

COMPARACION EXPERIMENTAL DEL CONTROL DINAMICO Y POR PLANES
PREFIJADOS DE UNA RED DE SEMAFOROS EN EL CENTRO DE SANTIAGO

Patricia Ross y Jaime Gibson

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile

Casilla 228/3, Santiago, Chile.

RESUMEN

El control dinámico de redes de semáforos es una técnica que está recibiendo creciente atención. En teoría, sus ventajas sobre la operación con planes prefijados son indiscutibles pero no ha resultado fácil materializarlas. Hay poca, y reciente, evidencia de que algunos sistemas dinámicos proveen un mejor funcionamiento. Sin embargo, esta evidencia ha sido obtenida en ciudades con tráfico poco heterogéneo y con baja proporción de locomoción colectiva. De aquí el interés de realizar una comparación en un contexto como el del centro de Santiago.

Este trabajo presenta un experimento llevado a cabo en el límite oriente del triángulo central, en una zona equipada con controladores capaces de operar con planes prefijados y con un programa dinámico (PRV, desarrollado en España). Se realizaron mediciones de flujos y tiempos de viaje, para ambas políticas de control, en varios circuitos de la red y en períodos que comprenden las puntas de la mañana y de la tarde. Los datos se compararon mediante análisis de covarianza; también se usó análisis de varianza para los buses.

Los resultados indican que, para automóviles, hay una diferencia sistemática y significativa en favor de los planes prefijados, de un 12%. Para los buses, en cambio, las variaciones no tienen tendencia definida y son menos significativas, lo que sugiere que su operación es poco sensible a la programación de los semáforos. Se hace una discusión de las causas probables del inferior rendimiento del sistema dinámico y de posibles cursos de acción a futuro.

1. INTRODUCCION

En el centro de Santiago se está implantando, desde fines de los años 70, un sistema de control de tráfico por área. Puede actuar con planes prefijados o con control dinámico. En 1984 se planificó la entrada en operación de este último en el extremo Oriente del triángulo central. Los técnicos de la Dirección del Tránsito y Transporte Público de la Municipalidad de Santiago plantearon la inquietud de comparar el funcionamiento de ambas lógicas de control, de la cual surgió esta investigación.

No hay muchos precedentes sobre experimentos similares; entre ellos, estudios en Madrid (Holroyd, 1972) y algunas ciudades inglesas (Hunt et al., 1981). No se sabe de ninguno en ciudades del Tercer Mundo, en las que hay mayor presencia de buses.

Los objetivos de la investigación son, pues, dos:

- comparar el comportamiento del tráfico en la red bajo control dinámico o por planes prefijados;
- identificar características especiales asociadas al tráfico mixto.

En los Capítulos 2 y 3 se describe el experimento y la metodología de comparación, respectivamente. Los Capítulos 4 y 5 contienen los resultados para vehículos livianos y para buses. La discusión de los resultados se sintetiza en el Capítulo 6.

2. DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO

2.1. Generalidades

La zona del experimento comprende las Avdas. Bellavista, Santa María y Cardenal Caro, entre Pío Nono y Patronato; la Alameda B.O'Higgins, entre Vicuña Mackenna y Portugal, y el cruce Merced-Purísima. Se trata en general de vías de alta capacidad, a la que el uso del suelo circundante impone pocas restricciones, y de sentido único. La limitación de mayor entidad la constituyen los puentes sobre el río Mapocho, por su reducida capacidad de almacenamiento. Los flujos son fuertes en los períodos punta, con marcada variación por sentido entre mañana y tarde, y bastante menores el resto del día. En conjunto, sólo se observan problemas de congestión puntuales. Del flujo total, los buses representan un 10 - 15% en veh-km/hr, o 20 - 25% en ADE-km/hr, pero esta proporción es muy variable entre calles. Todas estas características hacen que la zona sea particularmente adecuada para un experimento con los objetivos mencionados.

Hay en la zona 17 intersecciones semaforizadas pero en los 4 puentes las intersecciones de cada uno de sus extremos se manejan como un solo cruce. Los controladores, suministrados por la firma española AUTRON, están interconectados por cable a una central de zona y ésta a un computador central. Esto permite operar con varios planes prefijados al día o en modo dinámico. Este último obtiene información de sensores electromagnéticos; en la fecha de la experiencia, había 6 estaciones de

medida, con un total de 21 detectores. El número de estaciones es claramente inferior al de intersecciones, por razones presupuestarias.

En la Figura 1 se presenta un croquis de la zona, con indicación de la posición de las intersecciones semaforizadas y de las estaciones de medida.

La primera tarea fue poner a punto los programas para el funcionamiento del sistema con ambos métodos de control, los que son tratados en las secciones 2 y 3 de este Capítulo. Verificada en terreno su operación, se realizaron mediciones de tiempos de viaje y flujos en diversos circuitos y rutas de buses de la red, que se explican en la sección 4.

2.2. Control dinámico

Se basa en un algoritmo desarrollado en España, denominado PRV (Municipalidad de Santiago, 1982). Es necesario primero definir las estrategias de control. Estas contienen tres elementos:

- subzonas de ciclo idéntico (SCI), que son grupos de cruces que tendrán el mismo tiempo de ciclo;
- grupos de coordinación (GC), que son cruces pertenecientes a una SCI y que conforman una ruta a la que se desea dar prioridad en la coordinación. Cada GC puede tener a lo sumo un cruce que pertenezca a otro, configurándose así una estructura de árbol para la coordinación;
- período del día en que la combinación de los anteriores elementos es válida.

De esta forma, variaciones en la estructura de los flujos se deben traducir en cambios de estrategia, sea para reagrupar intersecciones de similar nivel de carga o para dar prioridad a otras rutas.

El programa PRV determina ciclo, repartos y desfases para cada SCI, con la información que recibe de los detectores y procedimientos internos de cálculo.

Para el tiempo de ciclo, calcula el de cada cruce de la SCI (pueden excluirse algunos a priori) y elige el máximo de ellos. La fórmula usada es empírica y tiene parámetros predefinidos (mínimo, máximo, flujo de saturación, tiempo perdido y factor de ajuste) a los que añade flujos medidos por los detectores y porcentaje de tiempo de ocupación, que corrige el valor de los flujos si hay saturación. En las intersecciones no dotadas de detectores se especifican factores relativos a alguna estación de medida cercana.

Para evitar saltos bruscos, tiene un factor de inercia, que el usuario elige. También, el operador puede forzar desde el computador central el tiempo de ciclo en cualquier momento.

Los repartos no son calculados sino seleccionados de entre seis posibilidades predefinidas, como porcentaje del tiempo de ciclo. Estos pueden ser diferentes para diversos tiempos de ciclo u horas del día. Para hacer la elección, estima el grado de saturación de cada fase (algunas pueden ser excluidas a priori) con cada alternativa y busca minimizar el máximo grado de saturación por fase considerada. También pueden ser forzados por el operador.

Los desfases son determinados con un algoritmo de maximización de banda para producir una onda verde en cada grupo de coordinación. Tiene incorporada una relación velocidad-flujo, sensible a los factores de carga provistos por los detectores y al tiempo de ciclo que calcula. Maximizada la banda, asigna las holguras según criterios predeterminados.

Todas estas decisiones son revisadas cada cierto tiempo llamado período de integración. Este corresponde a un número entero de ciclos, tal que se aproxime a un valor especificado, del orden de 5 minutos. Sin embargo, los detectores son interrogados a intervalo constante, lo que puede introducir sesgos en la estimación de los flujos.

En conjunto, cabe destacar dos características del programa. Primero, que ciclo, repartos y desfases están en función de la información de flujos de los detectores, por lo que errores de éstos o los puntos de medida "simulados" pueden tener una repercusión considerable. Segundo, hay una gran cantidad de parámetros a especificar, lo que ofrece flexibilidad por una parte, pero exige un gran esfuerzo de calibración, por otra.

La implementación del control dinámico para el experimento significativo, de hecho, colaborar en su puesta en marcha. Esto es, hubo que afrontar desde la calibración de los detectores hasta definir los repartos. Para los parámetros de ajuste fino se adoptaron valores sugeridos por los proveedores, ante la imposibilidad de hacer una calibración detallada.

Por la homogeneidad de la zona, se decidió que toda ella tenga un ciclo común. En consecuencia, las estrategias quedaron definidas sólo por variaciones horarias de la estructura de flujos, para fines de coordinación, identificándose en total 4. Su período de aplicación y característica dominante se muestran en la Tabla Nº 1.

TABLA Nº 1

Operación con control dinámico

Estrategia	Horario de aplicación	Observaciones
1	7.00 - 9.30	Coordina ingreso al centro
2	9.30 - 17.10; 20.30 - 22.00	Coordina en ambos sentidos
3	17.10 - 20.30	Coordina salida del centro
4	22.00 - 7.00	Coordina en ambos sentidos

Se determinaron repartos adecuados para las puntas de la mañana y la tarde y se generaron las 6 posibilidades como porcentajes (90 - 100 - 110) de ellos.

Una vez en operación, inspecciones en terreno motivaron múltiples correcciones hasta que ella se consideró satisfactoria. Mayores detalles sobre todos estos aspectos se encuentran en Ross (1987).

2.3. Control por planes prefijados

Los planes se determinaron con las técnicas usuales, mediante el programa TRANSYT-8A (Vincent et al., 1980; Gibson, 1985). Se construyó una red de 17 nodos y 94 arcos, a partir de una generada en otro estudio en la zona (CITRA, 1983), actualizándose los flujos con mediciones ad-hoc.

Se tomaron 4 períodos (punta y fuera de punta, en mañana y tarde). En cada uno de ellos se corrió SIGSET para cada intersección, lo que sirvió de base para determinar el ciclo de la red y los repartos. Estos se afinaron después de simular la red. Finalmente, los desfases se obtuvieron con TRANSYT-8A, empleando los ponderadores por arco típicos para Santiago, dando ponderación nula a los arcos de buses en que hay paradero. Se llegó así a 4 planes, cuyo horario de aplicación y tiempo de ciclo figuran en la Tabla Nº 2.

TABLA Nº 2

Operación con planes prefijados

Plan	Horario de aplicación	Ciclo(seg)
1	7.30 - 10.00	90
2	10.00 - 12.00; 14.00 - 18.00	60
3	12.00 - 14.00	60
4	18.00 - 20.00	90

De 20.00 a 7.30 horas se opera con control dinámico, lo que no afecta a las mediciones. Observaciones en terreno aconsejaron pequeñas modificaciones que contribuyeron a mejorar la operación del sistema.

2.4. Mediciones

Programa. El programa original de mediciones consultaba tomar datos de tiempo de viaje y flujo durante dos semanas para cada método de control, que es lo normal. Severas restricciones de recursos obligaron a reducirlo a la mitad. A la vez, hubo que ajustar la metodología de medición para mantener un buen grado de representatividad usando menos observadores.

Lugares. Para los vehículos livianos se seleccionaron tres circuitos, que se muestran en la Fig. 2. En dos de ellos predomina la dirección Oriente-Poniente y en el otro, la Norte-Sur. De los primeros, uno comprende vías con bajo flujo de buses (Bellavista - Santa María) y el otro (Alameda - Merced) tiene gran cantidad de ellos. En el circuito Norte-Sur apenas hay tramos con presencia de buses. Todos los circuitos están formados por tramos que definen grupos de coordinación, con raras excepciones. Se estima, pues, que siendo distintos en sus características ofrecen en conjunto un panorama representativo de la red global.

Para los buses fueron elegidas 4 rutas, que son tramos del circuito Alameda - Merced. Dos de ellas corresponden a cada sentido de la Alameda, la tercera a Merced- Irene Morales-Alameda y la última a Cardenal Caro. Difieren en términos de fricción en paraderos (muy alta en Irene Morales y nula en Cardenal Caro) y flujo de buses. Un esquema de estas rutas aparece en la Fig. 2.

Períodos. Con el objeto de recoger un rango amplio de condiciones de circulación se adoptaron dos períodos de medición: 7.30 - 10.30 y 16.00-19.00 horas. Incluyen las puntas de la mañana y la tarde y situaciones fuera de ellas.

Métodos. Para vehículos livianos, los tiempos de viaje se midieron con vehículo flotante y los flujos con observadores. Cada circuito fue subdividido en tramos homogéneos en flujo y se estableció un programa horario de recorridos del vehículo por cada uno de ellos. Cuando pasaba por un tramo, el observador contaba el flujo del pelotón - clasificado en vehículos livianos, camiones y buses - en el cual iba el vehículo; a su vez, un observador en el vehículo registraba el tiempo de viaje en el tramo, entre las líneas de detención inicial y final de él. Esta técnica permite ahorrar personal pero requiere una planificación y ejecución cuidadosas.

Para buses, los tiempos de viaje totales en cada ruta se midieron con el método de las patentes, para una muestra predefinida de variantes que la recorren. Los datos de flujo son los de los tramos correspondientes del circuito 3. Los tiempos de viaje fueron medidos en una media hora, de las 3 de cada período, para cada ruta; preferentemente, fuera de las puntas.

Desarrollo. Las mediciones se realizaron entre Octubre y Noviembre de 1985, participando personal de INTRAT Ltda., DICTUC y Municipalidad de Santiago. Con el sistema de planes prefijados no se presentaron dificultades, obteniéndose datos de 5 mañanas y 5 tardes. En el caso del dinámico, fallas del sistema y problemas de diverso tipo perturbaron el proceso. Hubo que descartar algunos días y repetir mediciones, lográndose finalmente 5 mañanas pero sólo 3 tardes.

En total, se recolectaron 4620 parejas de datos tiempo de viaje-flujo para tramos de circuitos de vehículos livianos y 1502 datos de tiempo de viaje en rutas de buses. Sin embargo, como estos últimos deben asociarse a valores del flujo tomados con menor frecuencia, se formaron 66 parejas tiempo medio de viaje-flujo (cada promedio de unas 20 observaciones). Los archivos fueron creados, validados y procesados con el paquete computacional SPSS (Nie et al., 1975).

3. METODOLOGIA DE COMPARACION

La comparación del funcionamiento de ambos sistemas plantea tres preguntas: qué variables, con qué nivel de agregación y qué técnica estadística utilizar.

Subyacen a ellas dos cuestiones básicas. La primera es que siendo los circuitos y rutas idénticos para cada método de control, los días de medición no son los mismos, de modo que varía también el flujo, lo que puede incidir en cambios del tiempo de viaje no asociables al tipo de control. Esta variación puede deberse a fluctuaciones aleatorias (no pueden ser estacionales por la proximidad de las fechas del experimento) o a reasignaciones inducidas por cambios en el nivel de servicio. La segunda es que, por ejemplo, la variable tiempo de viaje en el tramo x a la hora z es aleatoria, por lo que hacer una comparación confiable a ese nivel - que incorpore el efecto flujo - requiere un número mucho mayor de observaciones que el disponible.

En atención a esto, y para no perder la posibilidad de detectar comportamientos diferenciados, se decidió usar como niveles de agregación el circuito y período (mañana o tarde) para vehículos livianos y la ruta, sin más por los pocos datos de flujo, para buses. Además, se emplea el conjunto de circuitos por período.

Este tipo de agregación impone una transformación de las variables tiempo de viaje y flujo para los vehículos livianos. Un procedimiento establecido es convertir la primera a una suma de tiempos ponderados por el flujo de cada tramo (lo que da una tasa de tiempo total en el circuito en veh-hr/hr) y la segunda a una suma de flujos ponderados por la longitud de cada tramo (lo que da una tasa de distancia viajada en el circuito, en veh-km/hr). Para agrupar distintos tipos de vehículos se usan los factores de equivalencia usuales en la zona céntrica. La transformación para buses se define en la sección 5.2.

Ahora, existiendo dos fuentes de variación (sistema de control y demanda) una técnica adecuada de análisis estadístico, usada en estudios previos similares, es el análisis de covarianza. Es una extensión del método de regresión basada en la presencia de una variable categorial (sistema) y otra covariable (demanda). Si se supone que su efecto sobre el tiempo total de viaje es lineal y aditivo, se puede formular una regresión conjunta, siempre que la varianza entre sistemas sea la misma, del siguiente tipo:

$$TT = \alpha + \beta DV + \gamma D + \delta D \cdot DV \quad (1)$$

donde:

TT : tiempo total empleado ($\frac{ADE-hr}{hr}$)
DV : distancia viajada (ADE-km/hr)

- D : variable muda (1 si es dato con planes fijos, 0 si dinámico).
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta$: parámetros por estimar.

La hipótesis de aditividad se puede docimar planteando que δ no es significativamente distinto de 0. Para ello se usa un test F. Si la hipótesis no es rechazada, se reestima la ec.(1) sin el término en δ y se hace un test análogo sobre γ . Si es significativamente distinto de 0, hay diferencia entre sistemas y viceversa. Si es > 0 , será mejor el sistema dinámico y si es < 0 , el de planes fijos. Mayores detalles sobre la técnica, incluyendo casos en que alguna hipótesis es rechazada, puede encontrarse en Ross (1987).

Aunque la formulación es intuitivamente atractiva, se ha buscado una explicación más apoyada teóricamente para ella. Si en (1) se divide por DV, resulta:

$$\frac{TT}{DV} = \frac{1}{\bar{v}} = \beta + \frac{\alpha}{DV} + \delta D + \gamma \frac{D}{DV} \quad (2)$$

Es decir, está implícita una relación velocidad - flujo, cuya forma es plausible si $(\alpha + \gamma) < 0$ y se trata de niveles de flujo no extremos (Gibson et al., 1984). Por otra parte, esto permite dar interpretación a los parámetros. $(\beta + \delta)$ es el recíproco de la velocidad a que se tiende a flujos muy altos y $(\alpha + \gamma)$ controla el efecto del flujo sobre la velocidad media. Es lógico suponer que dicha velocidad límite no debiera estar mayormente influida por el sistema (con mucha congestión, un dinámico tiende a planes prefijados), pero éste sí puede implicar cambios en la velocidad media a un mismo nivel de flujo. Es decir, la hipótesis de aditividad de la ec. (1) tiene un fundamento razonable.

No obstante, dado que se hace la estimación con datos que no necesariamente cubren todo el rango de grados de saturación, no es descartable obtener $\delta = 0$. Esto no implica imposibilidad de identificar superioridad de alguno de los sistemas de control. Si, por ejemplo, estadísticamente $\gamma = 0$ y $\delta \neq 0$, será mejor el dinámico si $\delta > 0$. Hay incluso combinaciones de valores de γ y δ significativamente distintos de 0 que permiten arribar a conclusiones unívocas en la comparación.

Si, por uno u otro camino, se encuentra diferencia significativa entre sistemas, su magnitud porcentual representativa (Δ) se evalúa en la media conjunta de DV.

Para los vehículos livianos se decidió usar la especificación (1) principalmente, recurriendo a la (2) sólo para aclarar ciertos puntos de interpretación. La variable DV se construye sumando el flujo equivalente de cada tramo ponderado por su longitud. Se asume aquí que hay interacción de todos los tipos de vehículo. La variable TT resulta de sumar el tiempo de viaje de cada tramo ponderado también por el flujo equivalente, para conferirle sentido físico directo a los coeficientes.

Para los buses, la especificación elegida fue la (2). Por una parte, sólo se disponía de un valor del flujo para cada ruta (no para tramos de ellas) y, por otra, el tiempo de viaje no es útil para comparar rutas. En cambio, una relación entre velocidad media y flujo representativo supera esos obstáculos. La variable $1/\bar{V}$ se calcula como cociente entre tiempo medio observado y longitud de la ruta. La variable DV es el producto del flujo equivalente medido y la longitud de la ruta.

Cabe advertir que a pesar de la equivalencia teórica de ambas especificaciones es posible obtener coeficientes de correlación múltiple muy diferentes, con los mismos datos. En efecto, si la influencia del flujo sobre la velocidad es muy débil, R^2 será alto con la primera especificación y bajo con la segunda. Sin embargo, el valor estimado de los coeficientes correspondientes debe coincidir.

4. RESULTADOS PARA VEHICULOS LIVIANOS

4.1. Análisis de consistencia

Con el propósito de cimentar la confiabilidad de los resultados de la comparación de sistemas, se realizó una serie de pruebas encaminadas a verificar que los datos presenten un buen comportamiento.

La primera es que las velocidades medias observadas en cada circuito y período sean apropiadas. Los valores obtenidos aparecen en la Tabla N° 3, evidenciando ser consistentes.

TABLA N° 3
Velocidades medias observadas
(en km/hr)

Círculo	Período	Planes fijados	Dinámico
1	Mañana	33,8	29,3
	Tarde	30,0	27,3
2	Mañana	20,6	17,5
	Tarde	19,5	18,2
3	Mañana	24,3	21,5
	Tarde	27,9	23,2

Luego se probó si los valores adoptados para los factores de equivalencia influían en la estimación, concluyéndose que ésta es poco sensible a ellos. No fue necesario entonces buscar valores mejores que los usados.

En seguida, se investigó el posible efecto de la variabilidad diaria. A este fin, se aplicó el análisis de covarianza para datos de días distintos pero con el mismo sistema de control. En los casos en que había observaciones de 5 días (planes prefijados, mañana y tarde; diná-

mico, mañana) se tomaron grupos de 2 y 3 días y se estimaron las regresiones por circuito. En todos los circuitos y periodos se pudo rechazar holgadamente las hipótesis de diferencia de pendiente o de elevación, para cada sistema. Luego, cada método de control opera con estabilidad, a la luz de los datos.

Basándose en esta conclusión se diseñó otra prueba. Los planes prefijados se determinaron con TRANSYT, el que calcula DV y TT. Es interesante comparar esa predicción con lo que dicen los datos, para vehículos livianos. Como los circuitos elegidos no cubren toda la red modelada, pero sí una parte sustancial de ella, para lograr el objetivo se procedió a estimar la regresión $TT = a + b DV$, sólo con las observaciones de este sistema de control, para la mañana y la tarde por separado. Con ella y el valor de DV para las puntas respectivas se calculó TT, cuya comparación con el predicho por TRANSYT es como sigue:

	TT TRANSYT ADE-hr/hr	TT Regresión ADE-hr/hr	Δ (%)
Punta mañana	621,5	663,2	-6,3
Punta tarde	504,8	511,4	-1,3

El grado de acuerdo es casi sorprendente, habida cuenta de los centenares de variables aleatorias que están detrás de estas cifras. Es lógico que la subpredicción de TRANSYT sea mayor en la mañana, donde hay más congestión.

Finalmente, se docimó la hipótesis de igualdad de varianza de TT entre sistemas, para cada periodo y circuito y el total de circuitos. En todos los casos no se pudo rechazar la hipótesis, con un test F y nivel de significancia 5%.

En suma, las pruebas realizadas aportan suficiente evidencia de que la confiabilidad de la base de datos es alta y respaldan la aplicabilidad de la técnica de comparación elegida.

4.2. Comparación de conjunto

Se tomó primero como base de referencia todos los circuitos, construyéndose las variables TT y DV con ese nivel de agregación espacial, distinguiendo entre periodos. Se estimó la regresión (1) y en ambos casos la hipótesis de igualdad de pendientes entre sistemas ($b = 0$) no se pudo rechazar (nivel 5%). Las regresiones se reestimaron sin el término de interacción sistema-flujo, con los resultados que muestra la Tabla N° 4.

TABLA Nº 4

Comparación con todos los circuitos

Periodo	$\alpha \left \frac{\text{ADE-hr}}{\text{hr}} \right $	$\beta^1) \left \frac{\text{hr}}{\text{km}} \right $	$\gamma^1) \left \frac{\text{ADE-hr}}{\text{hr}} \right $	R^2	$N^2)$	$\Delta^3)(\%)$
Mañana	-108,21	0,057* (258,7)	-60,22* (21,1)	0,81	63	+14,6
Tarde	-61,624	0,049* (83,7)	-39,70* (12,9)	0,64	65	+10,5

1) Entre paréntesis figura debajo el estadígrafo F.

2) Número de observaciones

3) Porcentaje de mejora de planes prefijados

* : tiene significancia estadística al 5%

La principal conclusión es que tanto en la mañana como en la tarde se detecta un mejor funcionamiento del control por planes prefijados. La diferencia tiene alta significación y es, en promedio, de un 12% de TT.

Como $1/\alpha$ representa la velocidad media en la red en condiciones de saturación, es correcto que β sea mayor en la mañana. Como hay mayor carga en ese período, el estimador debe ser más realista. Su valor (equivalente a 17 km/hr) parece razonable.

En cuanto a α , su signo indica que está implícita una relación velocidad-flujo decreciente, como es de esperar. El paquete SPSS no entrega ningún estadígrafo para la constante por lo que se reestimó la regresión con la especificación (2), en que el coeficiente asociado no es la constante. Los estimadores son parecidos y resulta que α es significativa en la mañana, no así en la tarde. Es decir, en la tarde tiende a haber una velocidad media constante, distinta eso sí entre métodos de control.

Por lo demás, no hay diferencia sustantiva entre los períodos de mañana y tarde en términos del rendimiento comparativo de los sistemas. El mayor margen para planes prefijados en la mañana hace pensar que el dinámico se deteriora más con flujos mayores. Las Figuras 3 y 4 grafican las regresiones para mañana y tarde, respectivamente, con la especificación (1) sin el término de interacción.

4.3. Comparación por circuito

Un nivel menor de agregación puede entregar información adicional, útil para comprender por qué difieren los sistemas de control. Por ello, se replicó el análisis para cada circuito y período. Al estimar

las regresiones se presentaron problemas debido a que los datos del sistema dinámico mostraban tendencia a la convexidad, en vez de linealidad. Con frecuencia, este problema aparecía cuando se trataba de valores de DV superiores a los observados con el otro sistema. Se decidió trabajar con las observaciones situadas en un rango común de DV para ambos sistemas. Este procedimiento, además de evitar la influencia de puntos extremos, es consistente con el objetivo de comparar en condiciones homogéneas.

Con esta restricción, en todas las combinaciones de circuito y período no se pudo rechazar la hipótesis de igualdad de pendientes. La reestimación sin término de interacción arrojó los resultados que figuran en la Tabla N° 5.

El signo de γ es siempre negativo; esto es, en todos los casos hay ventaja para los planes prefijados aunque no es significativa, al nivel elegido, en algunos. Resalta que la diferencia no sea significativa en ninguno de los períodos para el circuito 2; en los otros se puede afirmar que el control dinámico funciona peor y en porcentajes similares al determinado para el conjunto.

El coeficiente B, siempre muy significativo, reproduce la jerarquía de velocidades medias observadas y es estable entre períodos para los circuitos 1 y 3. En el 2 parece influir la congestión del puente Purísima.

Nuevamente, la relación velocidad-flujo implícita es decreciente ($\alpha < 0$), sin excepción. Pero si se usa la especificación (2), se encuentra que en ningún circuito y período α es significativamente distinto de 0. Los R^2 son bajísimos, por el motivo enunciado en el Capítulo 3. En suma, esto sugiere que en los rangos de flujo considerados, γ se mantiene más bien constante en cada caso pero al ampliar estos rangos, tiende a ser perceptible la influencia del flujo, actuando en sentido inverso. Esta tendencia alcanza mayor significación en la mañana, lo que explica el resultado para el conjunto de los circuitos.

Los coeficientes de correlación R^2 de la Tabla N° 5 son claramente inferiores a los obtenidos agrupando los circuitos, confirmando la mayor dispersión existente a un menor nivel de agregación. Con todo, el análisis por circuitos ratifica la superioridad de los planes prefijados aunque es sugente que ella sea débil en el circuito 2.

5. RESULTADOS PARA BUSES

5.1. Análisis global

No es posible someter los datos para buses a pruebas análogas a las realizadas para vehículos livianos, ya que la cantidad de mediciones de flujo es muy reducida para que aquéllas tengan validez. Pero la descripción gruesa provista por las velocidades medias observadas conserva vigencia. Ellas se presentan en la Tabla N° 6, con indicación del flujo total equivalente promedio a que están asociadas.

TABLA Nº 5

Comparación por circuito
(para niveles de flujo comunes)

Circuito	Periodo	α	$\beta^1)$	$\gamma^1)$	R^2	$N^2)$	$\Delta^3)(\%)$
1	Mañana	-16,48	0,040* (213,9)	-15,09* (19,7)	0,74	85	+13,5
	Tarde	-13,90	0,041* (57,6)	-11,21* (6,7)	0,50	62	+ 9,4
2	Mañana	- 3,66	0,050* (47,0)	-0,27 (0,0)	0,43	66	+ 0,4
	Tarde	-18,00	0,071* (45,3)	-3,44 (1,1)	0,43	67	+ 5,7
3	Mañana	-16,70	0,048* (50,8)	-15,51 (2,4)	0,54	55	+ 7,6
	Tarde	- 9,61	0,045* (22,8)	-33,59* (15,5)	0,42	63	+16,8

1) Entre paréntesis figura debajo el estadígrafo F

2) Número de observaciones

3) Porcentaje de mejora sistema de planes prefijados

* : tiene significancia estadística al 5%.

TABLA Nº 6

Velocidades medias de buses observadas
(con archivo de datos reducido)

Ruta	PLANES FIJADOS		DINAMICO	
	$\bar{v}(\text{km/hr})$	$\bar{q}(\frac{\text{ADE-hr}}{\text{hr}})$	$\bar{v}(\text{km/hr})$	$\bar{q}(\frac{\text{ADE-hr}}{\text{hr}})$
1	24,5	2732	21,7	2764
2	23,0	1976	25,3	1828
3	10,8	2025	12,2	2074
4	39,7	745	31,5	780

Es evidente que hay tres categorías bien diferenciadas: las rutas 1 y 2 (las de Alameda) que son similares entre sí; la ruta 3 y la ruta 4. En esta última, sin paraderos y con menor nivel de flujo (nótese que los buses Cardenal Caro no van con el pelotón proveniente de Costanera), la velocidad es bastante alta. En la ruta 3, la más influida por paraderos, \bar{v} es sensiblemente inferior. Para apreciar correctamente los valores en las rutas 1 y 2 téngase presente que fueron medidas en horas fuera de punta, de modo que la cantidad y duración de paradas por movimiento de pasajeros es reducida.

La velocidad media para el conjunto de rutas, debidamente ponderada, es de 20,5 km/hr. Ella es algo inferior, sobre todo en la tarde, a la obtenida en el circuito 3 de vehículos livianos (que es el comparable). Por otra parte, la velocidad libre de los buses que se midió previamente en la zona para modelar con TRANSYT fue de 38 km/hr, muy en línea con la resultante en la ruta 4, en que se da esa condición de flujo. En suma, los datos tienen propiedades consonantes con la realidad.

Se descartó todo análisis ulterior para el conjunto de las rutas ya que una variable no controlada, los paraderos, juega un rol diferencial entre ellas. A la vez, se decidió agrupar las rutas 1 y 2.

5.2. Comparación por ruta

La especificación empleada para el análisis de covarianza es:

$$\frac{1}{\bar{v}} = \frac{\bar{t}}{L} = \beta + \frac{\alpha}{qL} + \frac{\gamma D}{qL} + \delta D \quad (3)$$

donde \bar{t} y q son el tiempo medio de viaje y el flujo equivalente medidos en la observación pertinente, L es la longitud de la ruta y D es una variable muda, que vale 1 si los datos son para planes prefijados.

Por la poca cantidad de datos, sólo se incorporaron 5 de las 10 horas en que se midió para el sistema de planes prefijados, para igualar el número de datos disponibles para el sistema dinámico. La misma razón impide distinguir entre períodos en la estimación.

La hipótesis $\delta = 0$ no pudo ser rechazada, a un nivel de significancia inferior al 1%, en ningún caso. Reestimadas las regresiones, los resultados son los de la Tabla Nº 7.

Sólo en la ruta 4 la diferencia entre sistemas es significativa y favorece a los planes prefijados. Esto es concordante con los resultados anteriores pues en ella los buses se comportan como automóviles.

Pero debe notarse que en la ruta 3, el signo de γ es el opuesto y su F es muy próximo al valor de tabla para 5%. En las rutas 1 y 2, el sistema de control no juega ningún papel.

TABLA Nº 7
Comparación para buses

Ruta	$B(\frac{hr}{km})$	$\alpha^1)(\frac{ADE-hr}{hr})$	$\gamma^1)(\frac{ADE-hr}{hr})$	R_a^2 2)	N ³⁾
1 y 2	0,050	-7,49 (1,38)	-0,77 (0,04)	0,05	25
3	0,057	18,05* (4,92)	9,68 (3,80)	0,52	10
4	0,019	6,80 (3,19)	-3,85* (5,37)	0,38	9

- 1) Entre paréntesis figura debajo el estadígrafo F
 2) R_a^2 : coeficiente de correlación ajustado, útil por el bajo número de observaciones.
 3) Número de observaciones
 * : Coeficiente significativo al 5%.

El coeficiente B muestra un ranking idéntico al de velocidades medias observadas, como debe ser. Sin embargo, el signo de α es positivo en las rutas 3 y 4, indicando relación directa entre velocidad y flujo, pero el coeficiente alcanza significancia sólo en la primera.

Sería aventurado pretender extraer conclusiones refinadas de estas cifras por el escaso número de observaciones. De hecho, al incluir la variable D, todos los coeficientes pierden significación (excepto B). Por lo tanto, lo anterior sólo constituye indicios. En conjunto, sugieren que hay escasa influencia del sistema de control sobre la velocidad de los buses; el caso más fuerte es consistente con lo encontrado para vehículos livianos. Y puesto que la evidencia sobre la existencia de efecto flujo es débil, se puede proceder a comparar tiempos medios de viaje entre sistemas, a un nivel más desagregado ya que se levanta la restricción al número de datos impuesta por los flujos.

Con el archivo completo de datos se hizo una comparación, por ruta y período, de los flujos observados con cada sistema. No hay diferencia significativa en ningún caso. Esta es una buena base para comparar los tiempos de viaje por ruta mediante análisis de varianza. Se aplicó esta técnica con el paquete SPSS; los resultados se muestran con los parámetros de la distribución espacial de velocidades, aunque los tests se realizaron con tiempos de viaje, en la Tabla Nº 8.

Las velocidades medias son muy similares a las de la Tabla Nº 6, calculadas con el archivo reducido; no hay sesgo entre ambos tipos de análisis. La diferenciación por período deja ver diferencias entre las rutas 1 y 2, por lo que no se agruparon.

De las combinaciones ruta - período, en 4 la diferencia entre sistemas de control alcanza significancia. De ellas, dos favorecen a cada sistema y se producen dos en cada período y una en cada ruta.

Más en detalle, en la ruta 4 hay claros síntomas de superioridad de los planes prefijados confirmando lo visto en el análisis de covarianza. En las otras 3 rutas es difícil encontrar causas precisas de las diferencias. Como en ellas hay influencia de los paraderos, variable no controlada, podría ser que fenómenos que ocurren en ellos estén correlacionados con los días u horas de medición empleadas y, por tanto,

TABLA Nº 8

Comparación por ruta
(archivo de datos completo; \bar{v}_s y s_s en km/hr)

Ruta	Período	Planes prefijados			Dinámico			$\Delta(\%)$
		\bar{v}_s	s_s	N	\bar{v}_s	s_s	N	
1	Mañana	24,0	11,0	198	22,5	12,5	111	+6,7
	Tarde	22,0	6,3	121	17,8	9,8	49	+23,6*
2	Mañana	22,8	7,8	127	22,6	8,1	85	+0,9
	Tarde	26,6	11,1	132	32,8	8,1	22	-18,9*
3	Mañana	9,8	3,3	106	11,2	3,3	68	-12,5*
	Tarde	13,0	4,3	96	13,7	6,9	46	-5,1
4	Mañana	38,1	9,4	110	27,4	14,2	77	+39,1*
	Tarde	40,9	12,1	105	38,3	11,1	49	+6,8

* : diferencia estadísticamente significativa al 5%.

no haya explicación atribuible al sistema. De hecho, si se calcula la velocidad media, ponderada por el flujo de buses, en el conjunto de las 3 rutas ella es de 18,3 km/hr con ambos sistemas. En el circuito de vehículos livianos homólogo, el 3, hay una diferencia sensible entre estos valores. Es decir, la velocidad de viaje de los buses cuando hay paradero parece poco sensible al sistema de control, comportamiento que ya había sido identificado en otro estudio experimental en el centro de Santiago (Gibson, Saavedra y Spoerer, 1982).

6. DISCUSION

El experimento logró las metas fijadas a pesar de los recortes que hubo que hacer en las mediciones. En particular, el método de medir flujos por pelotón ha probado conducir a buenos resultados con menos recursos.

La conclusión principal es que para los vehículos livianos el sistema dinámico funciona significativamente peor; en los buses predomina la indiferencia al sistema de control. Esta conclusión es reforzada por el hecho de que en la única ruta sin paraderos el comportamiento de los buses es similar al de los vehículos livianos. Más aún, se detectó una tendencia del sistema dinámico a empeorar relativamente a niveles de carga muy altos. Esto es, hay muy sólida evidencia de que la implementación de este sistema, en su condición actual, redundaría en pérdidas para los usuarios.

Este resultado es concordante con el del experimento de Madrid (Holroyd, 1972) en que se compararon versiones previas de TRANSYT y del PRV. La magnitud promedio de la diferencia encontrada en ese caso fue de 9%; no se hizo análisis de los buses por separado. También surgieron indicios de deterioro bajo congestión fuerte. La autora no trata las razones de este resultado; sólo indica que puede influir el número insuficiente de detectores instalados.

Volviendo al experimento de Santiago, se buscó una explicación a las diferencias encontradas. Ya se demostró que hay un excelente ajuste entre el funcionamiento de la red con planes prefijados y el predicho por TRANSYT-SA. Esto, junto a la alta significancia estadística de dichas diferencias, no da pie a pensar que se deban a factores exógenos o aleatorios. El problema puede radicar en el sistema de detección, en el programa de control dinámico (PRV) o en ambos.

Con este fin, se tomó una pequeña muestra de tramos en que se apreciaban tiempos de viaje sustancialmente distintos entre sistemas, intentando identificar las variables de programación que producían este efecto. No se encontró una en especial; en unos casos el ciclo y en otros el reparto o el desfase daban cuenta del fenómeno. No es cuestión entonces de un algoritmo específico del PRV. Pero el factor de carga, obtenido de los detectores (reales o simulados), interviene en todas las variables. Por lo tanto, es muy probable que la escasez de puntos de medida juegue un rol importante.

Sin embargo, en el circuito 2 de vehículos livianos no hay diferencia significativa entre métodos de control. Este circuito tiene tramos comunes con el 1 y el 3 y no está dotado de más puntos de medida que ellos. La explicación más convincente que se encontró para este hecho es que los múltiples parámetros del PRV fueron fijados en valores determinados en ciudades europeas, con muy escasa proporción de buses. El circuito 2 es el que más se acerca a esta descripción. Habría entonces también una insuficiente calibración del sistema dinámico.

Es decir, las condiciones de implementación - que distan de ser las mejores - afectan seriamente el rendimiento del sistema. Pero esto no agota el análisis. El circuito 1 tiene relativamente pocos buses y ningún punto de medida en su interior y da un resultado parecido al 3, con alto flujo de buses y varios detectores. Y sucede que los detectores simulados del circuito 1 están, precisamente, ligados a éstos y la direccionalidad dominante de ambos circuitos es la misma. En consecuencia, es altamente probable que algún problema relacionado con los buses en el circuito 3 se esté trasladando al 1.

Ocurre que los detectores no distinguen tipos de vehículo en el conteo ni el PRV en sus algoritmos considera tráfico mixto. Esto puede acarrear tanto subestimaciones del flujo efectivo como sobreestimaciones de velocidad. Este argumento es apropiado también para entender la degradación del sistema dinámico a factores de carga elevados.

Aumentar el número de detectores e, incluso, calibrarlos para introducir un factor de equivalencia de buses no basta como solución, ya que se ha probado la existencia de un comportamiento diferenciado de éstos. Hay que añadir un tratamiento especial en el modelo. El buen desempeño de TRANSYT así lo confirma. Este punto es de suma relevancia porque remite a una limitación no característica del sistema dinámico examinado, sino de todos los métodos de esta naturaleza conocidos, aún los más recientes.

En áreas urbanas con flujos sustantivos de buses, el uso de las actuales técnicas de control dinámico plantea dos inquietudes. Una es que no parecen ofrecer ventajas al componente principal del sistema de transporte; la otra es que la no consideración de los buses las puede hacer inefectivas hasta para los automóviles. Por cierto, ambas conducen a una misma necesidad: desarrollar técnicas con capacidad de tratar corrientes vehiculares heterogéneas que interactúan.

Ciertamente, el futuro pertenece a los sistemas dinámicos; sus ventajas potenciales son múltiples y trascienden a la operación de los semáforos. La recomendación que surge de este trabajo es dedicar esfuerzos de investigación en la línea indicada, crucial para países como el nuestro.

Otra recomendación es continuar el seguimiento de la zona estudiada con mejores condiciones de implementación, antes de continuar extendiendo el área bajo control dinámico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración y el estímulo que el Departamento del Tránsito y Transporte Públicos de la Municipalidad de Santiago les brindó en la preparación y desarrollo del experimento. Asimismo, al personal de AUTER, DICTUC e INTRAT que participó en él. Obviamente, la responsabilidad por los resultados, y los errores que en ellos pueda haber, es de los autores.

REFERENCIAS

- CITRA (1983) Impactos del proyecto Plaza Baquedano sobre esquemas de operación del centro. Informe final a la Ilustre Municipalidad de Santiago.
- GIBSON, J. (1985) Consecuencias prácticas de un nuevo modelo de dispersión del tráfico. Actas del Segundo Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, Universidad Católica de Chile, 12-14 Noviembre 1985, Santiago.
- GIBSON, J., JARA-DIAZ, S.R. y DIAZ, R. (1984) Predicción de la velocidad media a partir de flujos agregados en vías urbanas. Actas del Primer Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, Universidad de Chile, 7-9 Mayo 1984, Santiago.
- GIBSON, J., SAAVEDRA, A. y SPOERER, J.P. (1982) Experiencias de la implementación de un sistema de control de área de tráfico en Santiago de Chile. Memorias del Segundo Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte, Universidad del Cauca, 8-12 Noviembre 1982, Pöpayán.
- HOLROYD, J. (1972) Comparison between a dynamic signal plan generation system of area traffic control and a fixed-time system. Report LR 487, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.
- HUNT, P.B., ROBERTSON, D.I., BRETHERTON, R.D. y WINTON, R.I. (1981) SCOOT: a traffic responsive method of coordinating signals. Report LR 1014, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.
- MUNICIPALIDAD DE SANTIAGO (1982) Manual de información del sistema PRV. Departamento del Tránsito y Transporte Públicos, Santiago.
- NIE, N.H. et.al. (1975). SPSS: Statistical Package for the Social Sciences. Mc Graw Hill.
- ROSS, P. (1987) Aplicación de un sistema de control dinámico de tránsito en el área céntrica de Santiago. Memoria de título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de Chile, Santiago.
- VINCENT, R.A., MITCHELL, A.I. y ROBERTSON, D.I. (1980) User guide to TRANSYT version 8. Report LR 888, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.

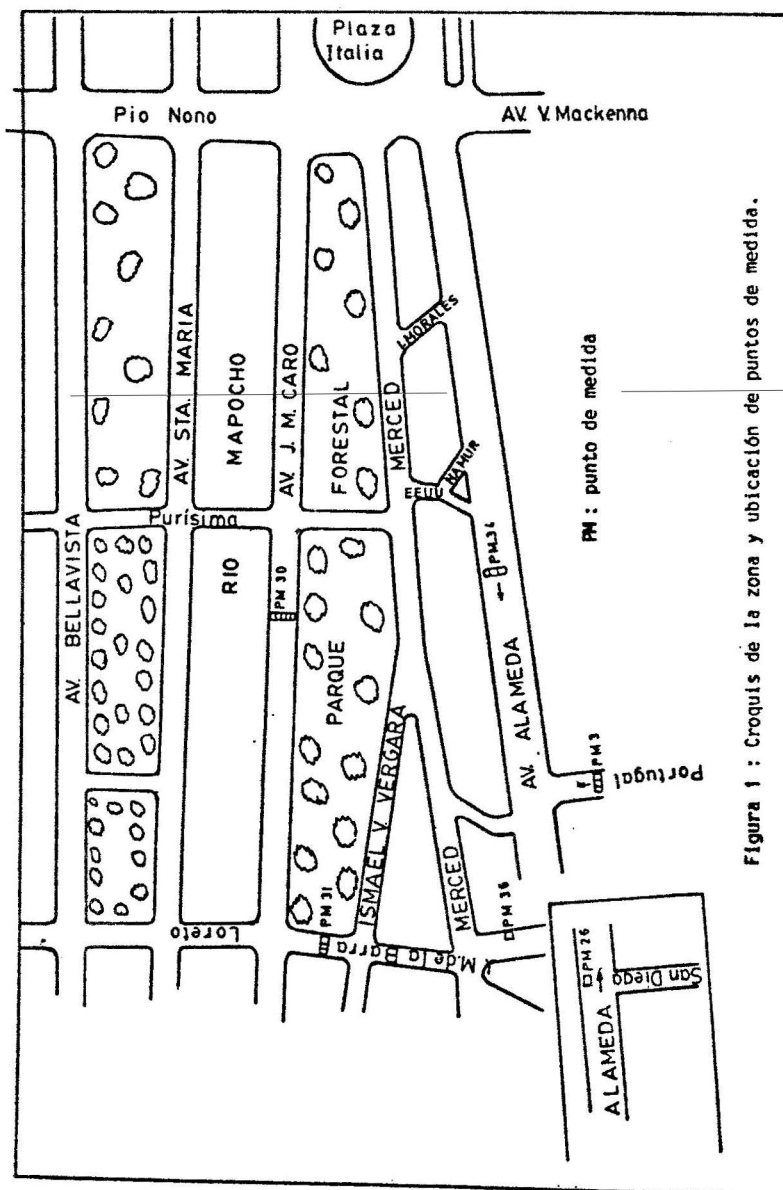


Figura 1 : Croquis de la zona y ubicación de puntos de medida.

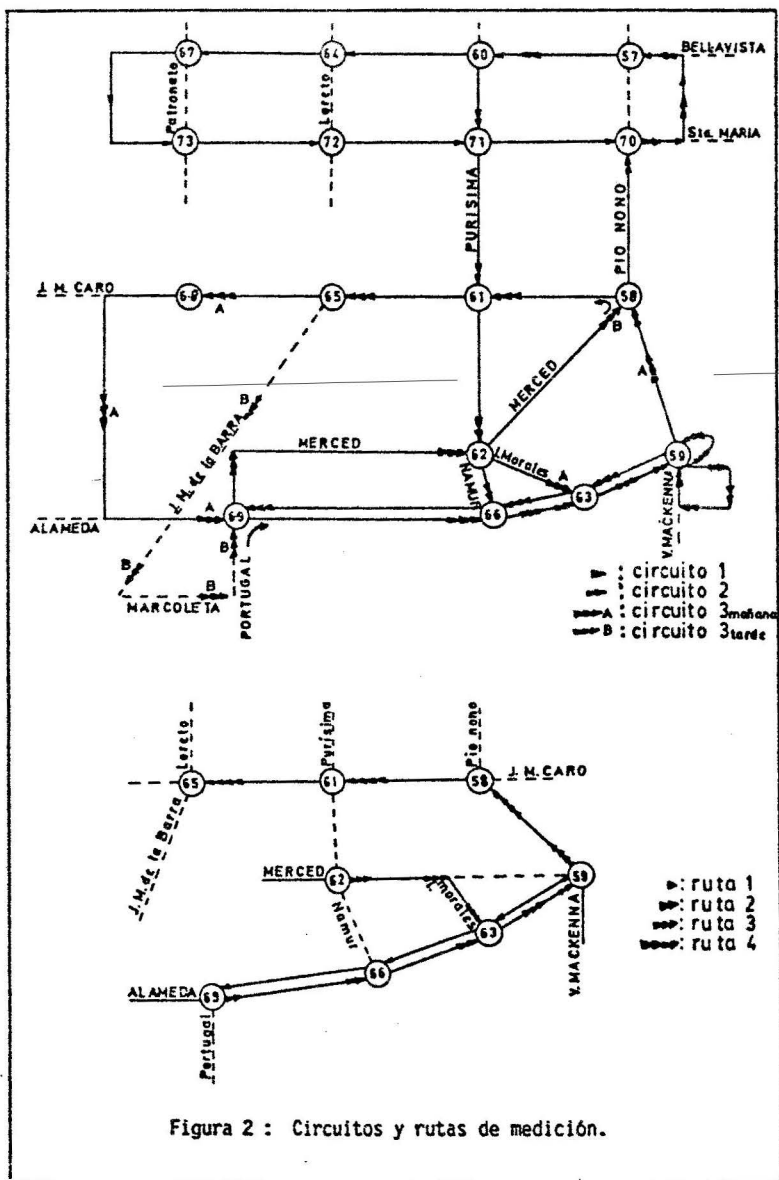


Figura 2 : Circuitos y rutas de medición.

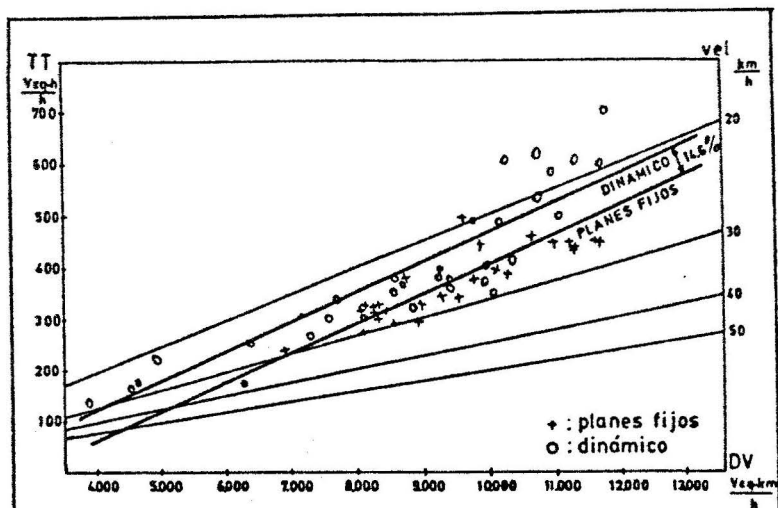


Figura 3: Regresiones para total vehículos livianos en la mañana.

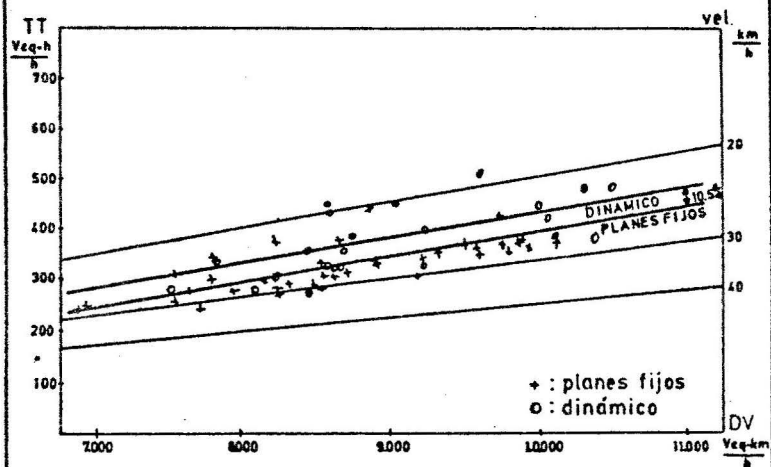


Figura 4 : Regresiones para total vehículos livianos en la tarde.