

## **APLICACIÓN SIMPLIFICADA DE MODELOS DE GENERACIÓN DE VIAJES PARA CIUDADES DE MENOR TAMAÑO**

Paola García Toro, Natalia Akiki Hasbún, Ricardo Briones  
Sectra Área Sur  
Anibal Pinto 443, 4to Piso  
Fax: (56-41) 741285  
Email: pgarciatoro@sectra.cl, nakiki@sectra.cl, rbriones@sectra.cl

### **RESUMEN**

La experiencia en las ciudades de tamaño intermedio en que se desarrollaron estudios estratégicos del Sistema de Transporte Urbano (STU) ha demostrado que un enfoque integral que considera la interrelación entre el sistema de transporte y el sistema de actividades, es mucho más apropiado para abordar el mejoramiento de los STU que la formulación de estudios aislados. En ciudades de tamaño intermedio, de entre 100.000 y 500.000 habitantes, el modelo de transporte utilizado corresponde al modelo secuencial de cuatro etapas, que el Gobierno de Chile ha implementado en una plataforma computacional denominada Vivaldi.

La implementación del modelo secuencial requiere de un gran volumen de información, especialmente en la formulación de los modelos de demanda, porque éstos requieren de datos más específicos de obtener. Habitualmente, la principal fuente de información proviene de la Encuesta Origen Destino de Viajes (EOD) realizada en hogares. La realización de una EOD conlleva importantes requerimientos monetarios y de tiempo.

Actualmente, SECTRA-Mideplan está desarrollando una metodología simplificada que permita la implementación del Modelo Secuencial en ciudades de menor tamaño, alrededor de 50.000 habitantes, sin la realización de una EOD de hogares.

En particular este artículo se enfoca en la aplicación de tasas ACM calibradas para la ciudad de Linares, en la ciudad de Angol.

Los resultados obtenidos entregan diferencias menores entre los viajes modelados, a través de esta homologación, versus los observados en una EOD independiente realizada en la ciudad de Angol.

## 1. INTRODUCCIÓN

La experiencia en las ciudades de tamaño intermedio en que se desarrollaron estudios estratégicos del Sistema de Transporte Urbano (STU), ha demostrado que un enfoque integral (SECTRA, 2002), que se extiende a la red vial básica de toda la ciudad y considera la interrelación entre el sistema de transporte y el sistema de actividades, es mucho más apropiado para abordar el mejoramiento de los STU que la formulación de estudios aislados, dirigidos a resolver problemas individuales.

Sin embargo, es preciso notar que la metodología empleada hasta ahora fue diseñada para ciudades con una población del orden de 100.000 habitantes. Por esta razón, también interesa la formulación de una metodología simplificada para abordar el estudio de ciudades con población del orden de los 50.000 habitantes como es el caso de Angol, que no requiera de la realización de una EOD a Hogares. La no realización de ésta última genera importantes ahorros monetarios y de tiempo en la implementación del Modelo Secuencial.

Este trabajo se centra en la aplicación de tasas ACM (Stopher y McDonald, 1983), calibradas para otras ciudades, a ciudades de características socioeconómicas y de sistema de actividades similares, en las cuales no se ha realizado una EODH, de manera tal de obtener el total de viajes generados basados en el hogar de ida, a partir del número total hogares por zona de estudio.

Los resultados muestran la factibilidad de utilizar las tasas ACM, calibradas para otras ciudades, a ciudades de características similares. En el período punta mañana se determinó diferencias menores al 5% entre el total de viajes observados y modelados.

El artículo se ha organizado de la siguiente forma: la sección siguiente presenta el marco general de la aplicación del Modelo Secuencial en ciudades de tamaño medio. En la tercera sección se presenta la metodología para la estimación de los viajes basados en el hogar de los modelos de generación. En la cuarta sección contiene los aspectos relacionados con la aplicación y los resultados; mientras que en el último capítulo se reportan las principales conclusiones y análisis.

## 2. MODELO SECUENCIAL DE TRANSPORTE

El modelo clásico de transporte está compuesto por cuatro submodelos que reflejan las distintas etapas de demanda y oferta de transporte: generación/atracción de viajes, distribución de viajes y partición modal, que conforman la demanda de transporte, y la etapa de asignación corresponde a la oferta de transporte. A partir de esta definición básica, existen dos formas de modelar las interacciones entre demanda y oferta de transporte. La primera de ellas corresponde al denominado Modelo Secuencial, que resuelve secuencialmente cada una de las etapas del modelo clásico de transporte. El segundo enfoque corresponde, al Modelo de Equilibrio, que resuelve simultáneamente las etapas de demanda y oferta de transporte.

El tipo de modelo a utilizar en el análisis de un sistema de transporte urbano determinado, depende fundamentalmente de las características operacionales de dicho sistema, medidas principalmente en términos de la congestión sobre la red vial. Este artículo está enfocado en la aplicación de Modelo Secuencial en una ciudad de menor tamaño, por lo cual todo el marco



teórico presentado es propio de una ciudad de tamaño medio, sin problemas generales de congestión.

La operación del modelo de transporte requiere como datos de entrada los vectores origen-destino de viajes para cada período de análisis, clasificados por propósitos de viaje y por categorías de demanda. La estimación de tales vectores constituye el objetivo de los modelos de generación/atracción.

El objetivo del modelo de demanda es explicar y predecir las decisiones de los usuarios respecto a la generación. Sin embargo, dependiendo entre otras cosas de sus atributos personales y propósitos de viaje, los usuarios tienen comportamientos diversos, por lo que es necesario categorizar la demanda para permitir su mejor explicación.

Desde el punto de vista de la demanda de transporte, la característica más relevante del usuario es su nivel socioeconómico. Pero dado que es difícil determinar este nivel para cada usuario en particular, en lugar de clasificar a los individuos, normalmente se categorizan los hogares que habitan. Cada hogar tiene asociado un cierto ingreso familiar y una cierta tasa de motorización, variables que son utilizadas para categorizar los hogares y, por extensión a los individuos que viven en él.

Se estima que una categorización adecuada de los hogares, para el caso de ciudades intermedias, debe considerar al menos tres niveles de ingreso (ingreso bajo, medio y alto) y tres niveles de tasa de motorización del hogar (sin vehículo, con un vehículo, con dos o más vehículos).

Dado que el comportamiento de los usuarios puede ser notablemente distinto para cada motivo de viaje, se realiza una estratificación de la demanda a nivel de propósitos de viaje. Los principales propósitos de viaje son tres: trabajo, estudio y otros.

Los modelos de generación y atracción de viajes se pueden desagregar en viajes basados en el hogar de ida, basados en el hogar de retorno o no basados en el hogar. Los primeros son estimados mediante modelos de análisis de clasificación múltiple (ACM), en tanto que para los otros se utilizan modelos de regresión lineal múltiple (RLM).

### 3. GENERACIÓN DE VIAJES BASADOS EN EL HOGAR DE IDA (BHI)

Para los viajes originados en el hogar, la metodología más utilizada confía en la determinación de tasas de generación de viajes por hogar y en el conocimiento del número de hogares en una determinada zona. De acuerdo a la estratificación de la demanda, dichas tasas deben ser conocidas dentro de cada período de análisis, para cada propósito de viaje y categoría del hogar.

$$O_{i(bhi)}^{pn} = H_i^n * t^{pn} \quad (1)$$

donde:

$O_{i(bhi)}^{pn}$  = Número de viajes con propósito p generados por los hogares de la categoría n de la zona i.

$H_i^n$  = Número de hogares de la categoría n en la zona i.

$t^{pn}$  = Tasa de generación de viajes con propósito p de los hogares de la categoría n.

El número de hogares por categoría en cada zona se determina partir de información socioeconómica independiente; normalmente del Censo Poblacional u otros catastros urbanos.

Para determinar las tasas de generación de viajes para cada categoría de hogar y propósito, existen diversos modelos, desatacándose el de análisis por categorías y el de análisis de clasificación múltiple (ACM). En el caso de éste último, se ha demostrado que es útil para calcular tasas de generación de viajes y, además, permite superar casi todas las falencias del análisis por categoría tradicional. La aplicación práctica del método ACM es sencilla y consta de tres pasos fundamentales:

i ) Estimar una media general para el valor de la variable dependiente (en este caso, tasa de generación de viajes) usando la muestra completa de hogares disponible.

ii) Estimar una media de grupo para cada nivel de estratificación de cada variable independiente (en este caso, ingreso y tasa de motorización) sin considerar las divisiones según niveles de las otras variables independientes.

iii) Finalmente, calcular la tasa de generación de cada categoría cruzada (cruce de niveles de las variables independientes), corrigiendo el valor de la media global, según las desviaciones que con respecto a ella presenten las medias de grupo de los niveles de cada variable que definen la categoría.

$$\begin{aligned} X_{ij}^* &= \langle X \rangle + (X_{i.} - \langle X \rangle) + (X_{.j} - \langle X \rangle) \\ X_{ij}^* &= X_{i.} + X_{.j} - \langle X \rangle \end{aligned} \quad (2)$$

donde:

$\langle X \rangle$  = Promedio global de las observaciones.

$X_{i.}$  = Promedio de la variable dependiente respecto al i-ésimo nivel de la primera variable explicativa.

$X_{.j}$  = Promedio de la variable dependiente respecto al j-ésimo nivel de la primera variable explicativa.

$X_{ij}^*$  = Valor predicho mediante ACM para la variable explicada.

El método ACM permite realizar análisis estadísticos respecto a la validez y significancia de cada variable incluida en la categorización considerada.



## 4. APLICACIÓN

En el marco del estudio “Análisis del Sistema de Transporte Urbano de la ciudad de Angol” (SECTRA, 2005), actualmente en desarrollo, se está definiendo una metodología que utilice la abundante información y experiencia acumulada en los estudios de ciudades intermedias que SECTRA ha realizado anteriormente, respecto de las características de los viajes y la población, con las adaptaciones del caso, para así dotar a la ciudad de una herramienta flexible para la evaluación de proyectos y políticas de transporte.

Cómo se mencionó con anterioridad, el modelo ACM requiere conocer el número de hogares por categoría en cada zona. Habitualmente, en las ciudades con una población del orden de 100.000 habitantes o más, esta información es extraída de las Encuestas Origen Destino de Hogares (EODH).

Sin embargo, considerando los recursos tanto monetarios, como de tiempo que esta última tarea involucra y que los modelos de demanda calibrados han mostrado ser comparables entre una ciudad y otra, este artículo tiene como fin presentar los primeros resultados en relación a la aplicación de tasas ACM, obtenidas de estudios realizados en otras ciudades, a la información del número de hogares por categoría en cada zona, en ciudades de menor tamaño, con el fin de obtener el total de viajes generados en el hogar de ida (bhi), los cuales representan alrededor del 90% del total de los viajes generados en la punta mañana en las ciudades de tamaño medio. (SECTRA, 2000)

### 4.1 Área Estudio

La comuna de Angol, ubicada en la IX Región, cuenta con una población urbana de 43.801 habitantes, según el censo del año 2002. En la última década experimentó un moderado crecimiento de su población, que se refleja en una variación intercensal del 6%. Angol se localiza 128 Km. al norte de la ciudad de Temuco y posee una superficie de 1.194, 4 Km<sup>2</sup>.

En lo que se refiere a las características socioeconómica de la población, de acuerdo a los resultados de la encuesta CASEN 2000 (Mideplan, 2000), el promedio de ingreso mensual de los hogares correspondió a \$ 279.111.

La comuna de Angol ha basado su desarrollo y crecimiento económico social hacia la explotación de recursos primarios: agricultura, ganadería y silvicultura. En torno a estas actividades principales, han surgido actividades complementarias como el comercio, el transporte, las finanzas y los servicios. Estos últimos, de acuerdo a las tendencias intercensales, han tenido un aumento, mientras las actividades extractivas primarias han disminuido.

### 4.2 Estudios de Base y Caracterización Socioeconómica

Con el fin de validar la aplicación a la ciudad de Angol de modelos de generación/atracción desarrollados para otras ciudades, se realizó una EOD a un total de 376 hogares válidos, lo que corresponde a cerca de un 3% de los hogares de la ciudad (SECTRA, 2004). Es necesario destacar que la metodología para ciudades intermedias recomienda un mínimo de 1500 encuestas válidas (SECTRA, 1997).

En una primera etapa se realizó una comparación de las características socioeconómicas y demográficas de la ciudad de Angol, con diversas ciudades en las cuales ya se encuentra implementado el modelo secuencial de transporte. A partir de los análisis realizados, se llegó a la conclusión de que la ciudad de Linares es la que se asemeja en población y actividad socioeconómica a Angol.

La comuna de Linares, ubicada en la VII Región, cuenta con una población urbana de 68.224 habitantes según, el censo del año 2002. Ésta se localiza 53 Km. al sur de la ciudad de Talca y posee una superficie de 1.465, 7 Km<sup>2</sup>. La ciudad de Linares ha basado su desarrollo y crecimiento económico social hacia la explotación de recursos primarios: agricultura, ganadería, silvoagropecuaria y silvicultura, entre otros.

En lo que se refiere a las características socioeconómica de la población, de acuerdo a los resultados de la encuesta CASEN 2000 (Mideplan, 2000), el promedio de ingreso mensual de los hogares correspondió a \$ 323.833.

A continuación se presenta un cuadro comparativo de las principales características socioeconómicas de ambas ciudades.

**Tabla 1: Características Socioeconómicas**

	Habitantes	Hogares	Vehículos	Bicicletas	TMH (Hab/Hog)	TMOT (Veh/Hog)	TBIC (Bic/Hog)
Angol	43.801	11.938	3.088	6.776	3,67	0,26	0,57
Linares	68.224	18.995	5.807	12.100	3,59	0,31	0,64

Fuente:INE 2002.

### 4.3 Estratificación de Hogares

El modelo ACM requiere conocer el número de hogares para cada categoría de demanda, que estarán condicionadas por los modelos existentes, tanto en la definición de propósitos de viaje como la estratificación de la población (tres niveles de ingreso y tres niveles de motorización).

A partir de la EOD de hogares realizada en Angol y tomando como base la información de ingresos medios por hogar reportada por la encuesta CASEN, y las características socioeconómicas antes citadas, se determinó los rangos de ingresos para cada nivel, homologando los porcentajes obtenidos para la ciudad de Linares.

En el caso de no contar con una EOD, objetivo principal de la metodología simplificada, el número de hogares por categoría de demandas se puede obtener a partir de la información socioeconómica reportada en el último censo, categorizando los hogares en tres niveles de ingreso a partir de diversas variables, tales como: tenencia de computador, congelador, automóvil, disponibilidad de TV cable, nivel educacional del jefe de hogar, entre otras. (SECTRA, 2001)



**Tabla 2: Porcentajes según Categoría**

	Ingreso			Tasa de Motorización		
	Bajo	Medio	Alto	Sin Veh	1 Veh.	2 o más Veh
Angol	52%	43%	5%	72%	24%	4%
Linares	55%	39%	6%	68%	27%	4%

Nota: los porcentajes no son idénticos dado que la información de ingresos es discreta.

**Tabla 3: Número de Hogares por Categoría (Angol)**

Ingreso/ Motorización		0	1	2	Total
Bajo	Hasta \$190.000	5.326	809	0	6.135
Medio	\$190.001-\$500.000	2.989	1.822	242	5.052
Alto	\$500.001 o más	116	245	243	604
Total		8.431	2.875	485	11.791

#### 4.4 Estimación de viajes según propósito

Una vez definidos los hogares para cada una de las 9 categorías de demanda se aplicaron las tasas ACM calibradas para la ciudades de Linares, para el período punta mañana, para los propósitos de viaje trabajo, estudio y otros.

**Tabla 4: Tasas ACM por Propósito (Linares)**

Ingreso/Motorización	Trabajo			Estudio			Otros		
	0	1	2	0	1	2	0	1	2
Bajo	0,274	0,407	0,515	0,586	0,744	0,774	0,165	0,351	0,482
Medio	0,551	0,684	0,792	0,739	0,898	0,928	0,217	0,403	0,534
Alto	0,703	0,836	0,945	0,779	0,937	0,967	0,370	0,556	0,688

Fuente: Diagnóstico del Sistema de Transporte Urbano de la Linares, SECTRA (2004)

En la tabla siguiente se presenta el total de viajes por propósito modelados versus los observados, en base a la EODH realizada en Angol.

Es importante señalar que al comparar la participación de viajes según propósito entre ambas ciudades, en el período punta mañana, ésta se mantiene relativamente constante. Este hecho permite la aplicación de tasas estimadas para otras ciudades en localidades de características socioeconómicas y demográficas similares. Lo anterior, debido al hecho de que las tasas ACM se estiman según propósito, y están directamente relacionadas con la cantidad de viajes para cada uno de ellos, así, por ejemplo, en la punta mañana la magnitud de las tasas para el propósito otros es significativamente menor que aquellas del propósito trabajo.

**Tabla 5: BHI período Punta Mañana (Angol)**

Propósito	Viajes Modelados	Viajes Observados EODH Angol	Diferencias (%)
Trabajo	5.386	6.142	12,31%
Estudio	8.345	8.551	2,42%
Otros	3.016	2.872	-5,03%
Total	16.747	17.565	4,66%

**Tabla 6: Porcentajes de Viajes según Propósito**

	Angol	Linares
Trabajo	35,0%	31,87%
Estudio	48,7%	49,76%
Otros	16,3%	18,37%

Fuente: Sectra (2003, 2005)

## 5. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

La aplicación de tasas ACM calibradas para ciudades de menor tamaño, que no cuenten con una EOD de Hogares, permite obtener resultados confiables en magnitudes de viajes para cada uno de los propósitos a modelar.

Si bien la aplicación de tasas ACM en ciudades en las cuales fueron estimadas, asegura un ajuste completo entre total de viajes observados y modelados, a nivel de zonas existe variabilidad entre los viajes observados y modelados. En el caso de la ciudad de Linares se obtuvo indicadores de  $R^2$ , para los propósitos de viajes trabajo, estudio y otros de, 88%, 91% y 82%, respectivamente. Los errores antes mencionados son mayores a los generados por la metodología propuesta.

Al comparar el error entre los viajes observados y modelados, menor a un 5% para el total de los viajes, con la variabilidad de los datos de las mediciones de flujo en un mismo día de un mismo puntos en diversos días de la semana en período de la punta mañana, se puede concluir que el error obtenido es menor que la variabilidad promedio ponderada para conteos entre 300 y 900 veh/hr, la cual alcanza un 13%. Esta variabilidad disminuye al 3% para conteos mayores de 900 veh/hr. (SECTRA, 2002). Ver Figura 1.

Esta última conclusión valida la aplicación realizada, considerando el hecho que la información de mediciones de flujo corresponde al dato de entrada de los modelos de asignación, por lo cual no se estaría incurriendo en una imprecisión mayor a la propia del modelo secuencial.

Posterior a la estimación de los modelos de generación corresponde el desarrollo de los modelos de atracción, calibración de los modelos de partición modal, calibración de los modelos de distribución y de los modelos de asignación de redes.



En el caso de los modelos de atracción se estimarán los  $m^2$  de los distintos usos no residenciales con los cuales, a partir de las RLM obtenidas para la ciudad de Linares, se obtendrán el total de viajes por propósitos, desagregados en viajes no basados en el hogar y en los basados en el hogar de retorno. Finalmente, las atracciones serán normalizadas con las generaciones.

La metodología a aplicar en el caso de los modelos de partición modal y de distribución, para ciudades de menor tamaño, aún se encuentra en desarrollo. Resultados preliminares han demostrado la factibilidad de desarrollar una metodología simplificada, en la cual se aborda la forma de calibrar un modelo de transporte, prescindiendo en gran medida de una encuesta EODH tradicional.

La importancia de la aplicación realizada, radica en el hecho de que durante el período punta mañana aproximadamente el 90% de los viajes son basados en el hogar de ida, por lo cual se explican a través de tasas ACM. Esta situación se presenta en todas las ciudades intermedias estudiadas.

Finalmente, la utilización de tasas ACM estimadas para otras ciudades, produce importantes ahorros monetarios y de tiempo en el proceso de toma de datos, al prescindir de una encuesta EOD a Hogares para la estimación de los vectores orígenes-destino.

## REFERENCIAS

INE 2002. [www.ine.cl](http://www.ine.cl), resultados censo 2002, consultado en mayo 2005.

Mideplan (1997) **Metodología para Análisis de Sistemas de Transporte en Grandes Ciudades y Ciudades de Tamaño Medio**.

Mideplan (2000). [www.mideplan.cl](http://www.mideplan.cl) , resultados encuestas CASEN, consultado en mayo 2005.

SECTRA (1998) **Diagnóstico del Sistema de Transporte Urbano de la Ciudad de Curicó, Etapa I**. Mideplan. Santiago. Elaborado por Trasa Ingenieros Consultores.

SECTRA (2000) **Diagnóstico del Sistema de Transporte Urbano de la Ciudad de Los Angeles, Etapa I**. Mideplan. Santiago. Elaborado por Fernández & de Cea Ingenieros Limitada .

SECTRA (2001) **Actualización de Encuestas Origen Destino, IV Etapa**. Mideplan. Santiago. Elaborado por la Pontifica Universidad Católica de Chile.

SECTRA (2002) **Planes de Desarrollo de los Sistemas de Transporte Urbanos de las Ciudades Intermedias de Chile**. Mideplan. Santiago.

SECTRA (2002) **Análisis Red Vial Básica del Gran Concepción, Etapa I**. Mideplan. Santiago. Elaborado por Fernández & de Cea Ingenieros Limitada.

SECTRA (2003) **Diagnóstico del Sistema de Transporte Urbano de la Ciudad de Linares, Etapa II**. Mideplan. Santiago. Elaborado por Trasa Ingenieros Consultores.

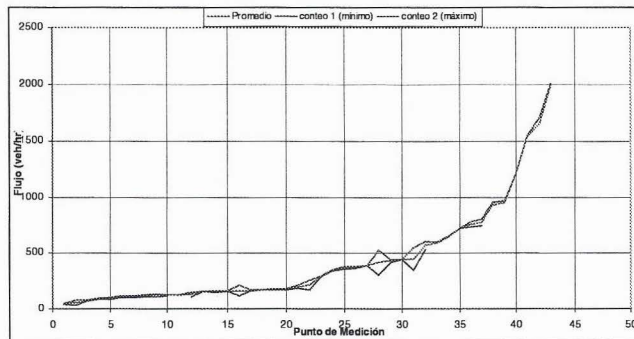
SECTRA (2004) **Diagnóstico del Sistema de Transporte Urbano de la Ciudad de Linares, Etapa I**. Mideplan. Santiago. Elaborado por Cipres Ingeniería Ltda. (en desarrollo).

SECTRA (2005) **Análisis del Sistema de Transporte Urbano de la Ciudad de Angol**. Mideplan. Santiago. Elaborado por Suroeste Consultores (en desarrollo).

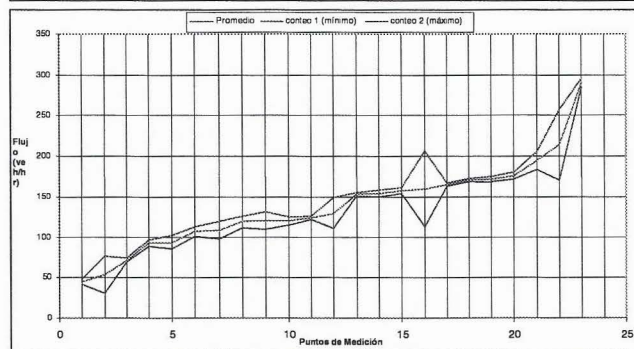
Stopher P. R. y K.G. McDonald. (1983) Trip Generation by Cross – Classification: An Alternative Methodology. **Transportation Research Record** 99, 84-91.



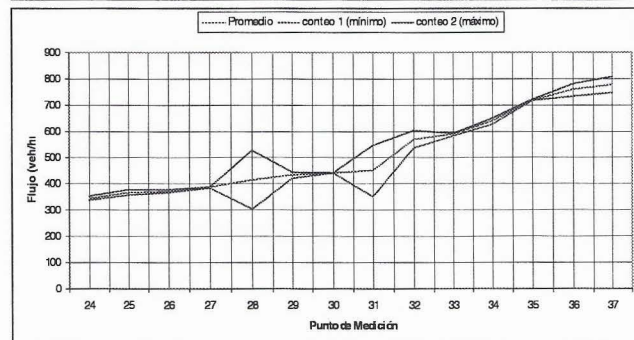
**Todos los Conteos (más de una medición)**  
**Variabilidad promedio ponderada = 10 %**



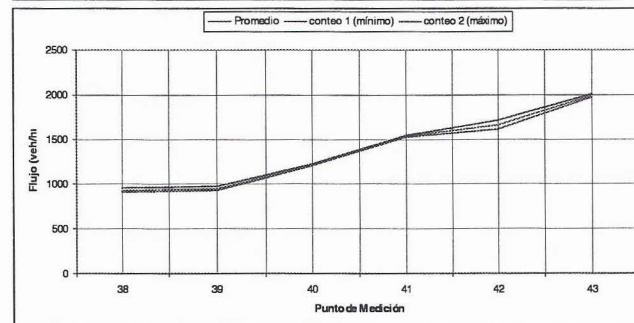
**Conteos < 300 veh/hr**  
**Variabilidad promedio ponderada = 20 %**



**300 veh/hr < Conteos < 900 veh/hr**  
**Variabilidad promedio ponderada = 13 %**



**900 veh/hr < Conteos**  
**Variabilidad promedio ponderada = 3 %**



**Figura 1: Variabilidad de los conteos de punta mañana**  
 Fuente: Análisis Red Vial Básica del Gran Concepción, Etapa I (SECTRA, 2002)