

# MODELOS DE REDES EN TARIFICACION VIAL URBANA

**Fernando Bravo F.**

CIS Asociados Consultores en Transporte Ltda.  
Austria 2066 Providencia. Stgo. Chile.  
Fono Fax 2051034-2051033-2051029

**Manuel Díaz C.**

Dirección de Planeamiento  
Ministerio de Obras Públicas MOP  
Morandé 59 Stgo. Chile  
Fono 6992233-2612 Fax 6716178

## RESUMEN

El tratamiento de la tarificación vial en redes viales urbanas de transporte, constituye hoy en día una interrogante recurrente en ingeniería de transporte, dada la variedad de impactos que provoca en el sistema de transporte, y las posibilidades que presentan los modelos disponibles en el mercado para representarlos y simularlos.

El presente trabajo pretende responder a parte de estas inquietudes, a través de un ejercicio eminentemente operativo, recurriendo para ello a dos modelos ampliamente conocidos en la literatura: SATURN y EMME2. Junto con investigar la respuesta a las interrogantes, se ha pretendido encontrar como responden los modelos, dadas las principales características que poseen, destacando sus ventajas y desventajas ante determinadas situaciones a simular en una red vial urbana tarificada.

Para realizar lo anterior, el trabajo comienza con una descripción teórica del problema que se resuelve, los enfoques que este posee, los supuestos principales involucrados, indicando los principales algoritmos que disponen los modelos estudiados para responder a la solución de los problemas.

Enseguida se realiza una descripción operativa de los modelos, indicando sus principales características. Especial interés adquiere, el tratamiento de la compatibilidad de información. En Chile, tradicionalmente el tratamiento de las redes viales se ha hecho en ambiente SATURN, lo cual equivale a disponer de una gran cantidad de parámetros e información calibrada y validada bajo este modelo.

Posteriormente se formula un conjunto de interrogantes, las cuales se han pretendido responder realizando un ejercicio de simulación para una red vial existente para el eje "Proyecto Costanera Norte de Santiago", cuya red base fue calibrada originalmente con SATURN. El trabajo culmina con una serie de respuestas a las preguntas planteadas y una serie de recomendaciones sobre la materia.



## 2.- REVISION TEORICA FUNDAMENTAL

La solución de los problemas de asignación de viajes en las redes de transporte urbano con demanda inelástica, conocidos también como problemas de equilibrio de tráfico, se fundamentan en los conocidos como 1<sup>er</sup> y 2<sup>do</sup> Principios de Wardrop.

La forma de representar las funciones de oferta o costos en los arcos para los distintos usuarios y la forma como estos usuarios perciben estos costos da origen a distintos planteamientos y enfoques para solucionar los problemas.

En este punto se revisan los planteamientos relativos a la asignación multiclases de usuarios que disponen los modelos SATURN y EMME2, dada las facilidades que otorgan para simular de mejor forma el efecto de la tarifa o peaje en las funciones de oferta por arco.

Junto a esto se revisan los enfoques determinístico y estocástico para enfrentar los problemas. Se comienza describiendo la notación, la cual será válida para los dos modelos estudiados:

### 2.1 Notación

#### - Índices

$a$  = Arco,  $m$  = Clase de usuario,  $w$  = Par origen-destino (zona  $i$ -zona  $j$ ),  $p$  = Ruta

#### - Variables

$T_w^m$  = Viajes en par origen-destino  $w$ , para usuarios de clase  $m$ .

$hp^m$  = Viajes en ruta  $p$  para usuarios de clase  $m$ .

$\overset{m}{a}$  = Flujo de usuarios de clase  $m$  sobre arco  $a$ .

$\overset{a}{a}$  = Flujo de usuarios total sobre arco  $a$ .

$C_a^m$  = Costo Total sobre arco  $a$  percibido por usuario clase  $m$ .

$C_p^m$  = Costo Total de viaje percibido por usuarios de clase  $m$  sobre ruta  $p$ .

$t_a$  = Tiempo de viaje sobre arco  $a$ .

$d_a^k$  =  $K$ -ava componente fija del costo sobre el arco  $a$ .

$ap$  = 1 si el arco  $a$  es usado por ruta  $p$ , 0 en otro caso.

#### - Conjuntos

$A$  = Conjunto Total de arcos de la red.

= Conjunto Total de pares origen-destino de viajes.

$M$  = Conjunto Total de clases de usuarios en la red.

$P_w^m$  = Conjunto Total de rutas posibles en el par origen-destino  $w$ , para usuario  $m$ .

$P^m$  = Conjunto Total de rutas en la red, para usuario  $m$ .

$K$  = Conjunto Total de costos fijos en un arco.



## 2.2 Equilibrio Multiusuarios (Enfoque Determinístico)

### - SATURN

En este caso SATURN (SATURN, 1985) expresa el costo en el arco  $a$  como:

$$C_a^m = b_o^m t_a + \sum_k b_k^m d_a^m, \forall a \in A \text{ y } m \in M \quad (1)$$

donde

$b_o^m$  = Valor del tiempo percibido por usuario de clase  $m$

$b_k^m$  = Valor unitario de la componente  $K$ -ava del costo de viaje para usuario de clase  $m$

Para plantear el problema es necesario considerar dos restricciones :

- 1<sup>ra</sup> En la expresión para el costo (1) sólo la componente para el tiempo de viaje es dependiente del flujo
- 2<sup>da</sup> El tiempo en el arco  $a$  depende sólo del flujo en ese arco (función separable) y además del total de flujo en el arco.

$$t_a = t_a(V_a), \forall a \in A \quad (2)$$

donde

$$V_a = \sum_m V_a^m, \forall a \in A$$

Considerando lo anterior la función objetivo para el problema, expresada en unidades de tiempo, puede plantearse como:

$$\text{Min}_{\{V_a^m\}} z(V_a^m) = \sum_a \int_0^{V_a} t_a(V) dV + \sum_a \sum_k \sum_m b_k^m d_a^k V_a^m \quad (3)$$

$$s. a. \sum_{p \in P_w^m} h_p^m = T_w^m, \forall m \in M, w \in W$$

$$V_a^m = \sum_{p \in P^m} \delta_{ap} h_p^m, \forall m \in M, a \in A$$

$$V_a^m \geq 0, \forall m \in M, a \in A$$

donde

$$b_k^m = b_k^m / b_o^m, \forall b_o^m \neq 0, k \in K \text{ y } m \in M \quad (4)$$

El primer término de la función objetivo es la integral estándar del tiempo de equilibrio con una clase de usuario, mientras que el segundo término es el conjunto total de costos percibidos en unidades de tiempo, sumados sobre todos los arcos  $a$ , para todas las clases  $m$  de usuarios y para todas las componentes  $k$  fijas del costo ( una de estas puede ser por ejemplo la tarifa ).

Si definimos al costo en unidades de tiempo como  $C_a^m$ , se tiene:

$$C_a^m = t_a + \sum_k b_k^m d_a^k, \forall a \in A, m \in M \quad (5)$$

Es demostrable, usando la expresión (2), que el Jacobiano de la función de costo anterior es simétrico ya que se cumple:

$$\frac{\partial C_a^1}{\partial V_a^2} = \frac{\partial C_a^2}{\partial V_a^1}, \forall a \in A, \forall m=1 \text{ y } m=2 \in M \quad (6)$$

### - Algoritmo de Solución

Dado que el problema es diagonal, el algoritmo que se usa para resolver el problema (3) es esencialmente una generalización del algoritmo de Frank-Wolfe, realizando el proceso tradicional de dos fases del algoritmo aplicado en este caso consecutivamente a cada clase.

#### **Etapla 1. Generar Solución Factible**

Se debe generar una solución inicial factible, asignando por ejemplo los viajes  $T_w^m$  "todo o nada" a costos a flujo libre por clase .

De esto se obtiene  $h_p^m(I=1)$  y  $V_a^m(I=1)$  y de (2)  $V_a(I=1)$ , con  $I= N^\circ$  de iteraciones

#### **Etapla 2. Aplicación Algoritmo Frank Wolfe (F-W) para cada clase**

Se deben repetir los pasos 2.1 a 2.5 siguientes para las clase  $m=1, \dots, M$ , excluyendo aquellas clases de usuarios con  $b_o^m=0$ , dado que estas permanecen con sus rutas fijas, calculadas de la etapa 1, al no depender los costos de los flujos en la red.

2.1 Dado  $t_a = t_a(V_a)$  . calcular  $C_a^m$



- 2.2 1ª Fase F-W, Búsqueda Solución Auxiliar: Asignar  $T_w^m$  todo o nada a la ruta de costo mínimo vigente para obtener la solución auxiliar  $F_a^m$
- 2.3 2º Fase F-W, Optimización dirección descenso : Actualizar los flujos para cada clase de acuerdo a:

$$V_a^m(I+1) = (1 - \lambda) V_a^m(I) + \lambda F_a^m, \text{ con } 0 \leq \lambda \leq 1$$

permaneciendo el resto de las clases de usuarios inalterable.

La solución de 2.3 se obtiene, resolviendo el problema de ec. (3) con respecto a lambda, es decir:

$$\text{Min } Z(V_a^m(I+1))$$

$$\text{s.a } 0 \leq \lambda \leq 1$$

Si hacemos la derivada de Z con respecto a  $\lambda$  igual a cero se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z}{\partial \lambda} &= \sum_a \sum_k b_k^m d_a^k (F_a^m - V_a^m(I)) + \sum_a t_a (V_a(I+1) * (F_a^m - V_a^m(I))) \\ &= \sum_a (F_a^m - V_a^m(I)) * \left( \sum_k b_k^m d_a^k + t_a (V_a(I+1)) \right) \\ &= \sum_a (F_a^m - V_a^m(I)) * C_a^m(V_a(I+1)) = 0 \end{aligned}$$

La expresión anterior indica que se debe transferir un número suficiente de viajes para cada clase de usuarios, desde sus rutas de costo mínimo  $F_a^m$  de manera tal que se cumpla que la suma total de los costos actuales percibidos por clase  $V_a^m$  sean iguales a los de las ruta de costo mínimo.

- 2.4 Actualizar el flujo total en cada arco de A, de la forma:

$$V_a = V_a + V_a^m(I+1) - V_a(I)$$

- 2.5 Incrementar  $m$  y volver a 2.1

**Etapla 3.** Si los criterios de convergencia descritos abajo no son satisfechos, incrementar  $I$  en 1 y retornar a Etapa 2.

### *Criterios de Convergencia*

Se define una medida del exceso de flujo sobre la ruta de costo mínimo de la siguiente forma:

$$\Delta^I = \frac{\text{dif } C(I)}{C2(I)}$$

donde:

$$\begin{aligned} \text{dif } C(I) &= \sum_m \sum_a C_a^m * (V_a^m(I) - F_a^m) \\ &= \sum_m \text{dif } C^m(I) \end{aligned}$$

$$C2(I) = \sum_a \sum_m C_a^m F_a^m$$

### **- EMME2**

En EMME2 (EMME, 1994) se utiliza la misma lógica para enfrentar el problema, asumiendo que los costos del arco  $a$  percibidos por el usuario de clase  $m$  pueden ser expresarse como:

$$C_a^m(V_a) = C_a(V_a) + B_a^m, \quad \forall a \in A \text{ y } m \in M \quad (7)$$

Lo anterior implica que las diferentes clases de usuarios están sometidos al mismo efecto de congestión (que depende del flujo total del arco), pero cada clase de usuario percibe una constante diferente  $B_a^m$ .

Como se puede apreciar la expresión (7), tiene la misma estructura que la expresión (5) anterior, por lo cual se cumplen las condiciones representadas en (6) y es válido el mismo planteamiento de problema utilizado en SATURN, representado en (3).

EMME2 utiliza también el algoritmo de Frank Wolfe para solucionar el problema, aplicado consecutivamente a cada clase, de la misma forma como se presentó en el caso de SATURN.

### 2.3. Equilibrio Multiusuarios (Enfoque Estocástico)

El enfoque determinístico de los problemas de asignación asume que los usuarios eligen sus rutas de mínimo costo, asumiendo que estos tienen información perfecta de los tiempos de viaje en la red, que ellos actúan en forma racional y de igual forma. El enfoque estocástico relaja algunos de estos supuestos incluyendo una componente aleatoria en la percepción que tienen los viajeros del tiempo de viaje.

Cada usuario al percibir distinto los costos de viaje puede escoger rutas diferentes; luego el costo de viaje de cada ruta es una variable aleatoria, asociada a alguna función de probabilidad.

La magnitud de la varianza de la percepción del tiempo de viaje debiera ser determinada empíricamente en cada caso, no habiendo ninguna razón para pensar a priori que esta es nula, como supone el enfoque determinístico.

Considerando esto, se puede demostrar que la formulación de un problema de equilibrio de tráfico del punto de vista estocástico corresponde a la formulación general del problema, siendo el planteamiento determinístico un caso particular, cuando la varianza en la percepción es cero (Sheffi, 1985).

#### - SATURN

En SATURN se realiza un supuesto simple que indica que cualquier costo que quede en el rango :

$$\left[ (1 - \alpha) C_a ; (1 + \alpha) C_a \right] , \forall a \in A$$

es igualmente atractivo para el usuario, donde  $C_a$  es la media del costo en el arco y  $\alpha$  es el parámetro de dispersión que debe indicar el modelador en cada caso.

#### - Algoritmo de Solución

La solución del problema se realiza a través de un algoritmo conocido como "Método de los Promedios Sucesivos", (MSA) que presenta una lógica similar al algoritmo de Frank-Wolfe. Sin embargo las diferencias se presentan en la forma como se solucionan las fases del algoritmo:

- Primera fase: La búsqueda de la solución auxiliar se realiza a través de una asignación del tipo Burrell, en vez de una asignación todo o nada como en el caso determinístico
- Segunda fase: La búsqueda de la nueva solución se realiza usando la relación 1/1, en vez de hacerse una combinación lineal de mejores soluciones factibles (búsqueda del lambda) como en el caso determinístico.



El problema con la asignación de Burrell es que no toma en cuenta la congestión, al no considerar la dependencia del costo del flujo. Sheffi (Sheffi, 1981), usando una asignación tipo Dial, ha demostrado que en el límite (después de un número considerable de iteraciones) el algoritmo MSA converge a la solución del problema estocástico.

La razón de escoger el factor promedio  $1/I$  en la segunda fase, asegura que después de  $I$  iteraciones el flujo total es dividido igualmente entre todas las  $I$  rutas soluciones de cada iteración, generándose de ahí el nombre de los promedios sucesivos.

La solución del problema multiclase estocástico también se determina aplicando el algoritmo MSA consecutivamente para cada clase, siguiendo la misma lógica de etapas presentada para el caso determinístico.

## - EMME2

Usando la misma argumentación que en SATURN, supone que en cada asignación estocástica el costo de cada arco de la red se compone de un término determinístico dado por la función original de flujo tiempo, y por un término aleatorio que perturba el costo del arco.

Esta perturbación se genera con un número aleatorio, el cual es distinto para cada arco y para cada asignación. Así, el costo del arco percibido  $\tilde{C}_a$  está dado por la siguiente expresión:

$$\tilde{C}_a(V_a) = C_a(V_a)(1 + \alpha \theta) \quad , \forall a \in A$$

donde

- $\theta$  = Término aleatorio que varía entre 0 y 1.
- $\alpha$  = Factor de peso para limitar la aleatoriedad en la percepción de los arcos.

El Algoritmo de solución en EMME2 también utiliza un algoritmo del tipo promedios sucesivos para la solución del problema, aplicado consecutivamente para cada clase.

## 3.- DESCRIPCION DE MODELOS

Dado que el software SATURN es bastante conocido en el mercado chileno, por lo cual no merece mayor presentación; en este punto, se describen las principales características del software EMME2, considerando la mayor novedad que presenta en Chile para el tratamiento de redes. Se hará mención de SATURN cuando se requiera, sólo de manera comparativa para ciertos procesos.

EMME2 "Equilibre Multimodal and Multimodal Equilibrium" Versión 2 es un sistema interactivo gráfico para la planificación de transporte multimodal urbano e interurbano. Ofrece un conjunto de herramientas para la modelación de la demanda de transporte, para el modelamiento y análisis de redes multimodales y para la realización de diferentes procedimientos de evaluación. El software



también provee procedimientos útiles para el manejo de datos, incluyendo validación de datos de entrada. Su base de datos se estructura de modo de permitir la descripción, el análisis y la comparación simultánea de varios escenarios.

En su concepción, EMME2 está construido en base a los planteamientos del modelo de transporte de cuatro etapas, ofreciendo como alternativas los enfoques secuencial y simultáneo para enfrentar el problema de equilibrio de mercado.

En la Tabla 1 siguiente se presenta una comparación entre los modelos estudiados, indicando la forma de tratar los elementos principales que intervienen en el análisis de redes urbanas, presentando sus principales ventajas y desventajas.

**Tabla 1**  
**Comparación de Modelos SATURN / EMME2**

Elementos de Análisis	SATURN	EMME2
Concepción del modelo	Sólo resuelve el problema de asignación de vehículos a la red (equilibrio de tráfico con demanda inelástica.)	Resuelve problema de equilibrio de tráfico y también equilibrio de mercado multimodal.
Codificación de las redes	Red para transporte privado, donde los vehículos del resto de los modos se especifican descontando capacidad. La codificación se formula a partir de un formato estándar.	Tiene la ventaja que considera una red común donde interactúan todos los modos, especificándose en cada arco los modos que acceden a él. La codificación puede ser realizada en formato estándar, o interactivamente con comandos gráficos.
Especificación de funciones oferta	Ventaja en el tratamiento de red INNER para redes tácticas, además de poseer la alternativa de formato BUFFER útil para redes estratégicas.	El tratamiento es únicamente estratégico, el cual incluye funciones de penalización en los giros para representar con mayor exactitud la operación de la red.
Tratamiento de transporte público	Se codifica externamente las líneas como rutas fijas y funcionan descontando capacidad, efectiva de asignación para los vehículos livianos, donde se entremezclan los vehículos. No existe asignación de pasajeros a las diferentes líneas.	Tiene la ventaja que las líneas se codifican interactivamente o en forma externa. Resuelve además el problema de asignación de usuarios a la red de transporte público, usando el criterio de estrategia óptima. (Spiess et al, 1990)
Calibración de redes	Utiliza maximización de entropía para el ajuste de matrices mediante conteos. El ajuste de parámetros de la red es manual.	Al igual que SATURN, el ajuste de los parámetros es manual, aunque el algoritmo de ajuste es distinto, correspondiendo a un método de aproximación de gradiente (Spiess, 1991).
Corridas del modelo	Se puede operar el modelo en forma interactiva, o concatenando módulos y procesos repetitivos a través de archivos de comandos.	En términos generales es similar a la operación con SATURN, con archivos de comandos operando en la modalidad de macros.
Análisis de redes	Los resultados son analizados tradicionalmente en formato de archivos. Existe módulo gráfico poco utilizado.	Posee la ventaja que los resultados, y en general todos los elementos de la red, matrices y los procesos, pueden ser validados y analizados naturalmente en forma gráfica, además de archivos.
Compatibilidad de la información	La información de matrices, redes BUFFER, y transporte público son compatibles. La compatibilización a nivel de nodos, movimientos y características de estos no es directa (redes INNER SATURN)	

Fuente: Elaboración Propia

## 4.- APLICACIONES Y SIMULACIONES

Considerando los elementos teóricos y operativos reseñados en los puntos anteriores, la inquietud fundamental pasa por responder una serie de interrogantes relativas a como incorporar los efectos de tarificación en una red urbana.

A continuación se presentan una serie de aplicaciones de los modelos, sobre una red vial calibrada en ambiente SATURN, para la suma de los cuadrantes Nor-Oriente y Nor-Poniente de la ciudad de Santiago, sobre la cual se ha incorporado el eje de proyecto conocido como Costanera Norte.

Se comienza describiendo la red utilizada, posteriormente se presentan las preguntas y las aplicaciones realizadas para responder a cada una de ellas.

### 4.1 ALCANCES SOBRE LA RED UTILIZADA

Es importante mencionar que en este ejercicio sólo se ha tomado el eje Costanera Norte como referencial, en ningún caso esto constituye ni mucho menos la solución que se incorporará para este proyecto. Así, se han hecho algunos supuestos relativos al trazado y los accesos del proyecto. La red utilizada (ver Fig.1) corresponde a una red tipo buffer SATURN que tiene las siguientes características:

**Tabla2**  
**Características red utilizada**

	Nodos	Arcos	Longitud (km) (+)
Base	549 (-)	1225	849,58
Eje Proyecto	27	52	69,96

(-) De los cuales 135 corresponden a centroides de zona  
(+) Corresponde a los Km sumando longitud de arcos de la malla

La demanda de viajes considerada corresponde a una matriz hora Punta Mañana con 81377 viajes/hr.

Para el análisis de cada corrida del eje de proyecto tarificado sobre la red anterior, se han definido tramos del eje con su código, basados en viajes tipos, asociándole un arco representativo al tramo, en el cual se localizaría el punto de cobro, quedando con sus tarifas por sentido expresado en la Tabla 3. Además, se tarifican algunos accesos al eje de proyecto, los cuales se expresan en la Tabla 4 siguiente:

**Tabla 3**  
**Localización y Tarifa de Puntos de Cobro**

CODIGO	TRAMO	UBICACION DEL PUNTO DE COBRO	TARIFAS	
			O-P	P-O
			(\$)	
1	Lo Bamechea-Vespucio	Entre Juan XXIII y A.Vespucio	100	50
2	A. Vespucio-Puente el Cerro	Al llegar al Puente	100	50
3	Puente el Cerro-Centro Santiago	A la entrada del Túnel	100	50
4	Centro Santiago-Vivaceta	Entre Independencia y Vivaceta	50	100
5	Vivaceta-Ruta 5	Pasado Ruta 5	50	100
6	Ruta 5-Ruta 68	Pasado Apóstol Santiago	50	100

**Tabla 4**  
**Accesos al Eje proyecto**

ACCESO	UBICACION	TARIFA (+)
		(\$)
1	Vivaceta	50
2	Ruta 5	50
3	A.Vespucio	50

(+) Sólo sentido de entrada al Eje

## 4.2 INQUIETUDES PRINCIPALES PLANTEADAS

Las preguntas principales que se ha intentado responder son las siguientes:

### i.- ¿ Como incorporar la tarifa ?

Se plantean dos enfoques para incorporar la tarifa: En forma continua a través del eje o representando el cobro mediante un conjunto discreto de puntos en él.

Aplicaciones realizadas:

- i.1 Corrida a \$15/km con 1 clase de usuario con un valor subjetivo del tiempo (VST) medio de \$2302 (\$/hr) (obtenido de acuerdo a Tabla 7).
- i.2 Corrida con 1 clase de usuario con VST medio, discretizando el cobro en puntos del eje de acuerdo a las tabla 3 y 4.

Los resultados obtenidos se presentan en las tablas 5 y 6 siguientes:

**Tabla 5**  
**Resultado Comparación Corridas i.1 versus i.2 Sentido Oriente-Poniente**

Tramo	SATURN						EMME2			
	i.1				i.2		i.1		i.2	
	# ARCOS	Long. (km)	Flujo (veq/hr)	Tiempo (seg)	Flujo (veq/hr)	Tiempo (seg)	Flujo (veq/hr)	Tiempo (seg)	Flujo (veq/hr)	Tiempo (seg)
1	6	8.56	1118	7.91	1510	7.94	1130	7.86	1460	7.93
2	4	5.22	4016	6.40	3411	5.37	4035	6.29	3323	5.28
3	4	3.28	3293	3.85	2750	3.24	3244	3.80	2814	3.26
4	1	0.65	2866	0.60	702	0.60	2682	0.65	773	0.60
5	2	3.47	836	3.20	455	3.20	818	3.25	452	3.20
6	9	13.87	317	12.80	480	12.80	318	12.78	478	12.80
Total	26	35.05	1667	34.76	1524	33.16	1657	34.63	1511	33.07
	DIFERENCIAS				-142	-1.601	DIFERENCIAS		-146	-1.560

**Tabla 6**  
**Resultado Comparación Corridas i.1 versus i.2 Sentido Poniente-Oriente**

Tramo	SATURN						EMME2			
	i.1				i.2		i.1		i.2	
	# ARCOS	Long. (km)	Flujo (veq/hr)	Tiempo (seg)	Flujo (veq/hr)	Tiempo (seg)	Flujo (veq/hr)	Tiempo (seg)	Flujo (veq/hr)	Tiempo (seg)
1	6	8.56	883	7.91	1360	7.93	998	7.86	1360	7.93
2	4	5.09	404	4.70	387	4.70	388	4.71	387	4.70
3	4	3.28	2159	3.03	1792	3.03	2176	3.05	1792	3.03
4	1	0.65	1895	0.60	0	0.60	1870	0.65	0	0.60
5	2	3.47	536	3.20	397	3.20	528	3.25	397	3.20
6	9	13.86	228	12.79	291	12.79	260	12.77	291	12.79
Total			791	32.24	780	32.26	828	32.29	780	32.26
	DIFERENCIAS				-11	0.020	DIFERENCIAS		-47	-0.030

Comparando la corrida i.1 con i.2, se observan diferencias importantes solamente en los tramos mas cortos, ya que la tarifa por km en este caso es despreciable; sin embargo, a nivel de total del eje las diferencias son bastante menores.

Por su parte, los resultados que entrega EMME2 y SATURN a nivel determinístico para una clase de usuario son muy similares, mantienen la misma estructura tanto en flujo como en tiempo, son ambos nulos en el tramo 4 para la corrida i.2, aumentando la similitud en sentido Poniente-Oriente, donde existen menos demanda.

## ii.- ¿ Como representar la tarifa ?

Se investiga, siguiendo el enfoque determinístico, el efecto de la asignación multiclase de usuarios.



Aplicación realizada:

- ii.1 Eje tarifado de acuerdo a Tabla 3 para 3 clases de usuarios suponiendo los siguientes VST:

**Tabla 7**  
**Valores Subjetivos Tiempo por Tipo de Usuarios**

Tipo usuario	% de la Población	VST (\$/hr)
Ingreso Alto	30	1500
Ingreso Medio	40	2200
Ingreso Bajo	30	3240

Los resultados de las corridas realizadas con los modelos para responder la pregunta son los siguientes:

**Tabla 8**  
**Resultado Comparación Corridas ii.1 Sentido Oriente-Poniente ambos modelos**

Tramo	SATURN					EMME2				
	Flujos (veq/hr)				Tiempo (min)	Flujos (veq/hr)				Tiempo (min)
	Alto	Medio	Bajo	Total		Alto	Medio	Bajo	Total	
1	505	585	387	1477	7.94	482	574	393	1448	7.93
2	2023	1007	264	3293	5.30	1631	1438	321	3390	5.35
3	1697	799	405	2902	3.24	1353	1077	339	2769	3.20
4	1029	118	41	1188	0.60	796	113	39	948	0.60
5	320	174	123	616	3.20	242	176	116	533	3.20
6	171	184	119	473	12.80	167	185	111	462	12.80
Total	812	494	244	1551	33.09	677	601	241	1519	33.08

**Tabla 9**  
**Resultado Comparación Corridas ii.1 Sentido Poniente-Oriente ambos modelos**

Tramo	SATURN					EMME2				
	Flujos (veq/hr)				Tiempo (min)	Flujos (veq/hr)				Tiempo (min)
	Alto	Medio	Bajo	Total		Alto	Medio	Bajo	Total	
1	419	540	410	1370	7.93	403	515	374	1293	7.92
2	234	149	106	489	4.70	225	176	96	497	4.70
3	734	694	361	1788	3.03	682	718	344	1744	3.03
4	22	0	0	22	0.60	19	0	0	19	0.60
5	138	157	106	401	3.20	129	154	107	390	3.20
6	127	106	39	272	12.79	110	104	38	251	12.79
Total	301	303	188	792	32.26	281	304	175	761	32.25

No se observan mayores diferencias entre las corridas determinísticas con clases de usuarios entre SATURN y EMME a nivel del tiempo y flujo total. Sin embargo, a nivel de clases de usuarios



existen algunas diferencias en el flujo en las categorías de ingresos altos en el tramo Oriente-Poniente de mayor demanda.

Si comparamos esta corrida iii.1 con la corrida i.2 anterior para una clase usuario, aparecen en iii.1, en el tramo 4 de Poniente a Oriente, usuarios de ingresos altos dispuestos a pagar \$100 por su uso, lo cual ya nos habla de un impacto importante de la tarificación en la asignación en las distintas clases, aunque en el total de flujo y tiempo no se observen grandes diferencias.

### iii.- ¿Como responden los distintos tipos de usuarios de la red a la tarificación, dependiendo del enfoque de modelación como sean tratados?

Las corridas anteriores de i.- y ii.- se realizaron siguiendo un enfoque determinístico; en este punto, se introduce el enfoque estocástico.

Aplicaciones realizadas:

- iii.1 Eje tarificado de acuerdo a tabla 3 para 1 clases de usuario, para una dispersión alta ( $\alpha = 0.2$ ).
- iii.2 Eje tarificado de acuerdo a tabla 3 para 3 clases de usuarios para una dispersión igual y baja en cada uno de ellos (esta corrida se trabajó solo con SATURN, con un parámetro de dispersión  $\alpha = 0.06$ ).

**Tabla 10**  
**Resultado Comparación Corridas iii.1 versus iii.2 Sentido Oriente-Poniente**

Tramo	SATURN		iii.2					EMMI:2	
	iii.1		Flujo (veq/hr)				Tiempo (min)	iii.1	
	Flujo (veq/hr)	Tiempo (min)	Alto	Medio	Bajo	Total		Flujo (veq/hr)	Tiempo (min)
1	1425	7.94	507	600	378	1486	7.94	1581	7.89
2	3367	5.35	2018	1217	95	3330	5.33	3430	4.81
3	2730	3.28	1697	878	256	2831	3.26	2552	3.02
4	759	0.60	936	109	29	1075	0.60	849	0.60
5	479	3.20	283	192	135	610	3.21	570	3.20
6	434	12.80	198	183	113	494	12.80	477	12.80
Total	1483	33.17	815	543	192	1550	33.14	1527	32.32
DIFERENCIAS							67	-0.031	



**Tabla 11**  
**Resultado Comparación Corridas iii.1 versus iii.2 Sentido Poniente-Oriente**

Tramo	SATURN							EMME2	
	iii.1		iii.2					iii.1	
	Flujo (veq/hr)	Tiempo (min)	Flujo (veq/hr)				Tiempo (min)	Flujo (veq/hr)	Tiempo (min)
			Alto	Medio	Bajo	Total			
1	1275	7.92	424	553	393	1370	7.93	1294	7.90
2	548	4.70	267	152	103	521	4.70	649	4.69
3	1734	3.03	725	715	360	1799	3.03	1780	3.02
4	33	0.60	21	0	0	21	0.60	32	0.59
5	392	3.20	137	159	107	402	3.20	386	3.20
6	277	12.79	123	110	42	276	12.79	272	12.78
TOTAL	773	32.25	304	311	185	800	32.26	797	32.19
			DIFERENCIAS				28	0.013	

Se observa una gran similitud entre la corrida estocástica iii.1 para una clase de usuario realizada con SATURN y la realizada con EMME2, lo cual nos indica que los algoritmos estocásticos tanto de uno como otro modelo se comportan muy similares.

A su vez, ambas corridas estocásticas con 1 clase de usuario son muy similares a iii.2. realizada con SATURN para 3 clases de usuarios, aunque se observan diferencias importantes en tramos del eje cortos mas congestionados (tramo 4 de 650 mts.) a favor de la asignación multiclase. Sin embargo analizando iii.2 se aprecia que esta es bastante mas similar a ii.1; fenómeno interesante al corresponder ii.1 al caso extremo, de dispersión nula por clase o asignación multiclase determinística.

#### iv.- ¿De que manera varían los resultados anteriores al existir mayor congestión en la red vial ?

Se aumenta la congestión en el sistema, llevando la matriz asignada al doble; es decir, se asignan 162754 viaje/hr, revisando el efecto a nivel determinístico como estocástico y sólo con SATURN, considerando la similitud de los resultados entregados por EMME2 en las pruebas anteriores.

- iv.1 Eje tarifado de acuerdo a tabla 3 para 3 clases de usuarios, enfoque determinístico.
- iv.2 Eje tarifado de acuerdo a tabla 3 para 3 clases de usuarios, enfoque estocástico con baja dispersión.

**Tabla 12**  
**Resultado Comparación Corridas iv.1 versus iv.2 Sentido Oriente-Poniente**

Tramo	iv.1					iv.2				
	Flujo (veq/hr)				Tiempo (min)	Flujo (veq/hr)				Tiempo (min)
	Alto	Medio	Bajo	Total		Alto	Medio	Bajo	Total	
1	1130	1464	1053	3647	16.90	1118	1472	1033	3624	17.21
2	3862	3273	1176	8311	36.11	3669	3517	1140	8326	36.20
3	3668	3043	1104	7815	19.66	3466	3089	1262	7817	19.67
4	2875	1966	519	5361	0.81	2666	2159	562	5387	0.81
5	2031	1307	428	3766	3.97	2012	1286	495	3794	3.97
6	611	541	370	1522	13.07	576	603	365	1544	13.10
Total	1898	1673	775	4345	90.53	1812	1747	794	4353	90.97
	DIFERENCIAS					-85	74	19	8	0.447

**Tabla 13**  
**Resultado Comparación Corridas iv.1 versus iv.2 Sentido Poniente-Oriente**

Tramo	iv.1					iv.2				
	Flujo (veq/hr)				Tiempo (min)	Flujo (veq/hr)				Tiempo (min)
	Alto	Medio	Bajo	Total		Alto	Medio	Bajo	Total	
1	808	1105	800	2713	10.19	828	1106	797	2732	10.36
2	1107	1390	297	2793	4.82	1119	1416	320	2854	4.84
3	1542	1769	1155	4467	4.73	1542	1777	1193	4512	4.77
4	786	153	43	981	0.60	842	287	60	1189	0.60
5	868	586	281	1735	3.68	874	639	282	1796	3.67
6	1008	873	376	2258	14.14	988	902	373	2263	14.15
Total	1040	1094	561	2696	38.16	1042	1119	570	2731	38.38
	DIFERENCIAS					2	25	8	35	0.221

Se observa, que si bien la demanda en la red vial en su conjunto aumento al doble, el eje de proyecto en sentido Poniente Oriente, aumenta aproximadamente al triple. Esto, se traduce en diferencias importantes en el tiempo total para cruzar el eje (Oriente a Poniente del orden de 90 min. contra 38 en el sentido opuesto), situación no observada en las situaciones anteriores, donde el tiempo para ambos sentidos era de 32 a 33 minutos en total, en cualquier sentido. Esto, indica una presencia importante de congestión en el sistema, que se traduce en una gran demanda por el eje que presenta mejores niveles de servicio que el resto de la malla. Sin embargo persisten las similitudes al existir una malla congestionada entre las asignaciones multiusuarios siguiendo un enfoque determinístico y un enfoque estocástico con poca dispersión en cada clase de usuario.



## 5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### - Respecto a la compatibilidad de información

A nivel de redes buffer SATURN - con lógica de arco, útiles en estudios estratégicos - , los resultados de los ejercicios realizados indican que existe plena compatibilidad de información de SATURN con EMME2, una vez conocidas de las redes calibradas con SATURN las especificaciones y los valores de los parámetros de las curvas flujo-velocidad.

A nivel de redes detalladas - con lógica de nodo, conocidas como INNER en SATURN, útiles en estudios tácticos -, SATURN provee ciertas ventajas al ser conocida su integración con modelos de simulación de tráfico como TRANSYT. En este caso, se recomienda seguir investigando esta integración con EMME2, el cual requiere en su lógica que ingresen como inputs los parámetros y las especificaciones de las funciones flujo-demora en el nodo, situación que en SATURN se simula a nivel de red interna convirtiéndose en un producto del modelo.

### - Respecto a la tarificación vial

La tarificación por \$/km entrega asignaciones distintas a una tarificación por puntos de cobro, principalmente en aquellos arcos de corta longitud, donde la relación \$/km pierde relevancia y donde al tarificar por punto, se presentan alternativas de fuga importantes. En este sentido se recomienda en una vía tarificada tratar especialmente los accesos del eje, para evitar las posibles fugas, principalmente en aquellas vías que no constituyen nuevas aperturas.

La asignación con multiclases de usuarios provee mayores posibilidades de captar mejor las respuestas al peaje por tipo de usuarios, de acuerdo a su valoración del tiempo. No se observan mayores diferencias, ante cualquier nivel de congestión en la red, en trabajar con una asignación multiclase estocástica con poca dispersión para percibir los costos por arco en cada clase y una asignación "todo o nada" por clase. Dados los resultados obtenidos y las incertidumbres de los algoritmos estocásticos para redes urbanas, se recomienda trabajar con asignación multiclase, con una cantidad razonable de clases de usuarios - no mas de 5 - que permitan suponer baja dispersión en cada una de ellas y utilizar asignación determinística (algoritmo de Frank-Wolfe de la manera tradicional ) para cada clase.

Respecto a los resultados obtenidos, se observa una gran similitud en los niveles de servicio y las asignaciones obtenidas en todas ellas, a nivel del total del flujo por arco. Esto confirma los resultados de las modelaciones de redes existentes de diferentes estudios urbanos, para resolver el problema de equilibrio de tráfico con demanda inelástica; las cuales, en general se han hecho en ambiente SATURN con una sola clase de usuario y con enfoque determinístico. Estas por lo general han obedecido a otros propósitos - no para tarificar la red - , concluyéndose de este trabajo, que los resultados a nivel de totales por arco, no serían muy distintos a aquellos obtenidos si las modelaciones hubiesen sido efectuadas con asignación multiclase.



Finalmente, es importante continuar con esta línea de trabajo para el caso de equilibrio de mercado con demanda elástica, debiéndose en este caso realizar la comparación de EMME2 con ESTRAS, modelo utilizado para resolver el problema de equilibrio de mercado en Santiago.

## BIBLIOGRAFIA

Sheffi Yosef , (1985). **Urban Transportation Network : Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods**. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632.

Sheffi Y. and Powell W. (1981). A Comparison of stochastic and deterministic traffic assignment over congested networks. **Transportation Research** 15B, 53-64.

Spiess, H. and Florian, M. (1989), Optimal Strategies: A New Assignment Model for Transit Networks, **Transportation Research B**, Vol. 23B, 2, 83-102.

Spiess, H (1990) , **A Gradient Approach for the O-D Matrix Adjustment Problem**, Publication 693, Centre for Research on Transportation , University of Montreal.

SATURN NOTES, Version 7.1 (1985). **The Institute for Transport Studies**. The University of Leeds. and WS Atkins Planning Consultants Ltda.

**EMME/2 User's Manual** (1994) . Cap 6 Algorithms 6-23. INRO Consultants Inc., Montreal, Canada.

FIGURA 1

