

**ANALISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS DE TRANSPORTE
SECUENCIAL Y DE EQUILIBRIO SIMULTANEO:
APLICACIONES AL CASO DE SANTIAGO**

Joaquín DE CEA, Enrique FERNANDEZ, Mariela BARQUIN

Departamento de Ingeniería de Transporte

Pontificia Universidad Católica de Chile

Santiago, Chile

Resumen

El presente trabajo tiene por objeto analizar críticamente los resultados que se obtienen al simular el comportamiento de un determinado sistema de transporte usando un modelo secuencial clásico y un modelo de equilibrio simultáneo. En ambas situaciones se supone que la generación y la atracción de viajes son fijas.

Se muestra en primer lugar el grado de consistencia de los niveles de servicio obtenidos por los modelos en sus distintas etapas para situaciones con distintos niveles de congestión. En segundo término, se estudia la sensibilidad de los resultados obtenidos en cada caso al introducir modificaciones a las variables de servicio utilizadas como datos de entrada, y en último término se comparan algunos de los principales resultados de ambos modelos para una situación determinada.

Finalmente, se discute el impacto que el uso de uno u otro tipo de modelo puede tener cuando éstos son usados como herramientas de evaluación de planes estratégicos de desarrollo de un sistema de transporte. El análisis completo se hace para el sistema de transporte de la ciudad de Santiago, usando información obtenida de ESTRAUS (Estudio de Evaluación y Desarrollo del Sistema de Transporte Urbano de la Ciudad de Santiago).

1. INTRODUCCION

El nivel de servicio de un medio de transporte suele medirse en términos del tiempo total de viaje, tarifa, conveniencia de itinerarios, confiabilidad, seguridad, comodidad, accesibilidad al servicio y otros factores. Algunos de estos componentes son dependientes del grado de utilización del sistema. Esta dependencia del nivel de servicio con respecto al flujo es una característica fundamental del mercado de transporte.

La determinación del grado de utilización del sistema, es decir, los flujos sobre cada ruta en las distintas redes de transporte, involucra la solución de un problema de equilibrio (Sheffi, 1985). Encontrar esta solución es especialmente complejo para los sistemas de transporte, dado que éstos tienen algunas características especiales, tales como la configuración de red de los servicios y la existencia de congestión en dichas redes.

La función de oferta se define a nivel de cada arco de la red como una función de costos medios. Sin embargo, desde el punto de vista de la demanda, la unidad relevante es el viaje entre un par origen-destino. Este viaje se realiza a través de una ruta compuesta por diferentes arcos de la red. Es decir, la demanda por viajes de los usuarios, está definida a nivel de pares origen-destino y no a nivel de arcos.

Al hablar de equilibrio en sistemas de transporte, existen dos tipos diferentes a considerar. El primero corresponde al equilibrio de flujos sobre la red en la etapa de asignación de viajes (Equilibrio de Tráfico). El segundo es el que debe darse entre los niveles de servicio obtenidos en la etapa de asignación y aquellos utilizados en las etapas anteriores del modelo de transporte (Equilibrio de Mercado o equilibrio demanda/oferta) (ver Fernández y Friesz, 1983).

El modelo de transporte, en su enfoque tradicional (Modelo Secuencial), consta de cuatro etapas secuenciales que están relacionadas a las decisiones típicas que los usuarios toman al realizar un viaje. Estas etapas son Generación de Viajes, Distribución de Viajes, Partición Modal y Asignación de Viajes. Este modelo constituye una aproximación a la solución del problema de predicción del equilibrio demanda-oferta en un mercado de transporte, y tiene algunas limitaciones importantes.

Estas radican básicamente en la inconsistencia entre los valores de las variables de servicio utilizadas en las etapas de distribución y partición modal, y las variables de servicio obtenidas finalmente como resultado de la asignación de los viajes a las distintas redes.

Tal inconsistencia se produce debido a que el Modelo Secuencial requiere

suponer en las primeras etapas los valores de los niveles de servicio en la red, en orden a predecir el número de viajes realizados entre cada par origen-destino y en cada modo de transporte . Sin embargo, estos niveles de servicio solamente pueden conocerse con propiedad en la etapa posterior de asignación de viajes, y no existe ninguna garantía que estos valores sean consistentes con aquellos supuestos en las etapas iniciales.

Sólo en ciertos casos, en que las variables de servicio en la red no experimentan grandes variaciones con los niveles de flujos asignados – es decir, cuando existen bajos niveles de congestión – dicha inconsistencia puede resultar poco importante. Cuando los niveles de congestión en la red son altos, sin embargo, se produce una fuerte inconsistencia de los valores de niveles de servicio dentro del análisis.

Con el objeto de intentar una solución a este problema, es común utilizar en la práctica un proceso iterativo en el cual se resuelven, durante cada iteración, las etapas del modelo secuencial utilizando como input las variables de servicio obtenidas en la etapa final de la iteración anterior. Desafortunadamente, esto no resuelve el problema debido a que, en general, este proceso no converge.

A fin de superar las limitaciones mencionadas se ha avanzado en el planteamiento de modelos que resuelven simultáneamente las etapas de demanda y oferta, permitiendo así obtener un patrón de flujos de equilibrio en la red y niveles de servicio consistentes en todo el análisis. Existen varias formulaciones dependiendo de las etapas que se consideran en conjunto (Florian y Nguyen, 1978; Evans, 1976; Fernández y Friesz, 1983; Sheffi, 1985). En este caso se analiza un modelo de distribución, partición modal y asignación conjunta.

2. MODELO DE EQUILIBRIO SIMULTANEO

2.1 Descripción General

El modelo de Equilibrio Simultáneo utilizado en este análisis corresponde al modelo desarrollado en ESTRAUS (SECTU, 1989). En él se resuelven tres de las cuatro etapas del modelo clásico de transporte en forma simultánea. Se excluye de este proceso la etapa de Generación de Viajes, la cual sigue siendo exógena y previa al proceso de equilibrio.

El problema de predicción del equilibrio simultáneo se resuelve en este caso utilizando un método del tipo Jacobi o Diagonalización, debido a la asimetría que presenta la red por la no separabilidad de las funciones de costo en arcos y demanda de viajes entre pares origen-destino.

Dicho método (ver Florian, 1977; Abdulaal y Le Blanc, 1979) consiste básicamente en un procedimiento iterativo en el que al interior de una iteración las funciones de costo y demanda se hacen separables (se diagonalizan). Así es posible plantear un problema de optimización equivalente que es resuelto utilizando el algoritmo de Frank-Wolfe (mayores detalles sobre la implementación de este modelo pueden verse en Fernández y De Cea, 1990).

2.2 Formulación del Modelo

La formulación de la red de transporte (red básica) considera un equilibrio bimodal entre vehículos de transporte privado (autos y taxis) y vehículos de transporte público (buses y taxicolectivos), considerando explícitamente las interacciones de congestión existentes entre ellos dado que operan sobre la misma infraestructura y compiten por la misma capacidad. Por este motivo, la codificación de la red incluye una descripción detallada de los servicios de transporte público.

La red básica, utilizada para la asignación de transporte privado, está representada por un grafo $G = (\mathcal{N}, \mathcal{A})$, donde \mathcal{N} es el conjunto de nodos y \mathcal{A} el conjunto de arcos. El primero representa las intersecciones de calles y los centroides de las zonas (localización del origen y destino de los viajes), y el segundo conjunto representa las calles de la ciudad.

Además, se considera una red para cada uno de los modos de transporte público, que representa los servicios ofrecidos a los usuarios, y está dada por el grafo $G^m = (\mathcal{N}^m, \mathcal{L}^m)$, en el cual \mathcal{N}^m es un subconjunto de \mathcal{N} y \mathcal{L}^m es el conjunto de todas las líneas del modo m sobre la red.

En el modelo se considera un total de cinco modos de transporte público, tres puros y dos compuestos: bus (incluye taxibus), taxicolectivo, metro, bus-metro y taxicolectivo-metro.

La modelación de la demanda (Distribución y Partición Modal) considera tres propósitos de viaje (trabajo, estudio y otros) y trece categorías de usuarios, resultantes de la combinación de cinco niveles de ingreso y tres niveles de propiedad de automóvil (sin auto, un auto, dos o más autos), eliminando aquellas dos combinaciones inconsistentes entre ambos niveles.

Para la distribución de viajes se utilizaron modelos gravitacionales simple y doblemente acotados, y para la partición modal, modelos logit simple y jerárquico, dependiendo del propósito de viaje modelado.

La notación utilizada en el modelo es la siguiente:

W : Conjunto de pares origen-destino O-D.

w	: Elemento del conjunto W , en que $w = (i, j)$ con i, j centroides.
f_a	: Flujo total de vehículos de transporte privado en el arco a .
c_a	: Costo medio de viaje en el arco a .
R	: Conjunto de rutas disponibles para transporte privado en G .
R_w^m	: Conjunto de rutas disponibles para el modo m asociado al par w .
r	: Índice para designar una ruta.
h_r	: Flujo en transporte privado sobre la ruta r .
C_r	: Costo de viaje sobre la ruta r .
n	: Índice para designar una categoría de usuario.
p	: Índice para designar un propósito de viaje.
m	: Índice para designar un modo de transporte.
O_i^{pn}	: Número total de viajes originados en la zona i , por usuarios tipo n , con propósito p .
D_j^p	: Número total de viajes atraídos por la zona j , con propósito p .
T_w^{pnm}	: Número total de viajes entre el par O-D w , con propósito p , categoría de usuario n , en el modo m .
T_w^{pn}	: Número total de viajes entre el par O-D w , para usuarios tipo n , con propósito p .
h_r^{pnm}	: Número de viajes realizados por usuarios tipo n , con propósito p , en el modo m , que utilizan la ruta r .
C_w^{pnm}	: Costo generalizado de viaje entre el par w , en el modo m , para usuarios tipo n y propósito p .
δ_{ar}	: Matriz de incidencia arco-ruta: toma el valor 1 si el arco a pertenece a la ruta r 0 en los otros casos.

La factibilidad de los flujos está dada por el cumplimiento de ciertas restricciones, a saber:

$$T_w^{pnm} = \sum_{r \in R_w^m} h_r^{pnm}, \quad \forall (w, p, n, m) \quad (2.1)$$

$$O_i^{pn} = \sum_j T_w^{pn}, \quad \forall (i, p, n) \quad (2.2)$$

$$D_j^p = \sum_i T_w^{pn}, \quad \forall (j, p, n) \quad (2.3)$$

$$f_a = \sum_{r \in R} \delta_{ar} h_r, \quad \forall a \quad (2.4)$$

El problema diagonalizado de Equilibrio Simultáneo para una iteración dada

del algoritmo de diagonalización, puede escribirse como el siguiente problema de programación matemática (Bravo, 1989; Fernández y De Cea, 1990):

$$(P1) : \min_{\{f_a, T_w^{pnm}\}} Z = \sum_{a \in A} \int_0^{f_a} \bar{c}_a(x) d(x) - \sum_{w \in W} \sum_m \sum_{p,n} \int_0^{T_w^{pnm}} \bar{\theta}_w^{pnm}(y) d(y) \quad (2.5)$$

$$\{s.a.\} : T_w^{pnm}(C_w^{pnm}) = \sum_{r \in R_w^m} h_r^{pnm}, \quad \forall (w, p, n, m) \quad (2.6)$$

$$O_i^{pn} = \sum_j T_w^{pn}, \quad \forall (i, p, n) \quad (2.7)$$

$$D_j^p = \sum_i T_w^{pn}, \quad \forall (j, p, n) \quad (2.8)$$

$$f_a = \sum_{r \in R} \delta_{ar} h_r, \quad \forall a \quad (2.9)$$

El planteamiento de este problema de optimización equivalente es posible dado que se cumplen las siguientes condiciones:

- La función de costo \bar{c}_a es estrictamente creciente y separable, ya que depende sólo de los flujos de autos, puesto que los flujos de vehículos de transporte público son constantes:

$$\bar{c}_a(F) = \bar{c}_a(f_a), \quad \forall a \in A$$

- La función de demanda es estrictamente decreciente y separable, y se define como:

$$\bar{T}_w^{pnm}(C) = T_w^{pnm}(C_w^{pnm}, \bar{C}_v^{xyz}; \quad \forall (v, (xyz)) \neq (w, (pnm))),$$

donde \bar{C}_v^{xyz} tienen valores fijos e iguales a los obtenidos al final de la iteración anterior.

La función inversa está dada por:

$$\bar{\theta}_w^{pnm} = \theta_w^{pnm}(\bar{T}_w^{pnm})$$

La formulación del problema permite realizar la asignación de flujos sobre cada red modal en forma separada al interior de cada iteración del algoritmo de diagonalización.

Para los modos de transporte público se supone que los niveles de servicio son independientes de los flujos de pasajeros. Sin embargo, para aquellos que

comparten infraestructura con el transporte privado, los niveles de servicio dependen del flujo total de vehículos sobre la red. Por lo tanto, no es necesario asignar las matrices de viajes modales sobre cada red de transporte público en cada diagonalización. Sólo se cargan en la etapa final de asignación de viajes, una vez obtenidas las variables de servicio correspondientes a la solución de equilibrio, y las matrices de viajes por modo de las etapas finales de distribución y partición modal (Fernández y De Cea, 1990).

3. ANALISIS COMPARATIVO

3.1 Modelos Utilizados

El modelo de Equilibrio Simultáneo empleado en el análisis comparativo presentado en este trabajo corresponde, como se dijo anteriormente, al modelo de equilibrio implementado en ESTRAUS.

La implementación del Modelo Secuencial consistió básicamente en utilizar los módulos desarrollados en dicho estudio de tal forma de realizar las etapas de distribución, partición modal y asignación en forma secuencial.

La etapa de Generación de Viajes es externa a ambos modelos, por lo cual los vectores de viajes originados y atraídos por cada zona son datos fijos.

3.2 Escenario de Análisis

El área de estudio corresponde a aquella definida en ESTRAUS, y comprende las 32 comunas de la ciudad de Santiago más las comunas de Puente Alto y San Bernardo.

Dicha área se encuentra dividida en 264 zonas, considerando que las actividades generadoras y atractoras de viajes están concentradas en sus respectivos centroides. Estos, por consiguiente, constituyen los orígenes y destinos de los viajes, y permiten conectar las zonas a la red de transporte mediante arcos de acceso.

Los vectores de viajes originados y atraídos por cada zona y utilizados como datos fijos en las corridas de ambos modelos, corresponden a los que se estimaron para los años y períodos modelados en ESTRAUS.

La red está modelada en base a la red estratégica de Santiago, y sus dimensiones para el año 1986 (año base en ESTRAUS) son de 804 nodos, 2.530 arcos unidireccionales, 608 líneas de buses y taxibuses, y 268 líneas de taxicolectivos (en ambos casos se trata de líneas unidireccionales).

Sobre este escenario se han definido distintas situaciones del sistema de transporte urbano en Santiago, para los años 1986, 1991 y 2001, y para los períodos

punta y fuera de punta. Estas situaciones dan origen a distintas redes, con diversos niveles de congestión.

Todas estas redes fueron utilizadas para correr los modelos Secuencial y de Equilibrio Simultáneo, y hacer el análisis comparativo que se describe a continuación.

3.3 Alcance del Análisis Comparativo

3.3.1 Análisis de consistencia de niveles de servicio

El objetivo de esta parte del análisis es estudiar el problema que se produce en el Modelo Secuencial en cuanto a la inconsistencia de niveles de servicio en sus diferentes etapas.

En el caso de este modelo se requiere suponer inicialmente valores para las variables de servicio de los modos de transporte, los cuales constituyen datos de entrada para las etapas de distribución y partición modal. Estos valores corresponden al conjunto de variables de servicio iniciales. Posteriormente, y luego de realizar la etapa de asignación, los flujos de vehículos sobre los arcos de la red de transporte privado determinan los tiempos de viaje en cada uno de ellos y consecuentemente, las variables de servicio para los modos de transporte privado y público. Estas corresponden al segundo conjunto de variables que son comparadas con las iniciales.

Para el caso del Modelo de Equilibrio Simultáneo, si se itera hasta alcanzar el óptimo, los niveles de servicio que resultan del proceso de diagonalización y aquellos que se obtienen de las etapas finales de distribución, partición modal y asignación de viajes sobre las redes son los mismos. Sin embargo, dadas las restricciones de recursos computacionales que existen, no es posible obtener soluciones con 0% de error. En este caso, se ha fijado un 5% como test de parada del algoritmo. Por este motivo, se producen diferencias entre los niveles de servicio, las cuales se analizan en esta sección.

La metodología utilizada en el análisis consistió en correr ambos modelos para distintas redes y hacer las comparaciones de niveles de servicio correspondientes.

3.3.2 Análisis de sensibilidad de los modelos con respecto a las variables de servicio iniciales

Otro problema que presenta el Modelo Secuencial es la fuerte dependencia de los resultados que entrega con respecto a las variables de servicio utilizadas como punto de partida.

El modelo de Equilibrio Simultáneo, en cambio, es capaz de predecir los flujos de equilibrio sobre la red y los niveles de servicio asociados a ellos, a partir de una solución inicial factible cualquiera.

Este análisis de sensibilidad tiene por objeto estudiar la dependencia que presenta el Modelo Secuencial respecto de los niveles de servicio iniciales, y comparativamente, mostrar cómo se soluciona este problema en el Modelo de Equilibrio Simultáneo.

La metodología utilizada consistió en correr cada modelo a partir de dos conjuntos diferentes de variables de servicio, y comparar los resultados entregados por ellos en los distintos casos.

3.3.3 Análisis de resultados entregados por los modelos para una situación dada

Las limitaciones que presenta el Modelo Secuencial, especialmente relevantes cuando se aplica a situaciones con niveles de congestión importantes en la red, hacen pensar que los resultados obtenidos a través de su aplicación difieren en gran medida de los que se obtienen mediante el Modelo de Equilibrio Simultáneo.

Esta tercera parte del análisis comparativo tiene como objetivo establecer las diferencias entre los resultados entregados por ambos modelos para una situación dada sobre la red.

El análisis incluyó corridas de ambos modelos para redes que presentan distintos niveles de congestión en sus arcos.

4. RESULTADOS

La gran cantidad de información que es posible obtener de la comparación entre ambos modelos hizo necesario seleccionar aquellos resultados más relevantes y que muestran más claramente las diferencias que se producen al utilizar cada uno de ellos. Estos resultados se presentan a continuación.

4.1 Análisis de consistencia de niveles de servicio

Las variables de servicio utilizadas como datos de entrada de los modelos fueron aquellas observadas en el sistema de transporte urbano en Santiago para el año 1986, en el período correspondiente (punta mañana, AM, y fuera de punta, FP).

La tabla 4.1 resume algunos resultados obtenidos al aplicar el Modelo Secuencial a las redes de los períodos punta mañana y fuera de punta del año 1986. En ella se muestra el análisis de las variables de servicio tiempo de viaje en

transporte privado y costo generalizado en modo bus, indicándose el porcentaje de pares origen-destino para los que la diferencia porcentual entre las variables de servicio iniciales y finales resultan menores que el 1% y el 5% de los valores iniciales.

	Tiempo de viaje en auto		Costo generalizado bus	
	Dif. < 1%	Dif. < 5%	Dif. < 1%	Dif. < 5%
AM 1986	25.95%	66.07%	57.79%	94.92%
FP 1986	35.49%	84.12%	59.67%	87.11%

Tabla 4.1 Resultados Análisis de Consistencia M. Secuencial

Puede observarse que al utilizar el Modelo Secuencial para situaciones de poca congestión (especialmente el período fuera de punta) el grado de consistencia entre las variables supuestas en las etapas iniciales y aquellas que se obtienen como resultado de la asignación de viajes es alto. En el caso de la variable tiempo de viaje en transporte privado, la diferencia entre el valor inicial y final de la variable es menor de 5% para un 66.07% de los pares origen-destino en período punta, y para un 84.12% en período fuera de punta. Mejores resultados se obtienen para la variable costo generalizado de viaje en bus entre pares de zonas, como lo muestra la tabla.

Las figuras 4.1 y 4.2 muestran gráficamente estos resultados. En ellas están representados los valores iniciales versus los valores finales de las variables.

Si se utiliza el Modelo Secuencial para estimar situaciones de mayor congestión como son los períodos punta mañana de los años 1991 y 2001 a partir de los niveles de servicio de los distintos modos de transporte observados en el año 1986, el grado de inconsistencia es mucho más alto que los observados anteriormente.

La tabla 4.2 muestra estos resultados. Al simular el año 1991 se observa que, para la variable de servicio tiempo de viaje en transporte privado, sólo un 13.32% de los pares origen-destino tienen diferencias entre el valor inicial y final de la variable de menos de un 5%, y un 24.63% de los pares con diferencias menores de 10%. Similares resultados se obtienen al analizar los costos generalizados de bus. El 18.33% de los pares O-D tienen diferencias menores de 5%, y el 30.73% menores de 10%. Los gráficos de las figuras 4.3 muestran claramente que los puntos (valor inicial, valor final) no se ajustan a la recta $y = x$.

La situación es aún más crítica cuando se aplica el Modelo Secuencial a la red del año 2001, período punta. El alto nivel de congestión que existe sobre ella produce una gran inconsistencia de niveles de servicio en el modelo. Sólo un 1.12% de los tiempos de viaje en auto entre pares de zonas logra diferencias menores de 10%, cifra que aumenta un poco para el caso del costo generalizado en bus llegando a un 4.04%. En las figuras 4.4 se pueden observar estos resultados gráficamente.

	Tiempo de viaje en auto		Costo generalizado bus	
	Dif. < 5%	Dif. < 10%	Dif. < 5%	Dif. < 10%
Modelo Secuencial				
AM 1991	13.32%	24.63%	18.33%	30.73%
AM 2001	0.61%	1.12%	2.65%	4.04%
Modelo de Equilibrio Simultáneo				
AM 1991	74.08%	94.18%	97.11%	99.10%
AM 2001	17.30%	35.66% ¹	43.41%	81.26%

Tabla 4.2 Resultados Análisis de Consistencia M. Secuencial y M. Equilibrio

Con el objeto de comparar y mostrar cómo el problema de inconsistencia de niveles de servicio se soluciona con el Modelo de Equilibrio Simultáneo, éste se aplicó a las mismas situaciones anteriores de mayor congestión (períodos punta mañana de los años 1991 y 2001), a partir de las mismas variables de servicio anteriores. Los resultados se muestran en la tabla 4.2, y éstos indican que el grado de consistencia en ambos casos es alto.

En la situación AM 1991 el algoritmo de diagonalización realizó 6 iteraciones, lográndose un error de 3.041% en flujos y 4.468% en viajes. En el caso del período punta AM 2001, situación de alta congestión, se alcanzó un error de 4.999% en flujos y 9.812% en viajes con 15 iteraciones. Las diferencias entre las variables de servicio resultantes del Modelo de Equilibrio y las que se obtienen de la asignación final de viajes sobre las redes son reflejo de los porcentajes de error asociados a

¹ En este caso, un 69.68% de los pares O-D tuvieron diferencias menores de 20%.

cada solución de equilibrio.²

Gráficamente, los resultados anteriores quedan representados en las figuras 4.5 y 4.6.

4.2 Análisis de sensibilidad de los modelos con respecto a las variables de servicio iniciales

Se realizaron dos corridas de cada modelo para cada situación analizada. La primera de ellas (Corrida 1) se inició con las variables de servicio correspondientes al año 1986, y en la segunda (Corrida 2) se utilizaron variables de servicio obtenidas como resultado de las corridas reportadas en ESTRAUS para los años y períodos analizados en este trabajo.³ Las dos soluciones de partida corresponden a situaciones de operación significativamente distintas sobre cada red estudiada, lo que provee una adecuada situación de comparación entre ambos modelos en cuanto a la dependencia de sus resultados con respecto a las variables de servicio iniciales utilizadas.

Modelo Secuencial

En la tabla 4.3 se han incluido las particiones modales que entregaron las dos corridas del Modelo Secuencial para los períodos punta mañana de los años 1991 y 2001. Analizando estos valores se puede observar que los resultados de las corridas para el año 2001 difieren en gran medida, esto debido a que en tal caso la red se encuentra altamente congestionada, mucho más que para el año 1991.

En la Corrida 1 las variables de servicio utilizadas para predecir el comportamiento del sistema difieren fuertemente de aquellas que deberían observarse en el año 2001 dado el número de vehículos que circulan sobre la red. Esto hace que el Modelo Secuencial entregue resultados muy distintos de los que se obtienen considerando niveles de servicio acordes a las condiciones de operación del año 2001.

La situación para el año 1991 es similar, pero en menor grado. Las variables de servicio supuestas en la Corrida 1 no son tan significativamente distintas de las que deberían observarse en dicho año, y por lo tanto los resultados entregados

² Las medidas de error están dadas por las diferencias porcentuales de flujos en arcos y viajes entre pares O-D entre soluciones de iteraciones sucesivas del algoritmo de diagonalización.

³ Los indicadores de convergencia de estas corridas son significativamente peores que los obtenidos en las corridas del Modelo de Equilibrio realizadas en este análisis.

por el Modelo Secuencial no se alejan demasiado de aquellos que se obtienen con variables de servicio cercanas a la situación de equilibrio sobre la red.

Modo	AM 1991		AM 2001	
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 1	Corrida 2
Caminata	309.833	359.618	276.360	490.534
Autochofer	131.501	129.758	280.724	261.977
Autoacomp.	101.242	96.202	215.299	179.840
Taxi	45.534	39.171	59.910	48.667
Taxicolectivo	32.076	37.435	22.312	43.996
Bus	513.157	455.508	781.247	529.086
Metro	14.298	19.520	18.724	46.364
Autoch. - Metro	2.015	3.344	1.447	10.390
Autoac. - Metro	1.189	2.019	799	6.375
Taxicol. - Metro	6.497	9.249	8.751	21.938
Bus - Metro	11.968	17.315	18.474	44.837
Total	1.169.310	1.169.139	1.684.047	1.684.004

Tabla 4.3 Comparación de Particiones Modales, M. Secuencial

Modo	AM 1991		AM 2001	
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 1	Corrida 2
Caminata	355.071	355.261	474.963	473.988
Autochofer	129.276	129.359	261.293	262.581
Autoacomp.	96.014	96.273	178.562	179.895
Taxi	43.119	42.959	52.644	49.000
Taxicolectivo	36.732	36.777	42.467	43.871
Bus	458.550	457.819	549.214	551.070
Metro	19.110	19.259	45.157	44.605
Autoch. - Metro	3.153	3.163	9.457	9.429
Autoac. - Metro	1.910	1.917	5.807	5.749
Taxicol. - Metro	9.093	9.124	21.029	20.583
Bus - Metro	17.113	17.229	43.460	43.231
Total	1.169.148	1.169.140	1.684.057	1.684.002

Tabla 4.4 Comparación de Particiones Modales, M. de Equilibrio

Modelo de Equilibrio Simultáneo

La tabla 4.4 contiene las particiones modales para las dos corridas del modelo de los años 1991 y 2001, períodos punta mañana. Se puede ver que en ambos casos los resultados son muy parecidos.

El Modelo de Equilibrio Simultáneo converge a la misma solución a partir de dos conjuntos de niveles de servicio muy distintos. Sin embargo, la velocidad de convergencia es mayor si se parte de una solución inicial correspondiente a condiciones de operación del sistema similares a las de la situación analizada. En el caso del año 1991, la Corrida 1 convergió en 6 iteraciones y la Corrida 2 en 1, con medidas de precisión de flujos y viajes menores de 5% en ambos casos. Las corridas del año 2001, debido al alto nivel de congestión, alcanzan niveles de precisión algo superiores al 5% con 15 iteraciones en la Corrida 1 y 9 iteraciones en la Corrida 2.

Otros niveles de comparación entre las corridas del Modelo de Equilibrio para los años 1991 y 2001 muestran claramente que las soluciones entregadas por ellas para cada situación son prácticamente iguales.

4.3 Análisis de resultados entregados por los modelos para una situación dada

Las corridas comparadas corresponden a las Corridas 1 de la sección anterior, es decir, las corridas de ambos modelos que se iniciaron con variables de servicio observadas sobre las redes el año 1986.

Mirando en las tablas 4.3 y 4.4 las columnas correspondientes a Corrida 1 del año 1991, pueden verse las diferencias que se producen entre ambos modelos a nivel de partición modal de viajes en el período. Para el modo bus, por ejemplo, existe una variación de 11.91% del número de viajes en el Modelo Secuencial con respecto al valor entregado por el Modelo de Equilibrio, y para los modos de metro el porcentaje de variación es de 28.61%.

En las corridas del año 2001, los resultados de ambos modelos presentan diferencias aún mayores. Así por ejemplo, los viajes en modo bus aumentan un 42.25% en el Modelo Secuencial con respecto al Modelo de Equilibrio, y los viajes en los modos de metro disminuyen un 61.42%.

Estas diferencias se explican por el hecho que en las corridas del Modelo Secuencial se supusieron variables de servicio correspondientes a la operación del sistema en el año 1986, con niveles de congestión menores que en el año 1991 y mucho menores que en el año 2001, lo que implica suponer mejores niveles de servicio sobre la superficie que los que existirían dadas las demandas de estos años. De esta forma, el Modelo Secuencial predice más viajes en bus que los que se producen en una situación de equilibrio sobre las redes de los años 1991 y 2001, y menos viajes en la red de Metro. Esto porque al considerarse niveles de servicio constantes en el modo metro, éste no resulta ser una alternativa tan

atractiva con respecto a los buses como lo es en situaciones de alta congestión en la superficie.

La comparación de resultados entregados por ambos modelos en otros niveles muestra por ejemplo que la asignación de vehículos a la red vial es mayor en el caso del Modelo Secuencial, lo cual es consistente con lo explicado anteriormente: las mejores condiciones de operación existentes sobre la superficie incentivan el uso del automóvil para aquellos usuarios que disponen de él.

En las figuras 4.7 y 4.8 se han graficado las cargas de pasajeros en las líneas de metro entregadas por ambos modelos para las corridas AM 1991 y AM 2001. En ellas se puede observar claramente la subestimación que hace el Modelo Secuencial del número de pasajeros transportados en ambas líneas. La situación es más crítica para el año 2001 dadas las variables de servicio supuestas en este modelo, como se explica más arriba.

Estos resultados muestran el impacto que tendría la utilización del Modelo Secuencial por ejemplo en la evaluación de una nueva línea de metro en Santiago. La demanda por este modo podría estar fuertemente subestimada, especialmente si se quiere obtener estimaciones futuras a partir de datos observados en la operación actual del Metro, lo cual repercutiría directamente en el cálculo de beneficios del proyecto y por ende en su rentabilidad.

5. CONCLUSIONES

El Modelo Secuencial de Transporte presenta serios problemas que limitan su utilización para estimar el comportamiento de sistemas de transporte.

Los mayores problemas son la inconsistencia de niveles de servicio en las distintas etapas del modelo y su fuerte dependencia de las variables de servicio utilizadas como punto de partida.

El Modelo de Equilibrio Simultáneo soluciona estos problemas, obteniendo flujos de equilibrio para el sistema y variables de servicio consistentes en todas las etapas del modelo.

Los problemas del Modelo Secuencial traen como consecuencia que los resultados que entrega difieren en gran medida de los que se obtienen utilizando el Modelo de Equilibrio Simultáneo, conceptualmente más adecuado. Estas diferencias son especialmente notables cuando se trata de estimar el comportamiento en situaciones hipotéticas futuras altamente congestionadas.

Debido a lo anterior, resulta claro que la evaluación de planes estratégicos de transporte debería utilizar como herramienta básica para la estimación de condiciones de equilibrio del sistema, un modelo de tipo equilibrio simultáneo.

Por cierto, el solo hecho de contar con un modelo de este tipo no garantiza la calidad de los resultados que se obtengan. Parte importante de una buena estimación se debe en estos casos a la calidad de los datos de entrada (vectores de generación y atracción de viajes, redes debidamente calibradas, etc.) y de los submodelos integrados al modelo de equilibrio (distribución y partición modal, especialmente). Es claro, sin embargo, que un modelo secuencial alimentado de buenas redes y buenos modelos presentará importantes problemas, en especial cuando se trata de predecir equilibrios futuros.

Los costos computacionales de la aplicación del Modelo de Equilibrio son superiores a los del Modelo Secuencial, pero altamente manejables exigiendo niveles de precisión de 5%. Por lo cual, esto no constituye un impedimento para su utilización dados los recursos computacionales existentes hoy en día.

REFERENCIAS

- ABDULAAL, M. y LEBLANC, M.J. (1979) "Methods for Combining Modal Split and Equilibrium Assignment Models". *Transportation Science*. Vol. 13, 292-314.
- BRAVO, F. (1989) "Solución al Problema de Equilibrio en el Estudio de Evaluación y Desarrollo del Sistema de Transporte Urbano de Santiago (ESTRAUS)". *Actas IV Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*, Valparaíso, Octubre 1989, 167-181.
- EVANS, S. P. (1976) "Derivation and Analysis of Some Models for Combining Trip Distribution and Assignment". *Transportation Research*. Vol. 10, 37-57.
- FERNANDEZ, J.E. y DE CEA, J. (1990) "Una Aplicación de Modelación de Equilibrio en Redes al Sistema de Transporte Urbano de Santiago de Chile". *Operational Research '90, Actas de la Duodécima Conferencia Internacional de Investigación Operacional de IFORS*, Atenas, Grecia, Junio 1990, 367-378.
- FERNANDEZ, J.E. y FRIESZ, T.L. (1983) "Equilibrium Predictions in Transportation Markets: The State of The Art". *Transportation Research* 17B, 155-172.
- FLORIAN, M. (1977) "A Traffic Equilibrium Model of Travel by Car and Public Transit Modes". *Transportation Science*. Vol. 8, 166-179.
- FLORIAN, M. y S. NGUYEN (1978) "A Combined Trip Distribution Modal Split and Trip Assignment Model". *Transportation Research*. Vol. 12, 241-246.

- HUTCHINSON, B. G. (1974) "Principles of Urban Transport Systems Planning". McGraw-Hill, New York.
- SECTU (1989) "Estudio de Evaluación y Desarrollo del Sistema de Transporte Urbano de la Ciudad de Santiago", Comisión de Transporte Urbano, Santiago, Chile.
- SHEFFI, Y. (1985) "Urban Transportation Networks ". Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.

Tiempo Viaje Auto - Período Punto AM 1986
Variable Inicial vs Variable Final (M. Secuencial)
FILE M: INICIAL=1-FINAL = 10000; A = 1 MIL, B = 2 MIL, C =

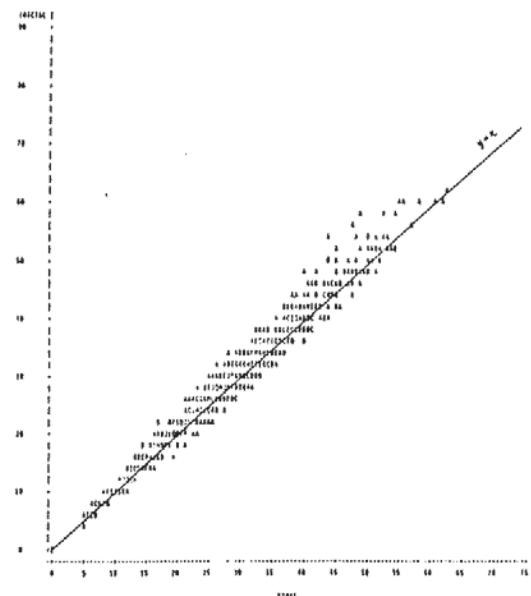


Figura 4.1 a.

C. Generalizado Bus - Período Punto AM 1986
Variable Inicial vs Variable Final (M. Secuencial)
FILE M: INICIAL=1-FINAL = 10000; A = 1 MIL, B = 2 MIL, C =

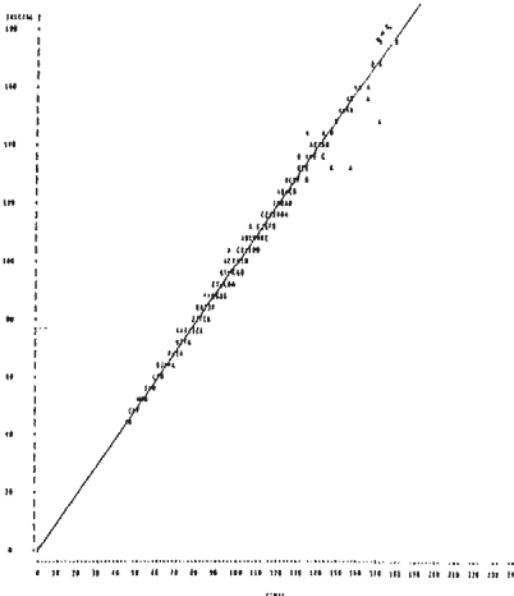


Figura 4.1 b.

Tiempo Viaje Auto - Período Fuera de Punto 1986
Variable Inicial vs Variable Final (M. Secuencial)
FILE M: INICIAL=1-FINAL = 10000; A = 1 MIL, B = 2 MIL, C =

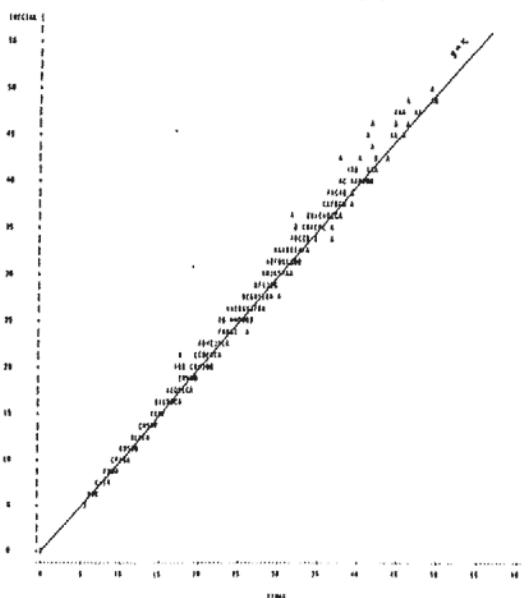
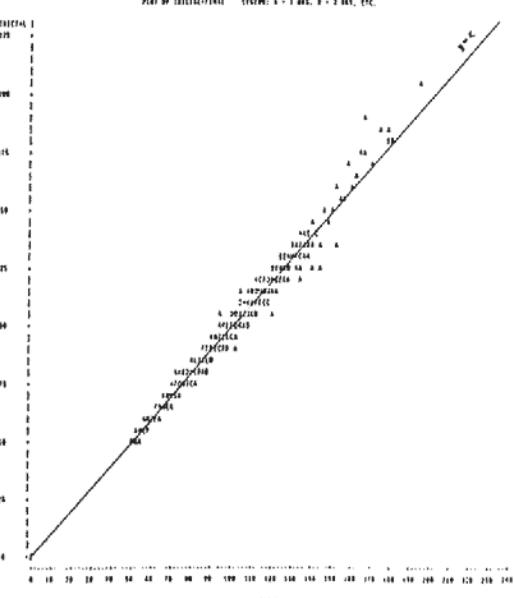


Figura 4.2 a.

C. Generalizado Bus - Período Fuera de Punto 1986
Variable Inicial vs Variable Final (M. Secuencial)
FILE M: INICIAL=1-FINAL = 10000; A = 1 MIL, B = 2 MIL, C =



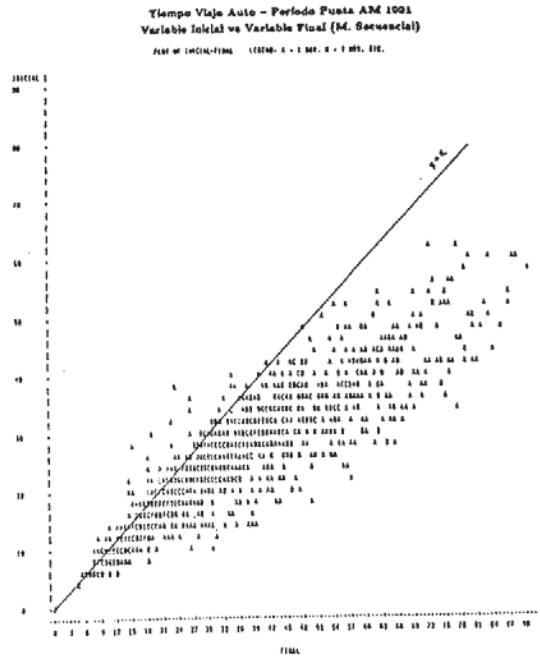


Figura 4.3 a.

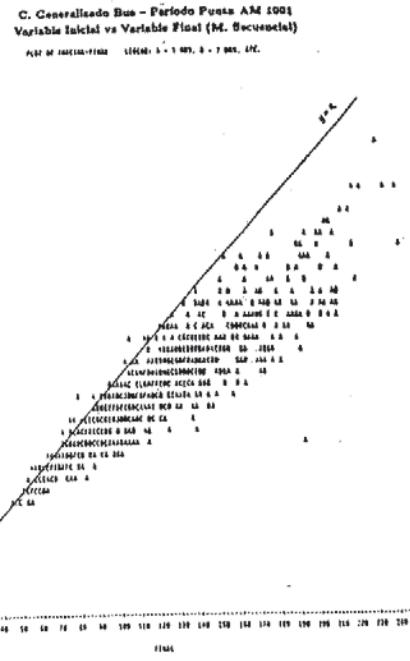


Figura 4.3 b.

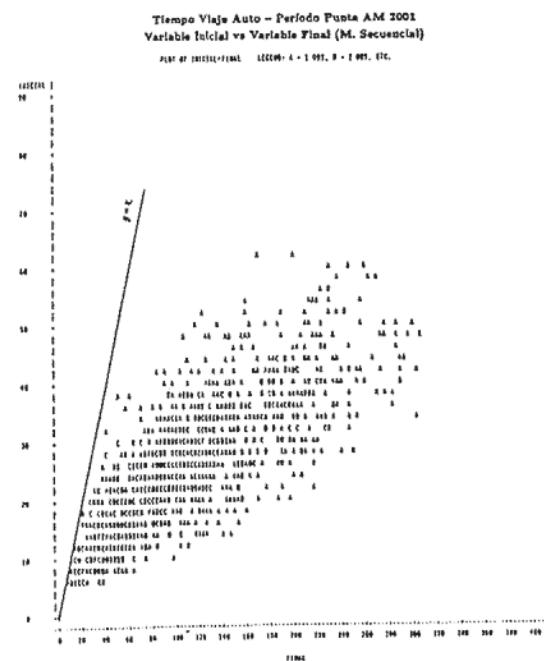
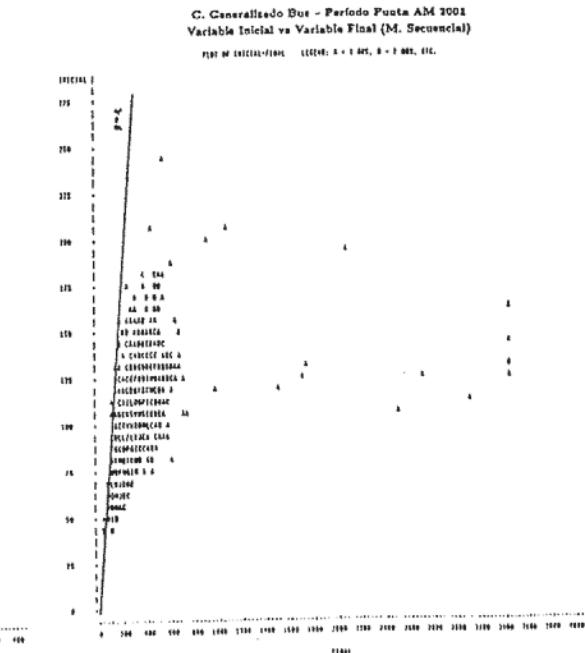


Figura 4.4 a.



- 235 -

Figura 4.4 b.

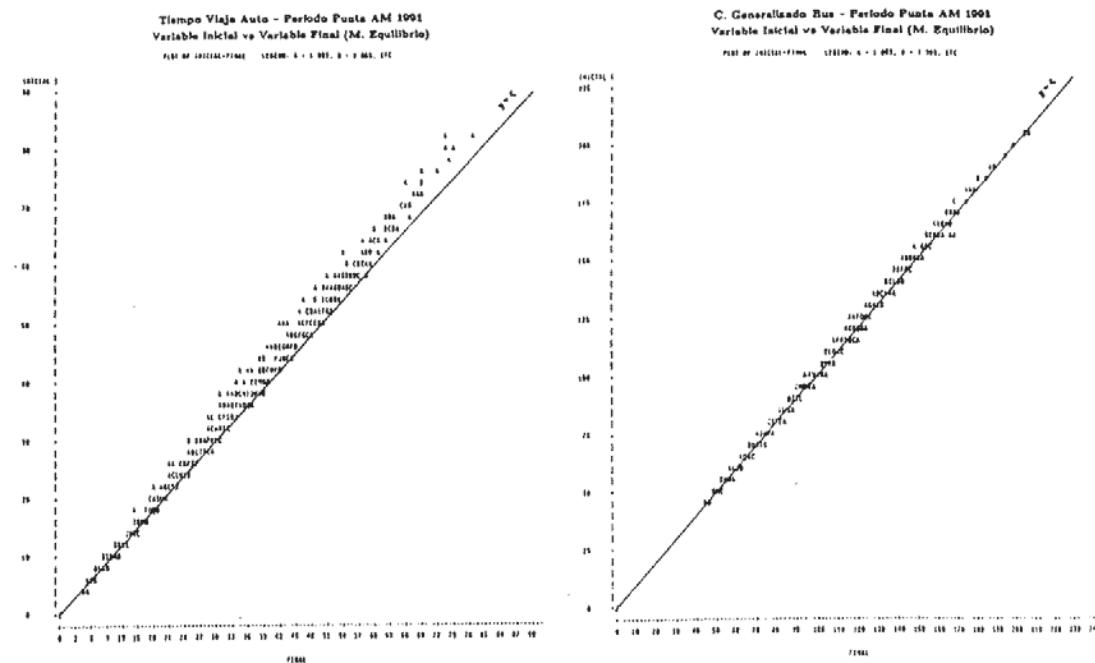


Figura 4.5 a.

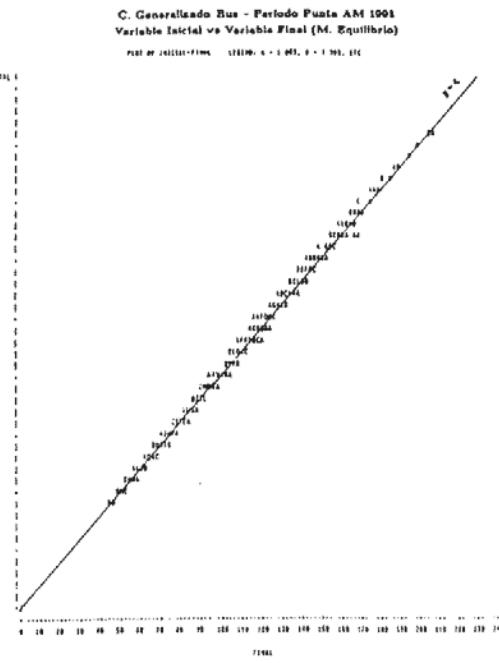


Figura 4.5 b.

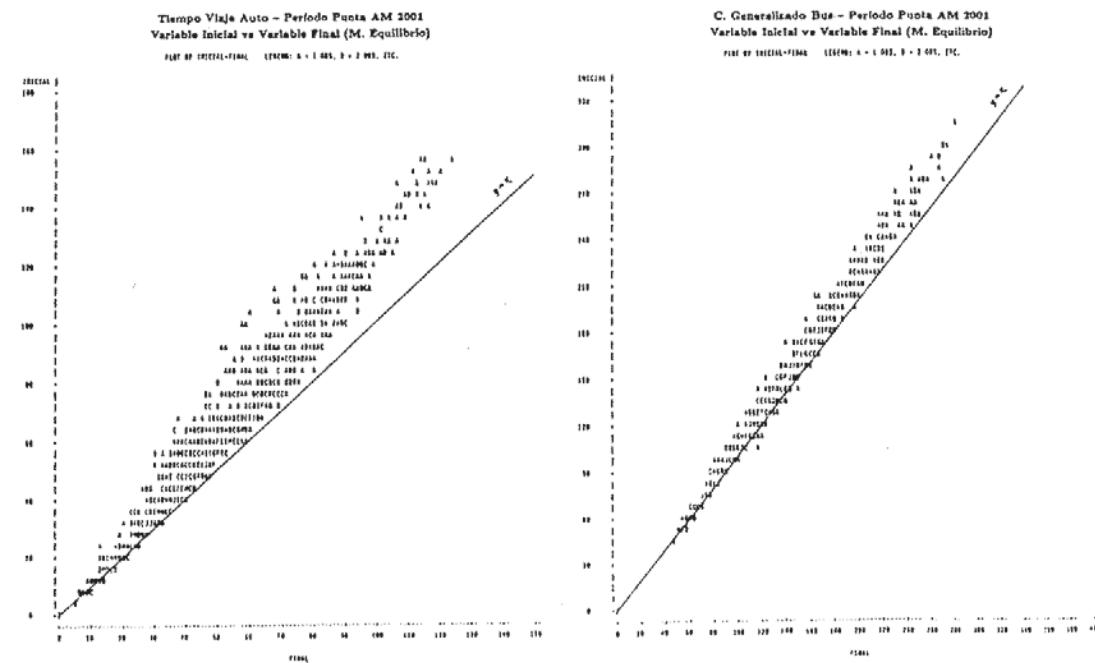


Figura 4.6 236.

- 236 -

Figura 4.6 b.

LINEA 1 ORIENTE-PONIENTE
AM 1991

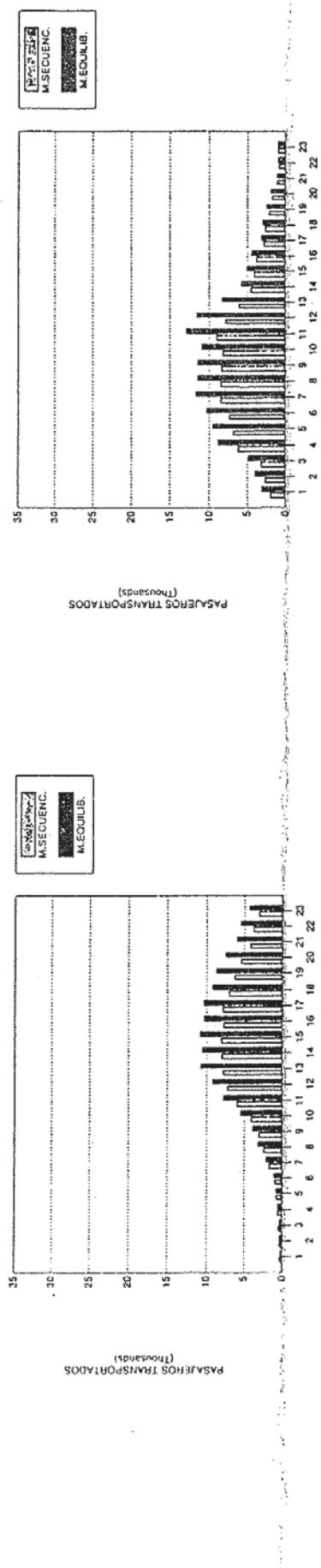


Figura 4.7 a.

LINEA 1 PONIENTE-ORIENTE
AM 1991

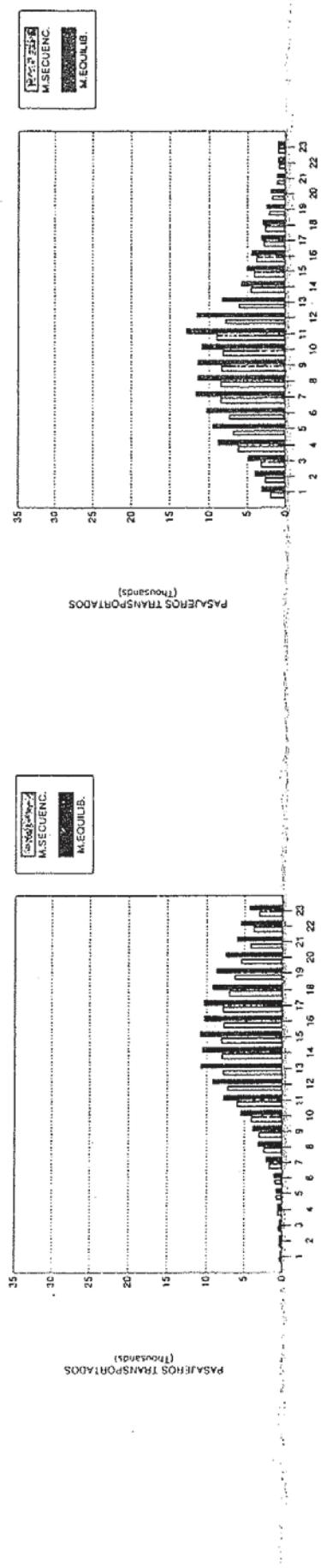


Figura 4.7 b.

LINEA 1 ORIENTE-PONIENTE
AM 2001



- 237 -

Figura 4.7 c.

LINEA 1 PONIENTE-ORIENTE
AM 2001



Figura 4.7 d.

LINEA 2 SUR-NORTE

AM 1991

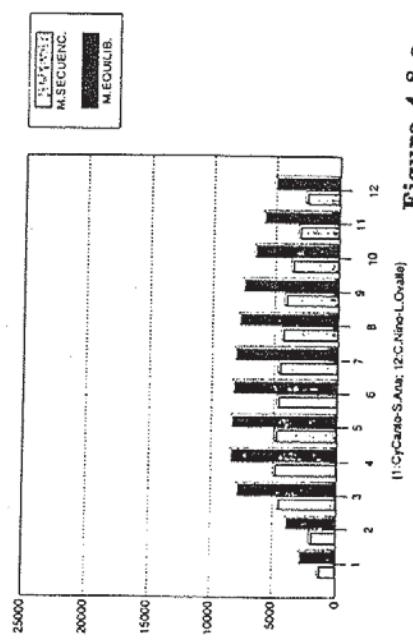


Figura 4.8 a.

LINEA 2 SUR-NORTE

AM 2001

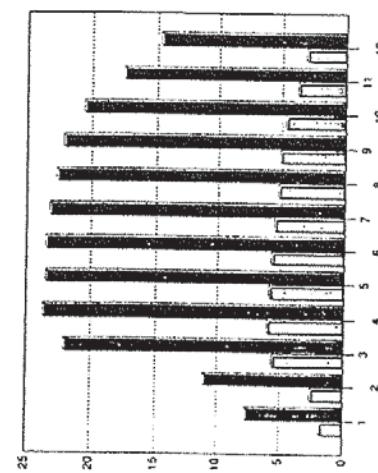


Figura 4.8 c.

LINEA 2 NORTE-SUR

AM 1991

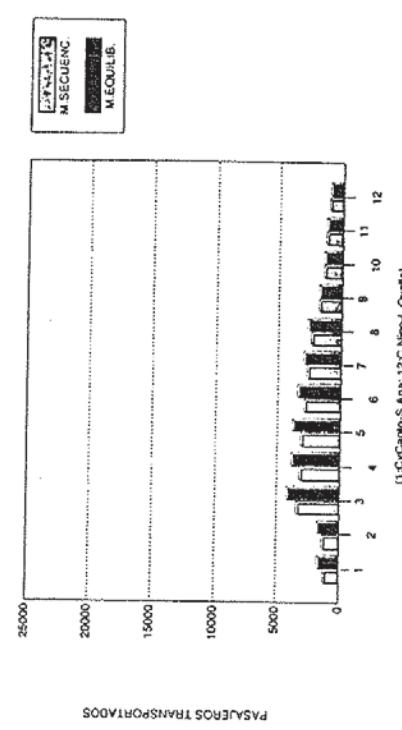


Figura 4.8 b.

LINEA 2 NORTE-SUR

AM 2001

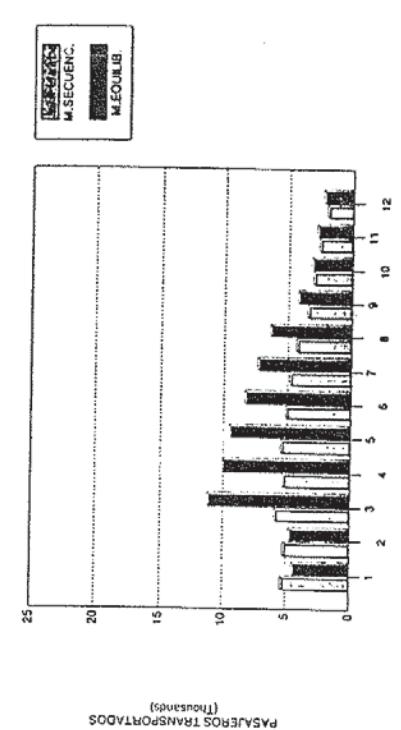


Figura 4.8 d.