0.73	0.62	0.73	0.62	0.35	1.00		
Pb	0.75	0.75	0.74	0.65	0.76	0.69	0.59	0.65	1.00	
PP	-0.17	-0.02	-0.13	-0.16	-0.05	-0.07	-0.17	0.04	-0.12	1.00

En las figuras 1 a 9 se muestra la evolución de la afluencia, empleo, precipitaciones, número de estaciones, buses y autos efectivos, precio de la bencina, y las tarifas de Metro y buses en los períodos considerados. Se observa de ellas que, salvo precipitaciones y precio de la bencina, todas las variables tienen una tendencia general a crecer en el tiempo, lo que explica los valores positivos de las correlaciones en la Tabla 3 sin que necesariamente esto signifique relación causal. Por último, y a manera ilustrativa solamente, se muestra la relación entre viajes y las variables consideradas más estructurales en la evolución a largo plazo de ellos: empleo (fig. 10) y número de estaciones (fig. 11). Cabe hacer notar que la información sobre empleos en el Area Metropolitana está disponible sólo en forma anual hasta 1986.



figura 1.-

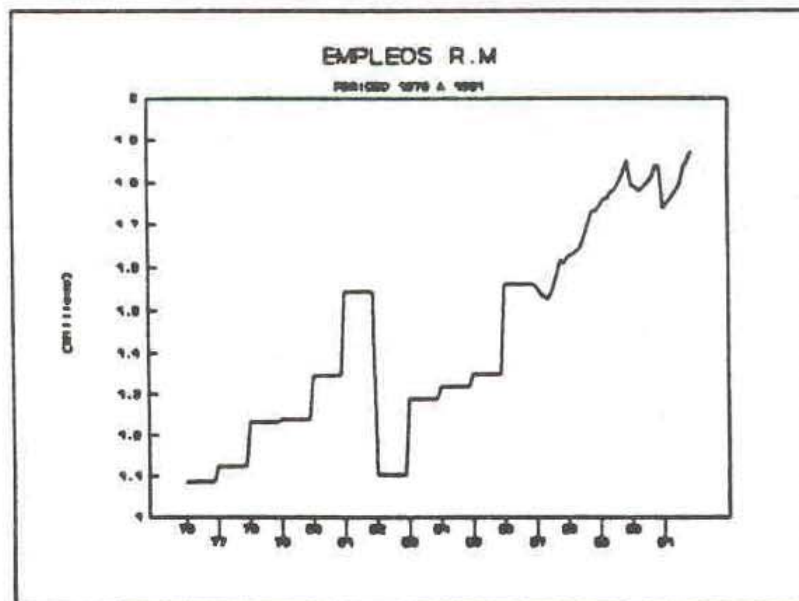


figura 2.-

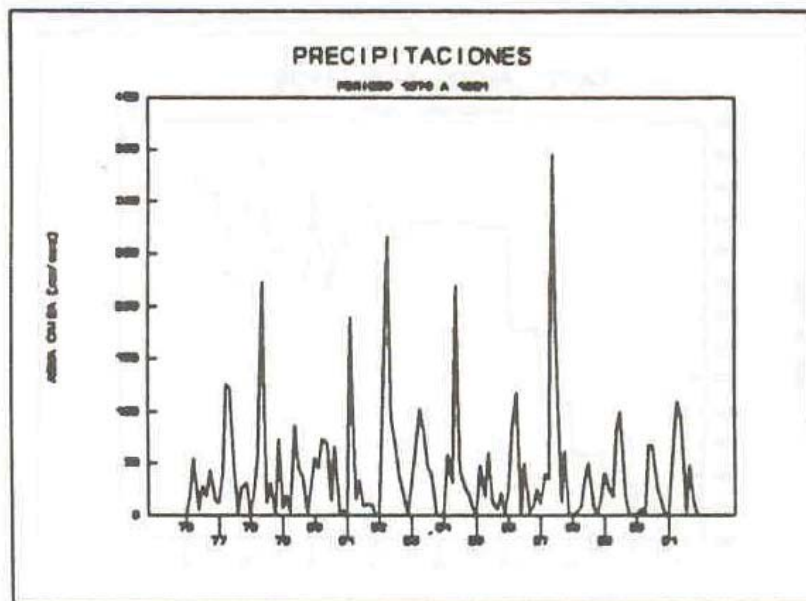


figura 3.-

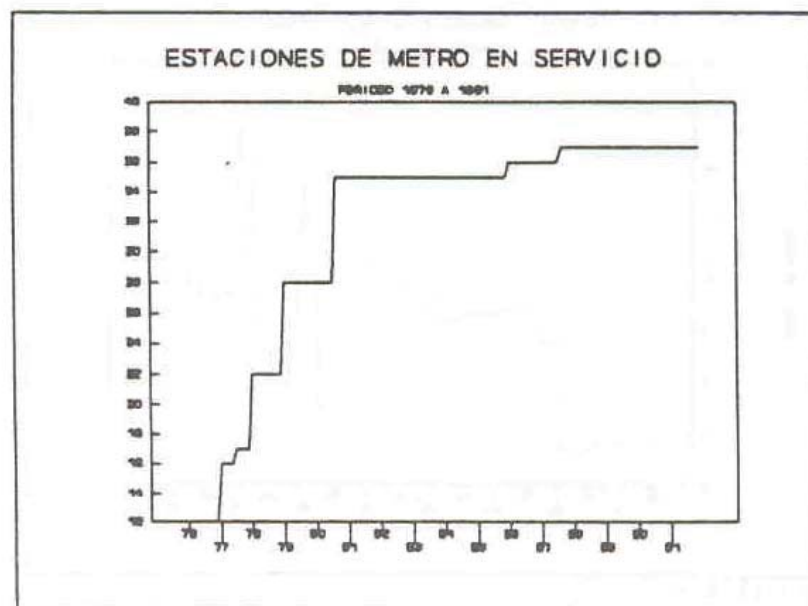


figura 4.-

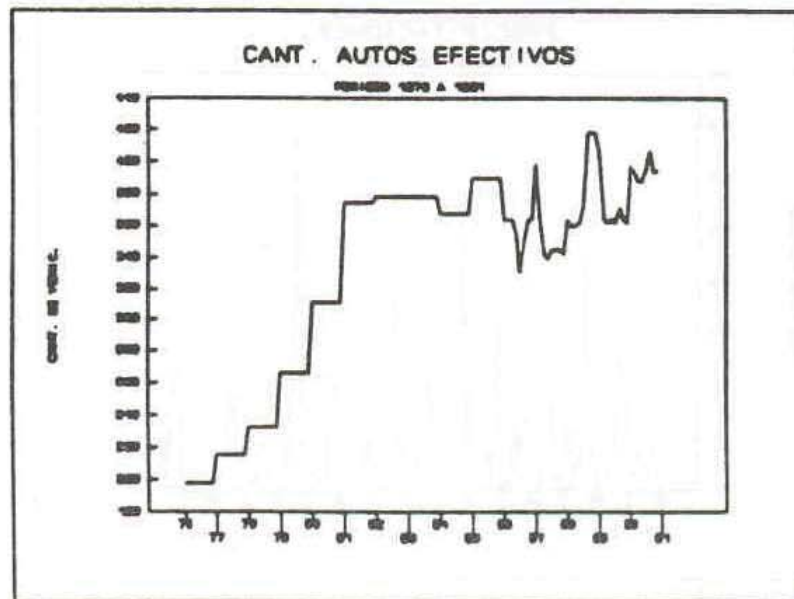


figura 5.-

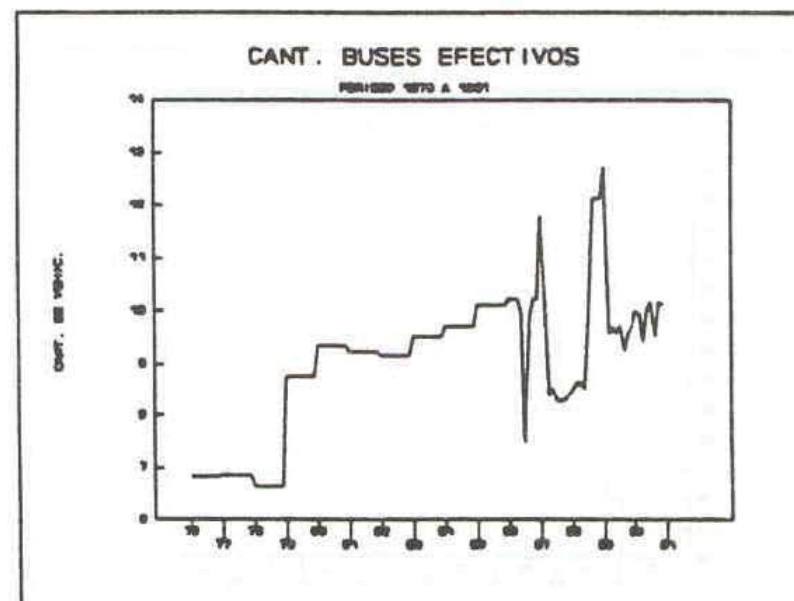


figura 6.-



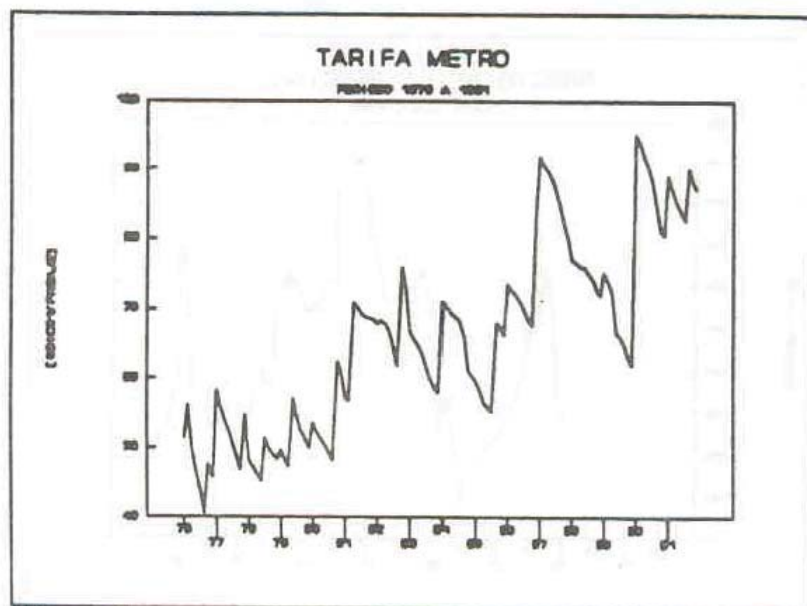


figura 7.-

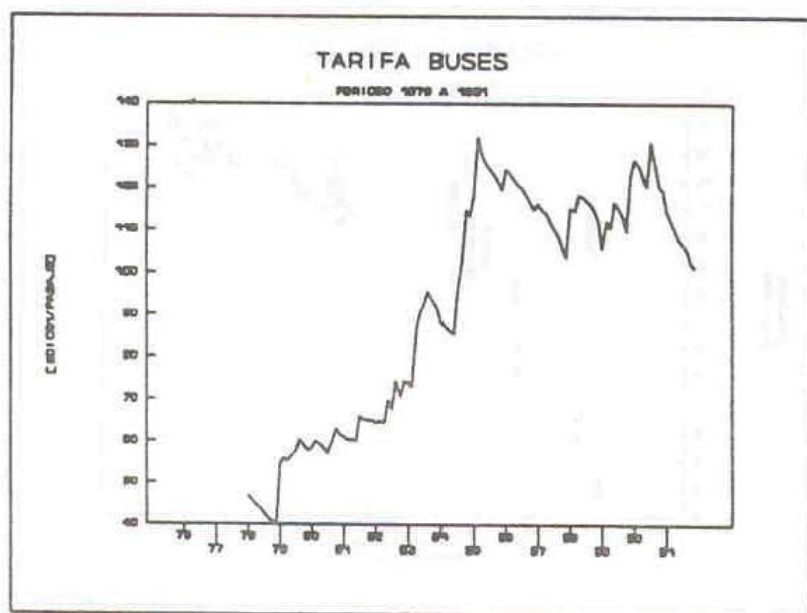


figura 8.-

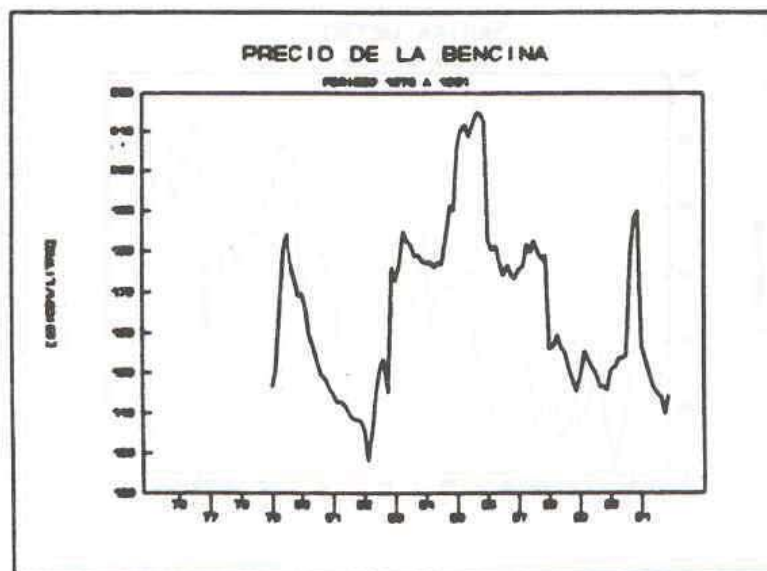


figura 9.-

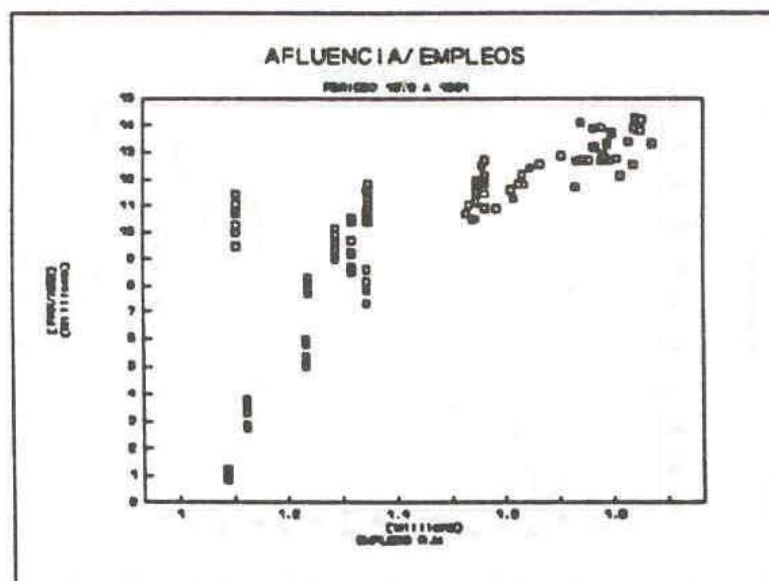


figura 10.-



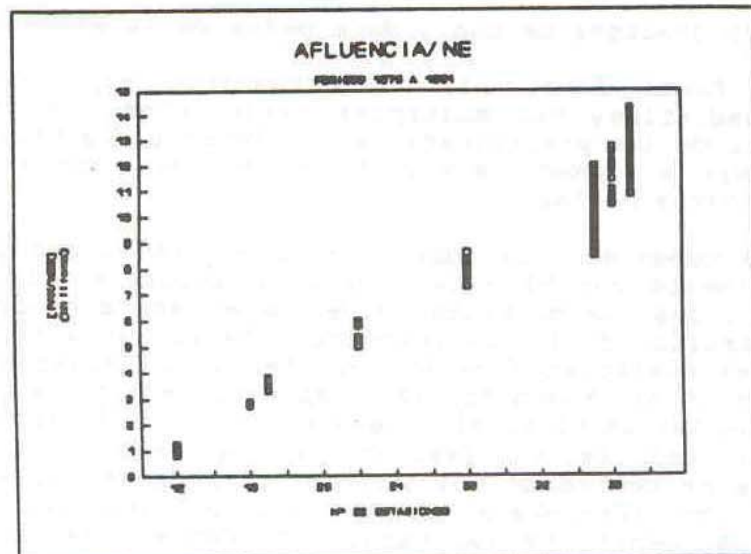


figura 11.-

### 3. MODELACION Y ANALISIS.

Se espera que las variables identificadas y descritas en la sección anterior contribuyan a explicar en diversa forma la evolución de los viajes en Metro de Santiago. Así, un empleo más en el área metropolitana debería generar al menos 40 viajes totales adicionales, de los cuales sólo una proporción serán hechos en Metro; si se considera los números globales y cierta inercia en la partición modal agregada, esta proporción debería ser algo menor que un 10%. Por otra parte, el rol de la disponibilidad de modos alternativos y sus tarifas no es el mismo para autos que para buses. En el primer caso, el uso no parece estar regido por el costo de corto plazo asociado a él (precio de la bencina), sino simplemente por su disponibilidad; en el segundo caso, no es el acceso al bus lo que parece primar en su competencia con el Metro, ya que la cobertura de recorridos en el período considerado se ha mantenido relativamente constante, sino el nivel de tarifa (nótese que el coeficiente de variación de Bu es el más bajo de entre las variables en la Tabla 1). Es por ello que se puede postular a priori que el efecto de la mayor disponibilidad de vehículos particulares sobre el uso de Metro será mejor captado por el acceso efectivo al automóvil (Au) que por el costo de la bencina (Benc); no así en el caso de los buses, donde la tarifa (Pb) será más importante que la disponibilidad (Bu). Luego, el modelo genérico propuesto tiene la forma

$$Y_M = f(Y_t, Y_e, Emp, PP, N_o, Au, Pm, Pb) \quad (3)$$

donde  $Y_t$  e  $Y_e$  representan los efectos tendencial y estacional

respectivamente (rezagos de uno y doce meses de la afluencia).

En cuanto a forma funcional, se postularon especificaciones lineales y cuadráticas con múltiples variaciones. En todos los casos el efecto de las precipitaciones se introdujo a través de su influencia sobre el poder generador del empleo, incluyendo una variable EPP además de Emp.

Los resultados deben ser juzgados no sólo por la bondad de ajuste sino principalmente por el signo, valor e interpretación de los coeficientes; todos los de primer orden deben ser entendidos como la derivada parcial de  $Y^m$  con respecto a la variable respectiva. Por ejemplo, el coeficiente de Au representa la variación de los viajes en Metro al aumentar la disponibilidad de automóviles manteniendo constantes el nivel de empleo, las precipitaciones, la extensión de la red, las tarifas, etc. En la Tabla 4 se presenta los resultados de cuatro de los modelos calibrados; el ajuste es muy bueno y una interpretación sensata permite ver que los parámetros están dentro de los rangos esperables, de los valores numéricos. Los mejores modelos cuadráticos entregaron resultados que, si bien son satisfactorios desde el punto de vista de signos y ajuste, no mostraron un poder explicativo adicional compatible con el gran número de nuevas variables incluidas (en sus versiones más reducidas), generando coeficientes mucho menos confiables.

Tanto por el valor y signo de los coeficientes como por parámetros de bondad estadística (ajuste, confiabilidad), el modelo elegido fue el 4; en los dos primeros se detectó fuerte autocorrelación en los errores, en tanto que el test F con respecto al modelo 3 indicó la relevancia de incorporar estacionalidad además de tendencia (el test por incorporación de variables está muy bien descrito en Maddala, 1985). Cabe hacer notar que el test para detectar autocorrelación de errores en modelos con rezago no es el tradicional test de Durbin-Watson, sino el test h de Durbin (ver Gujarati, 1988). Aunque la interpretación de los coeficientes es inmediata, vale la pena detenerse a analizar su signo y magnitud. Los primeros dos valores indican que las variables asociadas a generación de viajes, alcance espacial de la red, y efecto de los modos alternativos, explican sólo una parte de la evolución de la demanda por viajes en Metro, ya que los efectos tendencial y estacional mueven el origen mes a mes a la suma de 54% del flujo del mes anterior más el 20% del flujo del mismo mes en el año precedente. El efecto del empleo está dentro del rango discutido antes, generando uno a dos viajes adicionales en promedio. Cada nuevo permiso de circulación de automóviles significa una disminución entre cuatro y cinco viajes mensuales en Metro (también en el rango razonable si se hacen consideraciones parecidas al caso del empleo). Tal vez el resultado más interesante es el de la elasticidad precio calculada en la media de las observaciones a partir del coeficiente de la tarifa del Metro; se obtiene un valor de -0.1445, algo menor que -0.2 calculado en estudios anteriores (Donoso y Fernández, 1984). Por último, cabe señalar que el efecto de las precipitaciones resultó el más robusto de todos en signo y monto, indicando que el efecto generador de empleo es aminorado por



la lluvia, probablemente debido a la parcial supresión de viajes no obligados.

TABLA 4. Valores obtenidos para algunos modelos.

VARIABLE	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3	MODELO 4
Yt			0.67 (9.53)	0.54 (7.31)
Ye		0.39 (6.62)		0.20 (3.76)
Emp	1.76 (3.18)	2.67 (5.57)	0.91 (2.20)	1.52 (3.63)
Ne	219E3 (3.76)	174.6E3 (3.56)	112,5E3 (2.54)	112.7E3 (2.74)
Au	-2791.7 (0.61)	-4771.0 (1.29)	-3602.3 (1.09)	-4687.6 (1.52)
Pm	-2152.5 (0.18)	-27289 (2.46)	-12860 (1.37)	-23068 (2.52)
Pb	20183.0 (4.19)	6514.1 (1.44)	6518.2 (1.75)	1711.6 (0.46)
EPP	-2.51 (2.08)	-2.36 (2.34)	-1.42 (1.66)	-1.517 (1.90)
Rc <sup>2</sup>	0.83	0.86	0.90	0.91
h	0.96 (DW)	0.93 (DW)	0.38	0.38
Nº de Obs.	104	104	91	91

$\eta_{pm}$	-0.013 (0.17)	-0.174 (2.46)	-0.082 (1.37)	-0.146 (2.52)
-------------	------------------	------------------	------------------	------------------

Valores entre parentesis t-estadísticos

#### 4. SINTESIS Y CONCLUSIONES

A partir de series de tiempo obtenidas de diversas fuentes, se analizó el efecto de variables estructurales sobre la evolución del uso de sistema Metro en Santiago. Para ello se postuló un modelo genérico que captura efectos de generación de viajes, alcance espacial de la red y competencia modal. Entre los principales resultados cuantitativos, se detectó importantes efectos inerciales en el uso del sistema, un rol significativo de la tarifa aunque menos importante que el usualmente asignado, y un impacto relevante de la disponibilidad de automóviles.

El enfoque multivariado se probó útil para captar *ceteris paribus* el rol de cada una de las variables . Factores exógenos y estructurales como el nivel de empleo en la Región Metropolitana y la tasa de motorización tienen una influencia determinante sobre la cantidad total de usuarios del Metro; en el rango de variación observado de las variables más operativas, pareciera que éstas tienen un efecto local más ligado a fenómenos específicos, como se ha visto de los estudios de tarificación (trasbordos, afluencia por zona), que a la evolución global.

Del análisis de resultados se desprende la gran importancia de considerar al sistema en su conjunto, incluyendo otros modos y otras políticas sectoriales, cuando se observa y planifica la operación del Metro de Santiago. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que en un estudio de tipo estadístico como éste, no es posible captar el rol de factores que se han mantenido dentro de un rango permanente, como es el caso de las frecuencias ofrecidas, los tiempos de viaje, el largo de trenes o la calidad del servicio del sistema Metro (Webster, 1978). Es probable que estas variables de carácter operativo también jueguen un rol relevante en el nivel de afluencia, el que puede ser captado a través de estudios específicos de preferencias declaradas, por ejemplo.

Un modelo como el aquí presentado muestra evidentes ventajas en la proyección de la demanda, pero también en la detección del rol que juegan los elementos exógenos. En este sentido, se puede pensar en desarrollar esfuerzos para entender y modelar la demanda con niveles algo menos agregados, ya sea espacialmente (por línea o zona) o temporalmente (por período del día, o día laboral o festivo). Para ello se requiere información más detallada, y enfrentar el caso en forma potencialmente distinta; las recompensas desde el punto de vista de resultados pueden o no ser suficientes para trabajar en esta dirección, lo que sólo podrá detectarse con nuevas investigaciones.

#### **Agradecimientos.**

Esta investigación fue parcialmente financiada por FONDECYT, proyecto 1930890.

Agradecemos a Alejandro Tudela por su colaboración.



## **REFERENCIAS.**

- De Rus, G. (1990) Public Transport Demand Elasticities in Spain. **Journal of Transport Economics and Policy**, N°24, pp. 189-201.
- Donoso, P. y Fernández J. (1984) Elasticidades Demanda-Tarifa para Transporte Público: Aplicación al caso Chileno. **Apuntes de Ingeniería** 15, pp. 141-161.
- Goodwin, P. y Williams W. (1985) Public Transport Demand Models and Elasticity Measure: An Overview of Recent British Experience. **Transportation Research**, 19B, N°3, pp. 253-259.
- Gujarati, D. (1988) **Econometría Básica**. Editorial McGraw-Hill de Mexico S.A.
- Maddala, G.S. (1985) **Econometría**. Editorial McGraw-Hill de Mexico S.A.
- McKenzie, R. y Goodwin, P. (1985) Dynamic Estimation of Public Transport Demand Elasticities: Some New Evidence. **Traffic Engineering and Control**, February, pp. 58-63.
- Webster, F. (1978) Some Implications of the Results of Elasticity Determinations. **TRRL Supplementary Report** 413, pp. 54-60.