



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA – TRANSPORTE

METODOLOGÍAS DE ASIGNACIÓN DE DEMANDA DE REDES CON OPERACIÓN DE  
VÍAS DE CUOTA

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
DAVID LEONARDO PADILLA GEORNGE

TUTOR PRINCIPAL  
RICARDO ACEVES GARCÍA

MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE 2013

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. JOSÉ JESÚS ACOSTA FLORES

Secretario: DR. JAVIER SUÁREZ ROCHA

Vocal: DR. RICARDO ACEVES GARCÍA

1<sup>er</sup>. Suplente: M. EN I. ARTURO FUENTES ZENÓN

2<sup>d</sup> o. Suplente: M. EN I. JOSÉ ANTONIO RIVERA COLMENERO

Ciudad de México, Distrito Federal.

**TUTOR DE TESIS:**

RICARDO ACEVES GARCÍA

-----  
**FIRMA**

## Dedicatorias

- *Quiero dedicar este trabajo de tesis a mi esposa Diana, quien ha sido un apoyo definitivo para la consecución de esta importante meta profesional.*
- *Así mismo, a todas aquellas personas que me distinguen con su aprecio y reconocimiento.*
- *Deseo también agradecer a mi Alma Mater, la UNAM, institución que me ha forjado como profesionalista.*

## Contenido

---

1	Introducción .....	4
1.1	Objetivo general .....	4
1.2	Objetivos particulares .....	4
1.3	Presentación del contenido .....	4
1.4	Planteamiento del problema .....	9
1.5	Justificación .....	11
2	Integración de un modelo de oferta mediante el concepto de redes .....	12
2.1	Zonificación .....	12
2.1.1	Compatibilidad con la división política.....	12
2.1.2	Tamaño de las zonas. ....	12
2.1.3	Homogeneidad.....	13
2.1.4	Compatibilidad con otros estudios. ....	13
2.1.5	Límites .....	13
2.2	Red de transporte .....	14
2.2.1	Propiedades de los arcos.....	14
2.2.2	Costos en la red.....	15
2.3	Tipos de vías concesionadas .....	15
2.3.1	Autopistas interurbanas .....	15
2.3.2	Libramientos.....	16
2.3.3	Puentes Internacionales y Túneles.....	16
2.3.4	Autopistas urbanas o suburbanas .....	16
2.4	Funciones volumen-demora .....	18
2.4.1	Características deseables de una función volumen-demora .....	18
2.4.2	Función BPR.....	19
2.4.3	Función cónica.....	21
2.4.4	Función Davidson modificada .....	24
2.4.5	Función de demora de Webster y Akcelik.....	25
3	Determinación de la demanda mediante el método de levantamiento de información de campo y medición de flujos. ....	26
3.1	Concepto de demanda .....	26
3.2	Demanda en redes autopistas de cuota.....	26

3.2.1	Periodos de modelación.....	26
3.2.2	Horizontes de modelación .....	27
3.3	Aplicación de Encuestas de Origen-Destino.....	27
3.3.1	Tamaño de la muestra.....	28
3.4	Medición de volúmenes .....	29
3.5	Obtención de las matrices de viaje .....	30
3.5.1	Revisión y validación de la muestra de origen-destino.....	31
3.5.2	Codificación de la muestra .....	31
3.5.3	Expansión de la muestra .....	31
3.5.4	Ajustes al cálculo del TDPA cuando se recaba información por más de un día.....	33
3.5.5	Eliminación de duplicidades.....	33
4	Modelo de captación.....	35
4.1	Modelos de Elección Discreta .....	35
4.2	Estimación del Valor Subjetivo del Tiempo.....	37
4.3	Preferencia Declarada .....	38
4.4	Preparación de datos .....	40
4.4.1	Formato de datos .....	40
4.4.2	Especificación del modelo .....	41
4.4.3	Ejecución de la aplicación .....	43
4.5	Obtención de estadísticos e indicadores .....	43
4.5.1	Verosimilitud (Likelihood) .....	43
4.5.2	Log verosimilitud nula (Null log likelihood).....	44
4.5.3	Log verosimilitud constante (Constant log likelihood).....	44
4.5.4	Parámetro de relación de verosimilitudes (Likelihood ratio test) .....	44
4.5.5	Máxima verosimilitud nula y constante .....	45
4.5.6	Parámetros de utilidad .....	46
4.5.7	Funciones de utilidad .....	46
4.5.8	Covarianza y correlación entre coeficientes .....	47
5	Asignación de demanda a través del método de selección de ruta por costo generalizado....	48
5.1	Fundamento .....	48
5.2	Segmentación de la demanda .....	49
5.2.1	Automóviles .....	49
5.2.2	Camiones.....	50
5.2.3	Autobuses.....	50

5.3	Calibración del modelo.....	51
5.3.1	Dispersión de volúmenes .....	51
5.3.2	Calibración por el indicador GEH .....	52
5.3.3	Calibración por raíz cuadrada del error cuadrático porcentual .....	53
6	Asignación de demanda a través del método de selección explícita de vías de cuota.....	54
6.1	Fundamento .....	54
6.2	Algoritmo de solución .....	58
7	Aplicación a un caso en México .....	59
7.1	Libramiento Norponiente de Irapuato.....	59
7.2	Información recopilada .....	60
7.2.1	Componente de oferta .....	60
7.2.2	Zonificación .....	62
7.2.3	Componente de demanda.....	63
7.3	Calibración del modelo de transporte .....	65
7.4	Valor Subjetivo del Tiempo por clase.....	68
7.5	Asignación por costo generalizado .....	68
7.5.1	Estimación de vehículos captados.....	69
7.5.2	Estimación de la demanda potencial .....	70
7.5.3	Análisis de resultados.....	72
7.6	Asignación por selección explícita de vías de cuota.....	74
7.6.1	Algoritmo de solución .....	74
7.6.2	Resultados .....	75
7.6.3	Evaluación de los resultados .....	78
8	Conclusiones .....	79
9	Bibliografía .....	80

# 1 Introducción

---

## 1.1 Objetivo general

Estudiar el Modelo de Asignación basado en Selección Explícita de Vías de Cuota como alternativa para reducir la incertidumbre en el cálculo de la demanda asignada a infraestructura concesionada de cuota.

## 1.2 Objetivos particulares

- Revisar los requerimientos de información de campo y documentales.
- Determinar las mejores prácticas para la integración del modelo de transporte
- Hacer un estudio de caso para una vía de cuota en México.

## 1.3 Presentación del contenido

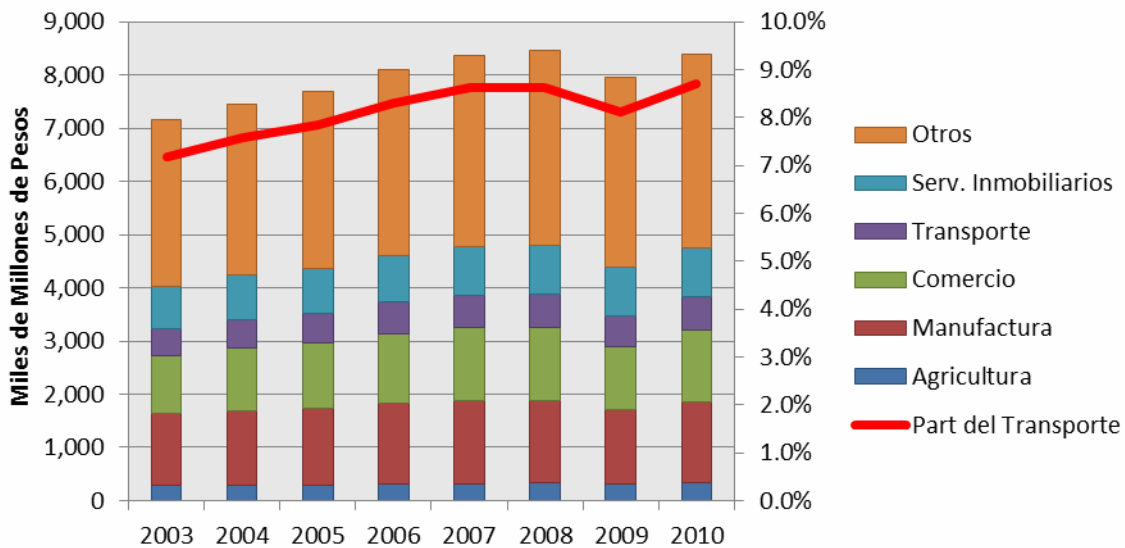
El presente trabajo de tesis está organizado de la siguiente manera:

- El capítulo 2 enuncia los conceptos fundamentales para integrar el modelo de oferta en términos de zonificación y red vial.
- El capítulo 3 analiza el tema de la conceptualización de la demanda de un sistema de transporte mediante la aplicación de Encuestas de Origen-Destino, toma de aforos vehiculares, así como su interpretación como matrices de viaje. Se revisarán los aspectos básicos para hacer la segmentación de la demanda a través de distintos usuarios, contemplando aspectos como nivel de ingreso, motivo de viaje y frecuencia.
- El capítulo 4 aborda el estudio del valor del tiempo, concepto básico para determinar la disponibilidad al pago de peajes y que al final de cuentas determina la captación de una vía de cuota. Se revisan las mejores prácticas para el levantamiento de la Encuesta de Preferencia Declarada y el análisis de sus resultados.
- Los capítulos 5 y 6 comparan un método de asignación habitual en la obtención de la captación de una vía de cuota y el método de selección explícita de vías. Se revisan las ventajas y desventajas de cada método y su aplicabilidad.
- En el capítulo 7 se analiza un estudio de caso comparando sus resultados con los valores reales de captación.

El estudio de vías de cuota desde la perspectiva económica es parte del conjunto de actividades que están englobadas dentro de los estudios de transporte, entendido como un conjunto de actividades que permiten el desplazamiento de mercancías e individuos de un lugar a otro.

Los dos usuarios del transporte son personas y mercancías. En el primer caso el movimiento de personas en una localidad, en una ciudad, entre ciudades, entre países es una actividad cotidiana e indispensable para el funcionamiento de la economía a cualquier escala. El movimiento de mercancías es también una actividad esencial y complementaria para el desarrollo económico. Su ámbito es tan amplio que está íntimamente ligado a todos los sectores de la economía: sector agrícola, industrial y de servicios, así como sus diversas y variadas ramificaciones. Es inconcebible pensar en el funcionamiento de un país sin la existencia del transporte.

Gráfica 1. Producto Interno Bruto de México por actividad económica



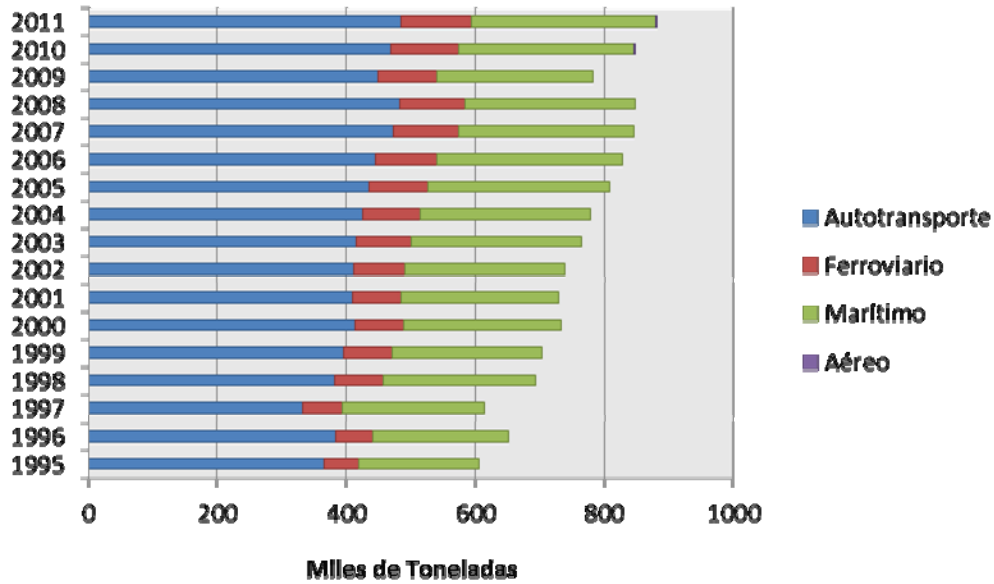
Fuente: INEGI. Sistema de cuentas nacionales de México  
Miles de Millones de pesos a precios de 2003

Las actividades asociadas al transporte y almacenaje representaron el 8.7% del Producto Interno Bruto nacional del año 2010. En la gráfica anterior es posible constatar que su presencia ha ganado participación frente a otras actividades.

El transporte como actividad económica es muy variada y heterogénea, por lo que resulta imposible abordarlo con reglas generales o esquemas comunes de análisis, por ende, resulta indispensable abordar su estudio y análisis mediante el concepto de modos de acuerdo con el medio empleado para su realización. Desde esta perspectiva los modos existentes son aéreo, terrestre y marítimo. La relevancia de cada modo dependerá de la geografía y economía de cada país. En el caso de México, tanto en carga como en pasajeros, el autotransporte participa mayoritariamente.

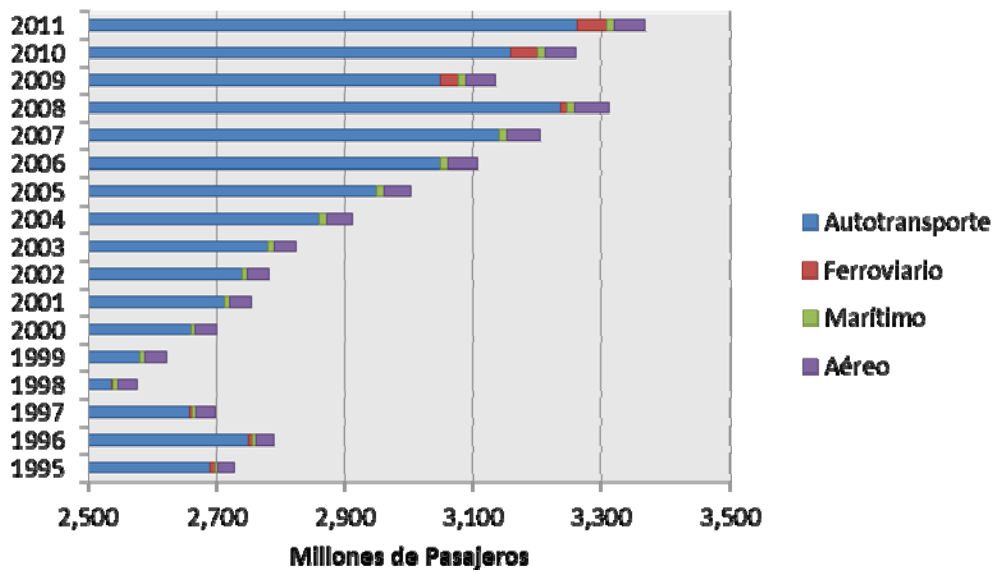


Gráfica 2. Movilización de carga por modo de transporte



Fuente: SCT. Dirección General de Autotransporte Federal

Gráfica 3. Movilización de pasajeros por modo de transporte



Fuente: SCT. Dirección General de Autotransporte Federal

Usualmente una nueva vía de cuota ofrece menores tiempos de viaje, entonces dado el valor del tiempo para los diferentes tipos de usuario, su utilización se predice mediante una estimación de la proporción de usuarios dispuestos a pagar un costo o peaje a cambio de menores tiempos de viaje.

La construcción de vías de cuota en México ha contribuido a reafirmar al sector carretero como principal medio de movilidad en el sistema de transporte nacional.

Las tendencias demográficas, el crecimiento de la economía y del ingreso hacen patente la necesidad de contar con servicios de transporte cada vez más eficientes y confiables en todo el territorio, por lo que es previsible que la demanda nacional de transporte por carretera seguirá creciendo en todas las regiones del país.

La red federal de carreteras es atendida en su totalidad por el gobierno federal. Registra la mayor parte de los desplazamientos de pasajeros y carga entre ciudades y canaliza buena parte de los recorridos de largo itinerario, los relacionados con el comercio exterior y los producidos por los sectores más dinámicos de la economía nacional. Las redes estatales cumplen una función de gran relevancia para la comunicación regional, para enlazar las zonas de producción agrícola y ganadera y para asegurar la integración de extensas áreas en diversas regiones del país.

Por su parte, los caminos rurales y las brechas mejoradas son vías modestas y en general no pavimentadas; su valor es más social que económico, pues proporcionan acceso a comunidades pequeñas que de otra manera estarían aisladas. Sin embargo, su efecto en las actividades y la calidad de vida de esas mismas comunidades es de gran trascendencia, pues permiten el acceso de estas comunidades a los servicios de educación, gobierno, salud y de labor.

Si bien la red carretera posee una importancia de primer orden para nuestro país, pues permite la mayor parte de los desplazamientos que tienen lugar en el territorio, aún presenta limitaciones presupuestales lo que incide en el hecho de que México posea una densidad carretera (es decir, la longitud de carreteras por kilómetro cuadrado de territorio) relativamente baja, como lo ilustra el cuadro que sigue.

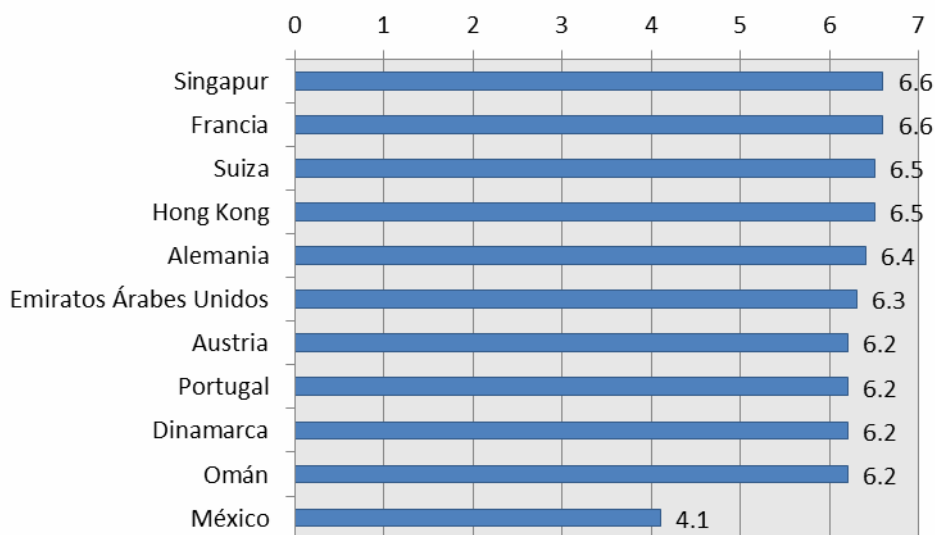
**Tabla 1. Densidad de carreteras a nivel mundial (Año 2010)**

Kilómetros de carreteras por km <sup>2</sup> de territorio								
México	EUA	Canadá	Francia	Alemania	Hong Kong	Japón	Singapur	Chile
0.19	0.67	0.14	1.73	1.80	1.88	3.20	4.73	0.10

Fuente: Banco Mundial

En términos de calidad de la infraestructura de caminos, de acuerdo con el Reporte Global de Competitividad 2010-2011, México se ubica en la posición 62 a nivel mundial.

Gráfica 4. Calidad de infraestructura carretera



Nota: [7 = Extremadamente Desarrollado, 1 = Extremadamente Ineficiente]. Con base en normativa internacional  
 Fuente: Reporte Global de Competitividad 2010-2011

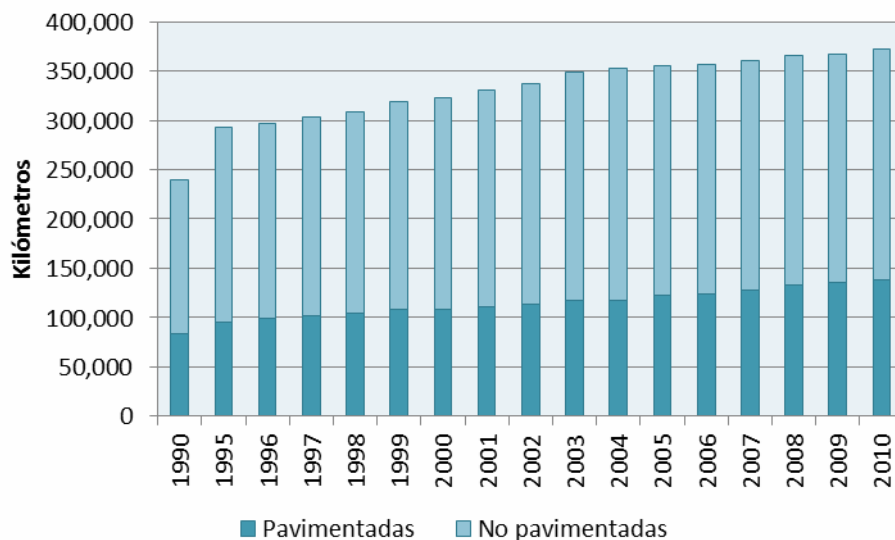
Para responder a esta necesidad, las recientes administraciones han buscado expandir la cobertura de todo tipo de vialidades, incluidas las de cuota, mediante nuevos esquemas de administración, operación y cobro de peajes. Dadas las limitaciones presupuestales que habitualmente se presentan cada vez es más importante diseñar e instrumentar mecanismos financieros de obras carreteras que, con la participación del sector privado y de gobiernos estatales y municipales, permitan aumentar los montos disponibles para inversión en carreteras y acelerar la puesta en operación de importantes proyectos en todo el país.

El reto que se plantea para las vías de cuota consiste en consolidar su funcionamiento, homogeneizar sus condiciones de servicio, expandir y extender su cobertura y sentar las bases para su pleno aprovechamiento como un activo productivo de importancia estratégica para la vida nacional.

Uno de los aspectos más relevantes dentro de la planeación de una vía de cuota es conocer con certidumbre los pronósticos de demanda con el fin de garantizar la asignación de recursos para nuevos proyectos ante las entidades financieras relacionadas con el concesionamiento de este tipo de infraestructura. Esto permitirá diseñar concesiones de infraestructura de cuota con mayores beneficios para sus usuarios y a un menor costo para los gobiernos.

La evolución histórica en los recientes años de la red nacional ha mostrado un crecimiento global del 2.2% anual desde 1990 hasta 2010. En ese mismo periodo los caminos pavimentados crecieron al 2.5% anual y los no pavimentados al 2.1% anual.

Gráfica 5. Evolución carretera en México



Fuente: Estadísticas de Transporte de América del Norte

## 1.4 Planteamiento del problema

La búsqueda y análisis de mejores métodos para determinar la demanda asignada de una nueva infraestructura carretera de cuota tiene por objeto evaluar la bondad de un proyecto de esta naturaleza tanto en términos de beneficio social y económico para la comunidad a la cual servirán, así como en términos financieros para los operadores, sean estos públicos o privados.

La certidumbre de estimar el posible aforo vehicular que tendrá la nueva infraestructura permite además jerarquizar las inversiones y comparar estos proyectos frente a otras alternativas. Sin embargo, no basta con conocer el probable aforo al inicio de la operación del proyecto, sino también la forma en cómo evolucionará a través del tiempo.

Sobrestimar la demanda asignada a un proyecto de esta naturaleza tiene implicaciones en diversos ámbitos. Para la comunidad podría representar un daño en términos de una inversión mal aplicada en donde los recursos invertidos podrían no representar los beneficios socioeconómicos esperados. Para el gobierno o la entidad privada que lo construya implica una inversión en un bien que no será financieramente sustentable, además de que será un bien oneroso y de poca utilidad. De igual manera, una estimación hacia la baja de la demanda asignada, aunque aparentemente podría ser beneficiosa para el operador, podría convertirse en una inversión mal aplicada, pues representaría una infraestructura insuficiente en términos de oferta vial, lo que implicaría el requerimiento de inversiones para aumentar la capacidad instalada, mayores montos en mantenimientos intermedios y mayores, y probablemente en la incapacidad de ofertar un adecuado nivel de servicio.

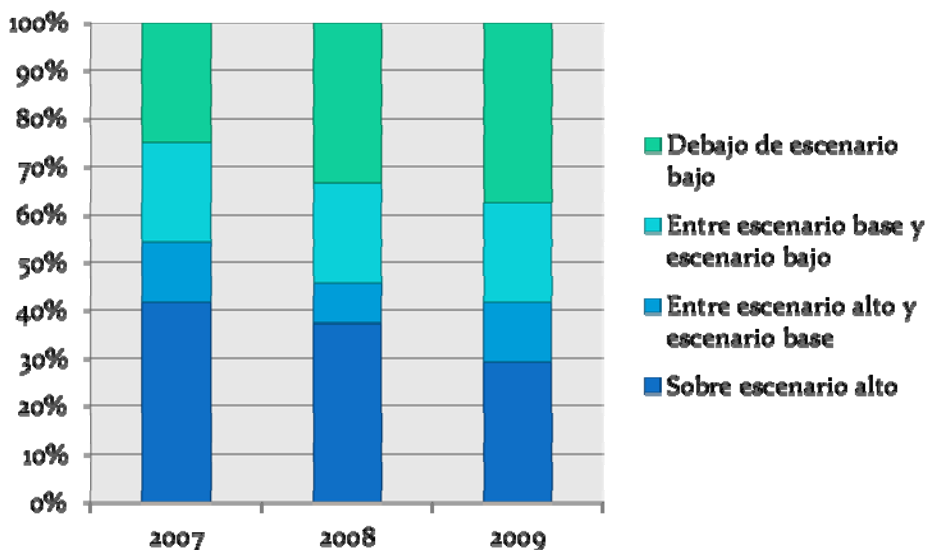
En la siguiente figura se compara el desempeño real que tuvieron algunas autopistas analizadas durante el período 2007 – 2009, en comparación con las demandas estimadas por empresas consultoras en el área de tráfico.

**Tabla 2. Comparativa entre tráfico real y proyectado, diversos estudios**

Tráfico Real vs Proyectado	2007	2008	2009
Sobre escenario alto	10	9	7
Entre escenario alto y escenario base	3	2	3
Entre escenario base y escenario bajo	5	5	5
Debajo del escenario bajo	6	8	9
Total de autopistas	24	24	24

Fuente: Autopistas de Cuota en México, Fitch Raitings

**Tabla 3. Asertividad entre tráfico real y proyectado, diversos estudios**



Fuente: Autopistas de Cuota en México, Fitch Raitings

Como podrá observarse, en los años recientes en este muestreo de 24 autopistas en el país, las estimaciones de tráfico asignado debajo del escenario bajo (más pesimista) ocupa un espectro mayor. Esto en parte se explica con la crisis del año 2009 que sufrió el país por efecto de la contingencia sanitaria.

Esta tendencia obliga a la aplicación de las mejores prácticas para la estimación y pronóstico del aforo vehicular.

## 1.5 Justificación

Los recursos públicos que el gobierno federal ha destinado durante los últimos años al desarrollo de infraestructura carretera han permitido contar con presupuestos muy importantes

- Dicha inversión se destina a los programas de mantenimiento, modernización y construcción de carreteras.
- Adicionalmente, el esquema de Asociaciones Público-Privadas ha permitido financiar nuevas autopistas.
- El gobierno ha diseñado modelos de participación público-privada para atraer capitales privados a la inversión en carreteras.

El éxito de una autopista depende de varios factores como son: ubicación geográfica, número de años en operación, posición competitiva y propósito de uso.

En los años recientes se ha observado que las vías urbanas presentan un mejor desempeño en relación con los movimientos macroeconómicos del país, los tramos urbanos (aquellos usados frecuentemente para traslado a centros educativos o laborales) han demostrado tener una mayor resistencia, mientras que los comerciales suelen reaccionar más rápidamente a cambios positivos o negativos en la economía, a la vez que los turísticos son los más vulnerables y experimentan las recuperaciones menos veloces.

La finalidad de este trabajo es revisar las mejores prácticas para integrar modelos de demanda cuyo objetivo sea la determinación de la demanda captada por una vía de cuota.

La construcción de nuevos proyectos de infraestructura concesionada de cuota en el país ha contribuido a reforzar el sistema de caminos del país, siendo fundamental para permitir la integración social y económica del país.

Sin embargo, su construcción requiere de importantes recursos y tiempo de construcción, por lo que resulta fundamental conocer con la mayor precisión posible la demanda que hará uso de dicha infraestructura, así como de su crecimiento a través del tiempo con la finalidad de tener certidumbre en cuanto al beneficio social y económico que se obtendrá por la puesta en operación de un proyecto de esta magnitud.

Habitualmente la manera de estimar la demanda de los usuarios es a través del uso de modelos de demanda y de redes de transporte, y su pronóstico se realiza con modelos econométricos.

## 2 Integración de un modelo de oferta mediante el concepto de redes

---

Uno de los elementos integrantes de un modelo de transporte es la componente de oferta vial, que a su vez tiene dos definiciones básicas: la zonificación y la red.

La definición y extensión territorial de la zonificación es fundamental para lograr un buen análisis y conseguir un nivel de precisión conveniente, sin que la definición de la zonificación o la extensión de la red de análisis sea tan extensa que resulte demasiado onerosa en cuanto a su elaboración. Otro aspecto relevante es que el modelo de oferta represente la región en estudio con una estabilidad temporal suficiente para que su uso sea válido durante el periodo de análisis, o bien en su caso, contenga las modificaciones en infraestructura vial contempladas en el futuro.

### 2.1 Zonificación

La definición de la zonificación permite agrupar colonias, localidades, municipios o entidades federativas en regiones congruentes con los objetivos de la modelación. La zonificación queda definida por el número de zonas a incluir en el modelo así como la porción territorial que cada una de las zonas representa.

Como principio fundamental es recomendable que la zonificación tenga un mínimo de 50 zonas, y sólo en estudios de mucho detalle se requieren 300 zonas o más.

De igual manera, si el estudio tiene un carácter estratégico se requerirán menos zonas a que si el estudio es de detalle. El tiempo y recursos disponibles también definen el nivel de detalle.

En términos topológicos, cada zona queda representada por un tipo de nodo especial denominado centroide.

El diseño de la zonificación debe contemplar los siguientes aspectos:

#### 2.1.1 Compatibilidad con la división política.

Cada zona es una agrupación o bien de colonias, de zonas metropolitanas, de localidades, de municipios o de estados, admitiendo la posibilidad de estar conformada por al menos uno de estos elementos. Debe existir congruencia en su integración de manera que una agrupación de colonias, por ejemplo, sólo debe estar asociada a una localidad o zona metropolitana; de igual forma una agrupación de municipios deberá corresponder a un solo estado. Este principio es básico para definir con congruencia y precisión el origen o destino del viaje.

#### 2.1.2 Tamaño de las zonas.

Dado que cada zona queda representada por un centroide, su ubicación geográfica debe representar en la medida de lo posible al conjunto de actividades que ahí tienen lugar y ubicarse en el centro poblacional y no necesariamente el geométrico. Si representa a un grupo de localidades, por ejemplo, su posición debe ser tal que permita reproducir la trayectoria de acceso habitual. En caso de que no sea posible, entonces será recomendable crear más zonas, para que la reproducción de los patrones de viaje sea lo más preciso posible. Este criterio aplica

principalmente si las zonas están próximas al o los proyectos objeto del estudio. En todo caso, el disponer de muchas zonas pequeñas permite agregarlas en función de las necesidades de modelación.

**2.1.3 Homogeneidad.**

En lo posible, la definición de las zonas, debe obedecer a criterios de uso de suelo y/o composición de población similar. No deben mezclarse usos de suelo industrial, con comercial o habitacional, tampoco deben integrarse zonas con estratos económicos disímboles.

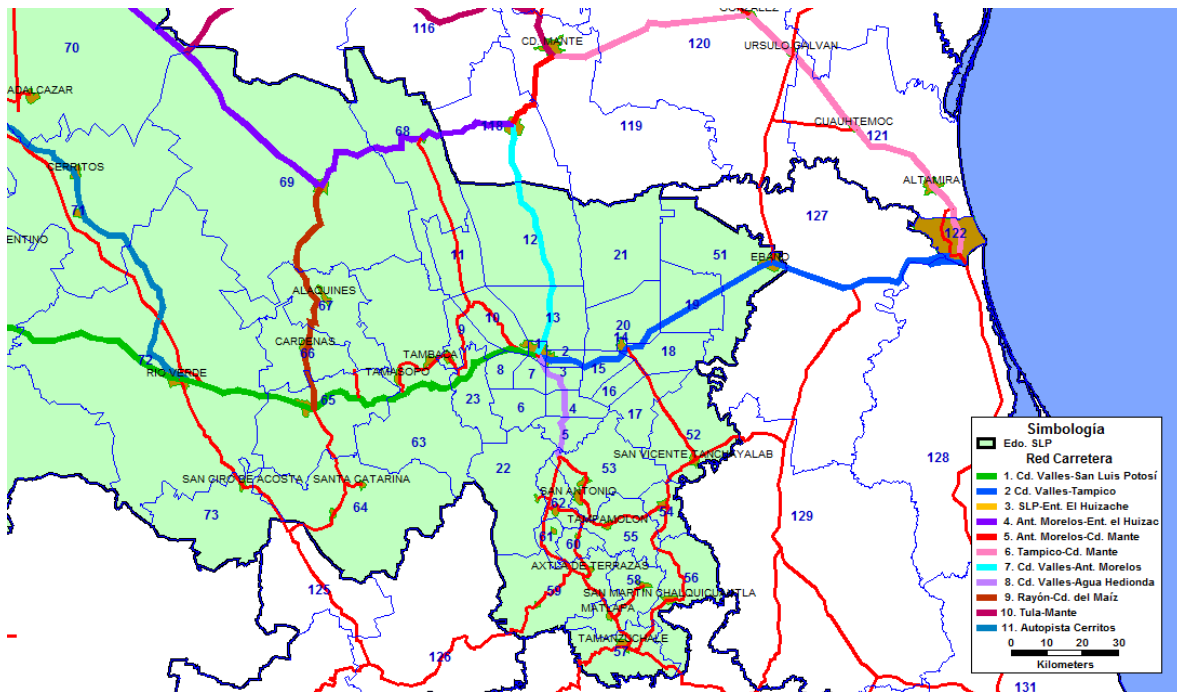
**2.1.4 Compatibilidad con otros estudios.**

La comparación entre los resultados de asignación de dos o más estudios será posible en la medida en que sus zonificaciones sean iguales o al menos compaginables.

**2.1.5 Límites**

Teniendo en consideración la topología de las vialidades existentes y propuestas debe diseñarse la zonificación de manera tal que sea posible caracterizar los movimientos que se gesten en tronques importantes. Una zonificación demasiado agregada generará muchos viajes intrazonales que hará inútil cualquier análisis. Debe evitarse también usar vialidades primarias como límites de zona, pues el origen o destino del viaje podría generarse en la frontera entre un par de zonas, lo que dificultaría su asignación a una u otra zona.

*Figura 1. Ejemplo de zonificación para un libramiento en Ciudad Valles, SLP*



Fuente: Elaboración propia

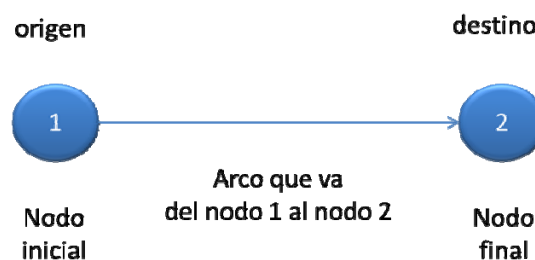


## 2.2 Red de transporte

La red de transporte es la representación de la oferta vial dentro del proceso de modelación en que debe incluirse el conjunto de calles y avenidas que permitan conectar las diferentes zonas integrantes del modelo. Deben incluirse también, si es el caso, carriles exclusivos, vías férreas, o cualquier otra infraestructura para representar el movimiento del transporte público.

Matemáticamente la red es un sistema de nodos y arcos que los unen, en donde éstos representan vialidades con características físicas homogéneas en términos de sección, tipo de terreno y jerarquía vial. Los nodos representan varios elementos: intersecciones, cambios de sección o bien un centroide de zona.

*Figura 2. Representación gráfica de una red de transporte*



El arco determina el sentido de la vialidad. Los nodos en una red de transporte se representan normalmente con un círculo y los arcos con flechas.

Una red debe tener un equilibrio entre economía y realismo de manera que deberán incluirse una cantidad de enlaces y nodos que permitan representar la realidad, evidentemente incluir más elementos contribuirá a una mejor representación, pero su integración será más onerosa y su manejo computacional más complejo.

Por otro lado, si la zonificación es muy agregada, no tiene sentido usar una red muy detallada, ya que el uso de conectores reducirá el valor del proceso de modelación.

### 2.2.1 Propiedades de los arcos

Cada arco tiene atributos. Los que se consideran indispensables son los siguientes:

- Longitud.
- Tiempo o velocidad de viaje a flujo libre o con cierta condición de demanda.
- Número de carriles.
- Capacidad expresada en vehículos ligeros por carril y unidad de longitud.

Pueden existir algunos atributos más en función de las necesidades de modelación, algunos ejemplos son:

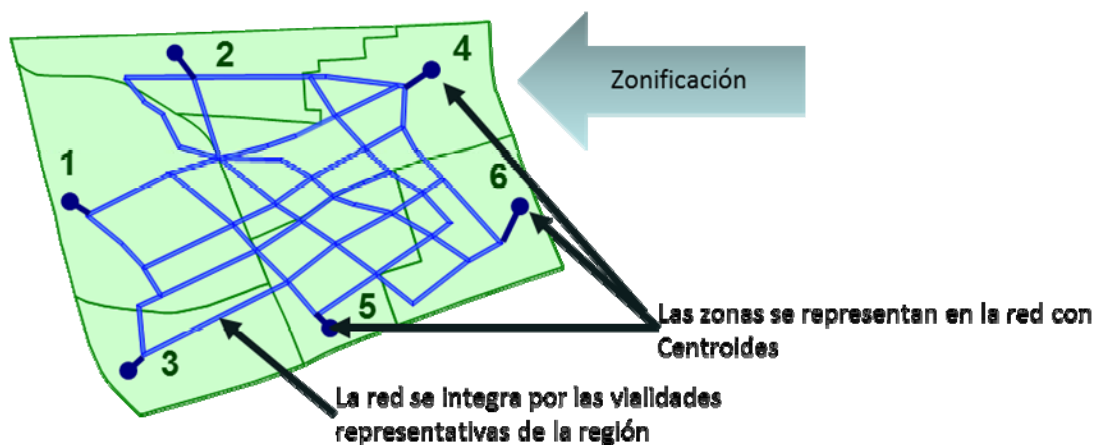
- Volumen de precarga, este atributo se emplea cuando se estime que la demanda asignada por el modelo representa una fracción del volumen total que circula en cierto enlace y en donde se requiere reproducir las velocidades y tiempos de viaje y que no sería posible hacerlo sólo con el volumen asignado.
- Peaje.
- Para fines de estimación del Costo de Operación Vehicular pueden incluirse atributos como el tipo de terreno y la condición del pavimento.
- Restricción a la realización de giros.

### 2.2.2 Costos en la red

Las actuales técnicas de asignación asumen que la elección de la ruta entre su origen y destino consiste en minimizar su distancia y tiempo de viaje mediante una expresión denominada costo generalizado de viaje. Este criterio es sumamente simplista y no necesariamente refleja la realidad, pues existen otros factores que pueden influir en la elección de la ruta.

Una aproximación más realista es considerar que el tiempo de viaje depende del flujo que circula en cada enlace. En la medida en que el enlace pertenezca al entorno urbano, mayor relevancia tendrá este criterio. En un entorno interurbano la relevancia de este criterio es menor, pero en el caso de un entorno urbano conlleva una mayor importancia

Figura 3. Conceptualización de una red de transporte



Fuente: Elaboración propia

## 2.3 Tipos de vías concesionadas

Por la naturaleza de su función existen cuatro tipos de vías concesionadas, las cuales se describen a continuación:

### 2.3.1 Autopistas interurbanas

Este es el tipo más común de carretera de cuota en México y en la mayor parte de los países del mundo. Se caracterizan por:

- Tienen como finalidad permitir el enlace entre dos o más centros poblacionales.
- Tramos relativamente largos.
- Sin muchas limitaciones de espacio para instalar plazas de peaje.
- Con alternativas, a veces libres y otras veces de cuota.
- El número de alternativas depende de la geografía y del desarrollo de la región.
- Diseños con número limitado de accesos para evitar evasión y permitir cobro a (casi) todos los usuarios.
- Uso optativo de peaje electrónico de baja velocidad (con barrera).
- A menudo parte de una red mayor, de importancia para el transporte de carga y el desarrollo regional.
- La congestión rara vez es significativa en la elección de rutas; tienen mayor importancia las velocidades y características de diseño, como el hecho de disponer de uno o dos cuerpos, uso de cruces a diferente nivel para evitar semáforos, etc.

### 2.3.2 Libramientos

En este caso se trata de una carretera que permite evitar pasar por el centro de un área urbana.

- En el caso más simple se tiene el de una vialidad que conecta dos accesos en la ciudad y por ello genera dos alternativas de ruta: por el área urbana o por el libramiento.
- En ciudades mayores y cuando el libramiento cubre más de dos accesos, se producirán varias alternativas de ruta para distintos pares origen-destino (O-D). En este caso el proceso de modelación es más complejo.
- En las grandes ciudades los libramientos se usan para los viajes locales, al menos en horas pico, para evitar la congestión que se presenta en las zonas céntricas.

### 2.3.3 Puentes Internacionales y Túneles

Este es un caso especial de inversión en infraestructura que conecta dos puntos que previamente sólo estaban vinculados por una ruta más larga y menos conveniente. Otros casos pueden ser túneles que cruzan por una cadena montañosa.

- Se caracterizan por el hecho de que si bien cuentan con alternativas, éstas son generalmente peores que la nueva infraestructura.
- Rara vez la congestión juega un papel importante en la elección de ruta, excepto en el caso de obras internacionales, en que la eficiencia de las operaciones de aduana e inmigración tienen un papel importante en la selección de la ruta a seguir.
- Son generalmente parte de un sistema de rutas más amplio, pero generalmente pueden modelarse como sistemas simples con pocas alternativas.

### 2.3.4 Autopistas urbanas o suburbanas

En los últimos 15 años ha aumentado el número de concesiones de carreteras urbanas y suburbanas de cuota tanto en México como en países como los EE.UU., Canadá, Australia, Brasil y Chile, principalmente.

- En estos casos la nueva carretera viene a resolver un problema de acceso y de congestión, que es más grave en horas pico. Los ahorros de tiempo deben ser significativos para que la carretera sea atractiva.
- Los costos del terreno (expropiaciones) son generalmente muy altos y por lo tanto es difícil destinar espacio a plazas de peaje. La tendencia actual es establecer sistemas de recolección de cuota electrónica de flujo libre, sin barreras ni demoras.
- El número de alternativas, libres o con cuota, es elevado, así como lo son los pares OD relevantes.

Una vez revisados los tipos de vías concesionadas se enuncian los elementos mínimos que un modelo de transporte que debe tener:

- Trazo del proyecto propuesto (punto de inicio y de destino de la nueva autopista) incluyendo todos sus entronques, rampas de acceso y salida, preferentemente usar un solo arco para representar los puntos de cobro si es posible definirlos y todas las conexiones relevantes con la infraestructura actual.
- Un punto muy relevante es incluir todas las carreteras o autopistas existentes con las cuales se pretende competir, probablemente esto implique incrementar el ámbito geográfico del proyecto y no sólo limitarse a incluir las zonas circundantes al proyecto.
- Todos los tramos de rutas alternas potencialmente utilizables por un conductor para completar su viaje dentro de la red en la zona de influencia.
- Deben crearse conectores entre los arcos de la red y los centroides de todas las zonas donde se ha identificado producción y atracción de viajes, y de igual forma aquéllas donde se estima que potencialmente podría haber producción o atracción una vez que se construya la vía propuesta o bien en donde vayan a existir nuevos desarrollos inmobiliarios, industriales o comerciales que generen viajes.

## 2.4 Funciones volumen-demora

Las funciones volumen-demora relacionan el flujo vehicular y el tiempo de recorrido de un arco y son necesarias para representar la forma cómo la congestión afecta el tiempo de viaje en un arco. Existe una gama de funciones que pueden utilizarse con ese fin.

### 2.4.1 Características deseables de una función volumen-demora

Las características deseables que debe cumplir una función volumen-demora son:

1. La función debe ser monótona creciente. Esta es una condición necesaria para lograr la convergencia a una solución única.
2. Es necesario cumplir con dos condiciones  $f(0)=1$  y  $f(1)=2$ , con lo cual se garantiza la compatibilidad con las funciones BPR (cuando en las funciones BPR  $a=1$ ). Esto quiere decir que la velocidad con congestión es igual a la mitad de la velocidad en condición a flujo libre.
3. La primera derivada de la función existe y es creciente. Con esta característica se garantiza la convexidad de la función. Esta condición no es necesaria, pero sí deseable.
4. La evaluación de  $f'(1) \approx b$ , es decir, que la primera derivada evaluada en uno debe dar un valor similar al exponente  $b$  de la función BPR. Este parámetro define que tan rápido se presentan los efectos de congestión cuando el volumen alcanza la capacidad.
5. Debe cumplirse la expresión  $f'(x) < Mb$ , donde  $M$  es una constante positiva. Esto quiere decir que la pendiente de una curva de congestión debe estar limitada. Con esto se pretende limitar los valores de esta función cuando la relación volumen capacidad ( $V/C$ ) es superior a 1 con lo cual se evitan problemas de convergencia.
6. La expresión  $f'(0) > 0$ . Esta condición garantiza la unicidad de los volúmenes en los enlaces, con lo cual se evita el cálculo de tiempos de viaje independientes del volumen cuando se

tienen bajas relaciones  $v/c$  con lo cual se brinda estabilidad al proceso de convergencia, además de distribuir los volúmenes en competencia en proporción a la capacidad de los enlaces.

7. La evaluación de la función no debe requerir más tiempo de cálculo que el caso de una función BPR.

Las primeras cuatro condiciones aseguran la compatibilidad con la función BPR. Las restantes tres condiciones evitan los efectos indeseables en el uso de la función BPR. Cabe destacar que las condiciones anteriores se cumplen siempre y cuando el coeficiente  $a$  de la función BPR sea igual a uno.

Es trascendente mencionar que cuando se habla acerca de funciones volumen-demora, en estricto sentido, la capacidad no es un término absoluto, sino una convención en donde simplemente a un cierto volumen se le llama "capacidad". En realidad un cociente  $V/C$  próximo o superior a la unidad simplemente implica mayores impedancias en la medida en que crece el volumen.

#### 2.4.2 Función BPR

En la literatura de planeación de transporte y de ingeniería vial, tradicionalmente se han utilizado las funciones denominadas BPR (Bureau of Public Roads) derivadas de la extensa experiencia en el tema en diversos países. Estas funciones presentan ventajas algorítmicas cuando se utiliza en el contexto de modelos de transporte para análisis de modelos interurbanos, las cuales, han sido ampliamente comprobadas en estudios anteriores.

La estructura de las funciones tipo BPR es la siguiente:

$$t = t_0 \left( 1 + \alpha \left( \frac{V}{C} \right)^\beta \right)$$

Donde:

$t$  : Tiempo de recorrido en el enlace.

$t_0$  : Tiempo de recorrido en el enlace a flujo libre.

$V$ : flujo total en el arco  $a$ , un sentido (veh/h). Normalmente se expresa en vehículos equivalentes, unidad que permite representar vehículos de diferente tamaño (autos, buses, etc.).

$C$ : capacidad en el arco  $a$  (carretera), expresado en vehículos equivalentes.

$\alpha, \beta$ : parámetros de calibración, estimados para cada carretera.

Los parámetros  $\alpha, \beta$ , varían en función del tipo de carretera: urbana, dos carriles, multicarril o autopista. Se utilizará solo un juego de alfas y betas para todos los tipos de vehículo (clase) siguiendo lo propuesto por Florian y Noriega (2007) Algorithmic approaches for asymmetric multi-class network equilibrium problems with different class delay relationship, Montreal, Canadá.

La especificación de los parámetros  $\alpha, \beta$  en las funciones volumen demora, se indican a continuación:

Tabla 4. Parámetros  $\alpha, \beta$  para funciones volumen demora

Clasificación Funcional	$\alpha$	$b$	Capacidad (min-max)
	(+/- 20%)	(+/- 20%)	(vl/h/c)
Autopista multicarril	0.39	6.3	1600-2000
Autopista 2 carriles	0.32	7.0	1520-1900
Carretera multicarril	0.10	10.0	1360-1700
Carretera de dos carriles	0.07	6.0	1200-1500
Otros caminos	0.07	6.0	960-1200
Urbana primaria	1.16	6.0	560-700
Urbana secundaria	1.00	5.0	480-600
Urbana colector	1.40	5.0	400-500
Urbana local	1.50	5.0	320-400

vl/h/c: vehículos ligeros hora carril.

Los parámetros recomendados por el HCM se presentan a continuación.

Tabla 5. Parámetros  $\alpha, \beta$  para funciones volumen demora

Tipo de Vialidad	Velocidad (km/h)		Parámetros	
	Flujo Libre	A Capacidad Máxima	$\alpha$	$\beta$
Autopista	120	86	0.39	6.3
	112	85	0.32	7.0
	104	83	0.25	9.0
	96	82	0.18	8.5
	88	80	0.10	10.0
Vía Multicarril	96	88	0.09	6.0
	88	82	0.08	6.0
	80	75	0.07	6.0
	72	67	0.07	6.0

Fuente: Highway Capacity Manual 2000, Transportation Research Board.

Desafortunadamente las funciones BPR tienen algunos inconvenientes cuando se emplean valores grandes de  $a$ :

- Aunque es de esperarse que la relación volumen-demora sea menor a uno, en un proceso de iteración de asignación por equilibrio el proceso iterativo puede arrojar relaciones superiores a 3.5 o más, lo que puede causar tiempos de convergencia más prolongados, problemas numéricos y pérdida de precisión.
- En enlaces con bajas relaciones volumen demora se obtienen tiempos de viaje prácticamente independientes del volumen, lo que degenera en asignaciones todo o nada en donde además, cualquier pequeño diferencial en el tiempo a flujo libre puede resultar en un cambio de ruta del volumen asignado.

- Aunque la expresión de la función BPR es simple, su evaluación conlleva el cálculo de dos funciones trascendentales, el uso de logaritmos y la función exponencial para el cálculo de la potencia, lo que habitualmente requiere más recursos computacionales.

Si se observan las velocidades de la Tabla 5 podrá constatar que la relación entre la velocidad a flujo libre y la velocidad a máxima capacidad no es necesariamente 2 a 1<sup>1</sup>. Esta consideración queda solventada con el uso del coeficiente  $\alpha$  que tiene la función de dimensionar la velocidad en condiciones de máxima demanda, por lo que una manera de estimar este valor es aplicando la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{V_0}{V_c} - 1$$

donde,

$V_0$  = Velocidad a flujo libre.

$V_c$  = Velocidad a máxima capacidad, es decir, cuando la relación  $V/C = 1$ .

### 2.4.3 Función cónica

Este tipo de función geoméricamente representa la intersección de un cono obtuso en un plano y cumple con las propiedades deseables de una función volumen-demora.

Su definición matemática es simple por involucrar elementos básicos del álgebra y se expresa de la siguiente forma.

$$t = t_0 * \left( 2 + \sqrt{\alpha^2 (1-x)^2 + \beta^2} - \alpha(1-x) - \beta \right)$$

$$x = \frac{v}{c}$$

$$\beta = \frac{2\alpha - 1}{2\alpha - 2}$$

donde,

$t$  : Tiempo de recorrido en el enlace.

$t_0$  : Tiempo de viaje en el enlace a flujo libre.

$\alpha$  : Razón de descenso de la velocidad y cuyo valor debe ser mayor a 1.

$v$ : Volumen total circulante sobre el enlace.

$c$ : Capacidad del enlace.

<sup>1</sup> De acuerdo al punto 2.4.1



Sin embargo, tiene la limitación de asumir que el tiempo de viaje bajo condiciones de máxima demanda es el doble que en condiciones a flujo libre, situación que no necesariamente es cierta.

Para subsanar esta situación pueden hacerse las siguientes consideraciones:

Para efectos de nomenclatura y para diferenciar los coeficientes de la función BPR con los empleados en la función cónica se considerará que:

$$f = 1 + \delta \left( \frac{V}{C} \right)^\theta$$

Si se considera que el coeficiente  $\delta$  es un factor que escala de la capacidad del arco, entonces puede expresarse lo siguiente:

$$\delta \left( \frac{V}{C} \right)^\theta = \left( \frac{V}{kC} \right)^\theta$$

Despejando el valor de  $k$  se tiene que:

$$k = \frac{1}{\delta^{1/\theta}}$$

Aplicando este factor de escala a la función cónica original se tiene que:

$$t = t_0 * \left( 2 + \sqrt{\alpha^2 \left( 1 - \left( \frac{x}{k} \right) \right)^2 + \beta^2} - \alpha \left( 1 - \left( \frac{x}{k} \right) \right) - \beta \right)$$

Con esta modificación queda solventado el problema de la relación entre la velocidad a flujo libre y la velocidad a máxima capacidad y la aplicabilidad de esta función se generaliza.

A continuación se muestra la estimación del factor k para funciones cónicas con base en lo propuesto la Tabla 5.

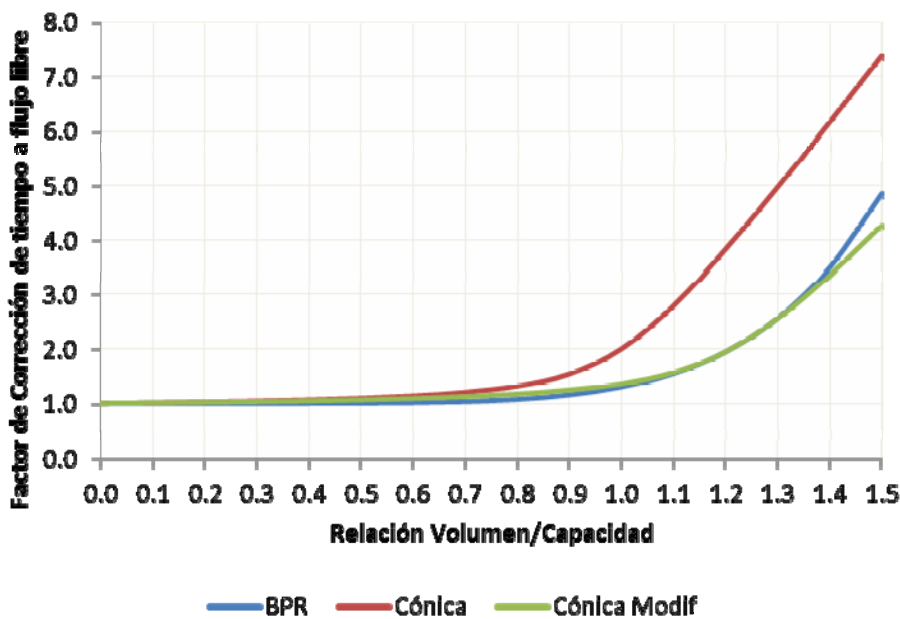
**Tabla 6. Factor k para funciones cónicas**

Tipo de Vialidad	Velocidad (km/h)		Parámetros de BPR		Factor K para f Cónica
	Flujo Libre	A la Capacidad	$\alpha$	$\beta$	
Autopista	120	86	0.39	6.3	1.161
	112	85	0.32	7.0	1.177
	104	83	0.25	9.0	1.167
	96	82	0.18	8.5	1.224
	88	80	0.1	10.0	1.259
Vía Multicarril	96	88	0.09	6.0	1.494
	88	82	0.08	6.0	1.523
	80	75	0.07	6.0	1.558
	72	67	0.07	6.0	1.558

Fuente: Elaboración propia con base en lo recomendado en el Highway Capacity Manual 2000

El uso de funciones de tipo cónico resuelve problemas de convergencia y tiene buen desempeño en problemas de asignación y representan de mejor manera a la modelación en el ámbito urbano.

**Gráfica 6. Efecto de la corrección de la función cónica**



Curvas estimadas con los siguientes parámetros:

BPR  $\alpha=0.3$ ,  $b=6.3$ ; Cónica  $\alpha=6.3$ ; Cónica modificada  $\alpha=6.3$ ,  $K = 1.21$

Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se observa que la cónica modificada es que me mejor se ajusta a nuestros datos.

### 2.4.4 Función Davidson modificada

En el caso de redes en donde exista congestión importante es recomendable hacer uso de funciones diseñadas para esos ámbitos. La función volumen demora de Davidson fue revisada y modificada por Akcelik en 1981 representa la demora en condiciones en donde la demanda se aproxima a la capacidad y se expresa como:

$$t = t_0 \left[ 1 + 0.25 \frac{T_f}{t_0} \left( (x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + 8J_A \frac{x}{QT_f}} \right) \right]$$

donde,

$t$  = Tiempo de viaje por unidad de distancia.

$t_0$  = Tiempo de viaje por unidad de distancia a flujo libre.

$J_A$  = Parámetro de demora.

$x$  = Relación volumen demora =  $q/Q$ .

$q$  = Demanda del enlace en vehículos por unidad de tiempo.

$Q$  = Capacidad en vehículos por unidad de tiempo.

$T_f$  = Tiempo de sobreflujo considerado en unidades de tiempo.

Tabla 7. Parámetro  $J_A$  para función Davidson modificada

Tipo de Vía	Capacidad (vl/h/c)	Velocidad a Flujo Libre (km/h)	$J_A$	$t_c/t_0$
Autopista	2000	120	0.1	1.587
Vía rápida con accesos controlados	1800	100	0.2	1.754
Vía principal con intersecciones	1200	80	0.4	2.041
Vía secundaria con intersecciones	900	60	0.8	2.272
Vía secundaria con alta fricción	600	40	1.6	2.439

Fuente: Improved Speed-Flow Relationships: Application to Transportation Planning Models

Nota el cociente  $t_c/t_0$  representa en número de veces que se incrementa el tiempo de viaje cuando el flujo en el arco alcanza la máxima capacidad.

### 2.4.5 Función de demora de Webster y Akcelik

En el caso de modelaciones en ámbito urbano, las demoras no son causadas sólo por el flujo que circula en cada enlace, sino por la operación de semáforos en los entronques. En tal caso existen funciones compuestas por tres elementos para representar este efecto. Se muestra la función de Webster y Akcelik.

$$t = t_0 + d_1 + d_2$$

donde,

$$d_1 = \frac{C}{2} \left[ \frac{\left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{1 - \left(\min(1, x) \frac{g}{C}\right)} \right]$$

$$d_2 = t_0 \left[ 0.25 \frac{T_f}{t_0} \left( (x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + 8J_A \frac{x}{QT_f}} \right) \right]$$

$t_0$  = Tiempo de viaje en el enlace bajo condiciones de flujo libre.

$C$ : Tiempo promedio de los ciclos de todos los semáforos contenidos en el enlace.

$g$ : Tiempo promedio luz verde de todos los semáforos contenidos en el enlace.

$x$  = Relación volumen demora =  $q/Q$ .

$d_2$  = Función Davidson modificada.

## 3 Determinación de la demanda mediante el método de levantamiento de información de campo y medición de flujos.

---

### 3.1 Concepto de demanda

Una vez definidos los principales componentes de la oferta en un modelo de transporte, se inicia la discusión del otro elemento fundamental en un modelo de transporte, *la demanda*.

En términos generales la demanda de transporte es el requerimiento por hacer uso de una determinada infraestructura o servicio por un grupo usuarios por el cual debe pagarse un costo con la finalidad de adquirir bienes o servicios. La selección de un modo de transporte depende de la valoración que cada usuario hace sobre las características de cada alternativa para realizar su viaje.

La demanda de bienes y servicios en general, depende del ingreso de los consumidores y del precio de un producto o servicio en particular, relativo a otros precios. En el caso del transporte la demanda de viajes dependerá del ingreso del viajero, mientras que la selección del modo de transporte queda sujeta a una serie de factores tales como el propósito del viaje, distancia por recorrer e ingreso del viajero.

### 3.2 Demanda en redes autopistas de cuota

Es importante reconocer que no todos los usuarios de sistemas de autopistas de cuota tienen las mismas características. En particular, no todos los usuarios tienen la misma disponibilidad a pagar peajes para acceder a una carretera de mayor calidad y que ofrezca ahorros de tiempo.

Es por ello que se recomienda hacer un análisis inicial de cuáles son las respuestas conductuales que realmente van a ser relevantes en un estudio de futura carretera de cuota y qué pares O-D son los más importantes. Esto ayuda a definir el tráfico de interés o potencial (in-scope traffic).

La modelación debe estimar qué proporción de ese tráfico potencial es capturable y cuantos ingresos se generarían de esta manera.

La siguiente etapa es determinar los beneficios que ofrecerá la carretera de cuota en términos de menores tiempos de viaje (para algunos pares O-D), menos detenciones, mejor nivel de diseño, mayor seguridad, etc.

#### 3.2.1 Periodos de modelación

Se deben resolver aquí dos aspectos. El primero es ¿qué período típico debe modelarse? En el caso de autopistas sujetas a congestión que varía con las horas del día (urbanas y suburbanas), será necesario modelar al menos la hora pico de la mañana y una hora valle. Puede ser necesario modelar también la hora pico de la tarde de un día laboral si ésta es muy diferente a la de la mañana.

Si el comportamiento durante los fines de semana es muy distinto, puede ser necesario también modelar una o más horas típicas de ese periodo. Si las tarifas son diferentes durante ciertas horas, eso va a requerir modelarlas por separado.

En todos estos casos deben utilizarse factores de anualización para generar, desde el punto de partida de modelos de horas representativas, el Tráfico Diario Promedio Anual (TDPA) así como el cálculo de los ingresos anuales.

### 3.2.2 Horizontes de modelación

El segundo aspecto por determinar es ¿cuáles serán los horizontes de modelación? es decir, qué años futuros es necesario modelar. La práctica recomienda modelar periodos cada cinco años e interpolar para los años intermedios.

## 3.3 Aplicación de Encuestas de Origen-Destino

Las encuestas origen-destino (EOD) son el insumo fundamental para la determinación de la demanda. Deben realizarse en el área de influencia del estudio que debe ser previamente definida y zonificada, procurando entrevistar a todos los tipos de viajeros susceptibles de hacer uso de la nueva infraestructura a estudiar.

Las EOD se deben efectuar durante días considerados representativos, típicamente martes a jueves en período laboral, para los flujos a modelar. Por ende, es necesario conocer la distribución de flujos en el área de estudio durante el año (estableciendo lo que comúnmente se denomina “periodización”), con el fin de decidir en qué mes del año y durante cuantos días deberían recolectarse las encuestas. Es por ello, que deben evitarse los días festivos, las fiestas patronales o bien, los periodos con condiciones singulares como son los días en que se presenten contingencias ambientales, daños severos a la infraestructura, manifestaciones, etc.

Desde el punto de vista espacial, se trata de lograr la mayor y más eficiente cobertura posible de todos los viajes que tienen lugar en el área de estudio; es posible que se puedan producir problemas cuando se trata de interceptar viajes poco probables o que, por configuración de la red, resulte muy ineficiente interceptar.

Para asegurar un buen resultado, es importante contar desde el principio con una red de transporte codificada y, si es posible, una matriz de viajes inicial (aunque sea obsoleta, o sencillamente sintetizada a partir de conteos de tráfico o de un modelo de distribución transferido de otro lugar). Esto permite cargar todos los viajes a la red y hacer un análisis de los pares origen destino (O-D) que utilizan arcos potenciales para hacer encuestas de interceptación. En caso de que no se cuente con una matriz inicial, entonces deberán analizarse las posibles trayectorias de la demanda potencial, incluso aquellos viajeros que, bajo el supuesto de la existencia de la nueva infraestructura propuesta, podrían optar por cambiar su trayectoria de viaje.

En la *Figura 4* se muestra una propuesta para determinar la demanda asignable a un libramiento. La finalidad de proponer la Estación 3 (EOD 3) es captar la demanda que decide viajar del centro del país al puerto de Veracruz viajando por el nuevo libramiento.

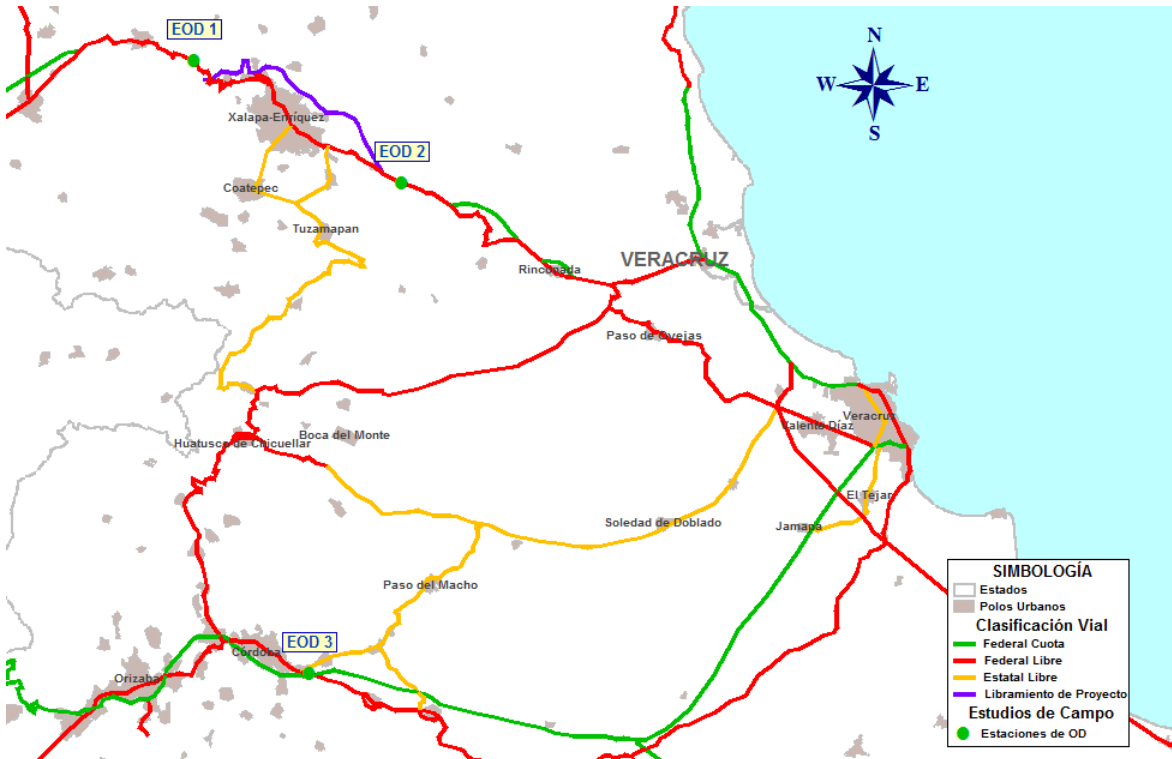


Figura 4. Propuesta de Encuestas OD para evaluar un Libramiento

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.1 Tamaño de la muestra

Para determinar el tamaño de la muestra en cada punto de encuesta se emplea la expresión para un muestreo aleatorio simple para proporciones, cuya expresión es:

$$n = \frac{Np(1-p)Z_a^2}{N\epsilon^2 + p(1-p)Z_a^2} f$$

donde,

$n$  = Muestra mínima a obtener.

$N$  = Número de vehículos que cruza el punto de encuesta.

$Z_a$  = Valor acumulado de la distribución normal estándar inversa, asociado al nivel de confianza  $\alpha$ . Este valor habitualmente es 90%, 95% o 99%. Debe considerarse que entre mayor es este valor, mayor proporción del flujo debe muestrearse.

$p$  = Representa la proporción de elementos de la población que posee cierta característica. Habitualmente no se tiene información al respecto, por lo que se recomienda usar 0.5 dado que este valor maximiza el cálculo del tamaño de la muestra.

$\epsilon$  = Margen de error para estimación del muestreo.

$f$  = Factor de seguridad para muestras inválidas. Su uso es recomendable dado que siempre existe una proporción de muestras inservibles o inválidas. Se recomienda que su valor sea de 1.1

El cálculo anterior debe realizarse por grupo vehicular. La tabla siguiente estima el tamaño de muestra para tres grupos vehiculares.

**Tabla 8. Estimación del tamaño de muestra para  $\alpha = 95\%$  y error de 3%**

Estación	Grupo Vehicular	Tránsito Diario	Muestra	Proporción
EOD1	Autos	7,500	934	12.5%
	Camiones de 2 a 4 ejes	1,500	624	41.6%
	Camiones con 5 ejes o más	300	234	78.1%
		9,300	1,792	19.3%

Fuente: Elaboración propia

Es interesante destacar que los grupos vehiculares con poca presencia deberán ser muestreados en mayor proporción respecto a los más numerosos. Este hecho debe considerarse al momento de recabar encuestas OD; deberá privilegiarse la encuesta a grupos de poca presencia respecto a los que son más numerosos. En otras palabras, deberá privilegiarse el muestreo de camiones con respecto al de los automovilistas.

### 3.4 Medición de volúmenes

Los estudios de volúmenes de tránsito se realizan con el propósito de conocer la cantidad de vehículos que pasa por un punto durante un tiempo determinado. Los volúmenes que generalmente interesan son durante las horas pico, diarios (días laborales y/o de fin de semana) y anuales.

En particular interesa estimar el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) que se define como el número total de vehículos que pasan durante un periodo dado (en días completos), transformado en el equivalente al promedio diario.

En la mayor parte de las carreteras de cuota interurbana interesa estimar el TDPA porque éste puede convertirse muy directamente en recaudación diaria promedio y, por ende, el total del año.

La SCT, a través de la Dirección General de Servicios Técnicos, realiza conteos todos los años a fin de tener conocimiento del volumen y tipo de vehículos que circulan en la red de carreteras y con ello determinar el grado de ocupación y las condiciones en que opera cada segmento de la red federal. Esta información se puede obtener de manera impresa a través de las publicaciones Datos Viales de esta Dirección General o bien en el portal de la dependencia.

Los conteos son obtenidos a través de estaciones de aforo con clasificación vehicular en periodos de siete días, distribuidos en forma estratégica por la red carretera nacional pavimentada.

Sin embargo, para obtener conteos específicos en los sitios donde se aplican estaciones de OD, se emplean habitualmente contadores automáticos. Habitualmente se requiere realizar este tipo de mediciones durante una semana.



En México, los más utilizados son los contadores neumáticos, conformados de una manguera flexible que se coloca en forma transversal sobre la vía, la cual transmite los impulsos de aire ocasionados por la presión al paso del vehículo.

Los impulsos registrados son clasificados mediante la definición de una plantilla de configuraciones de ejes, con lo cual es posible clasificar el volumen vehicular, o bien contabilizar simplemente el número de ejes detectados e incluso estimar la velocidad de punto en el sitio de aforo.

Es recomendable hacer una clasificación manual, por observación, durante un período relativamente corto, a menudo cuando se visita el sitio, para confirmar su funcionamiento y validar el aforo.

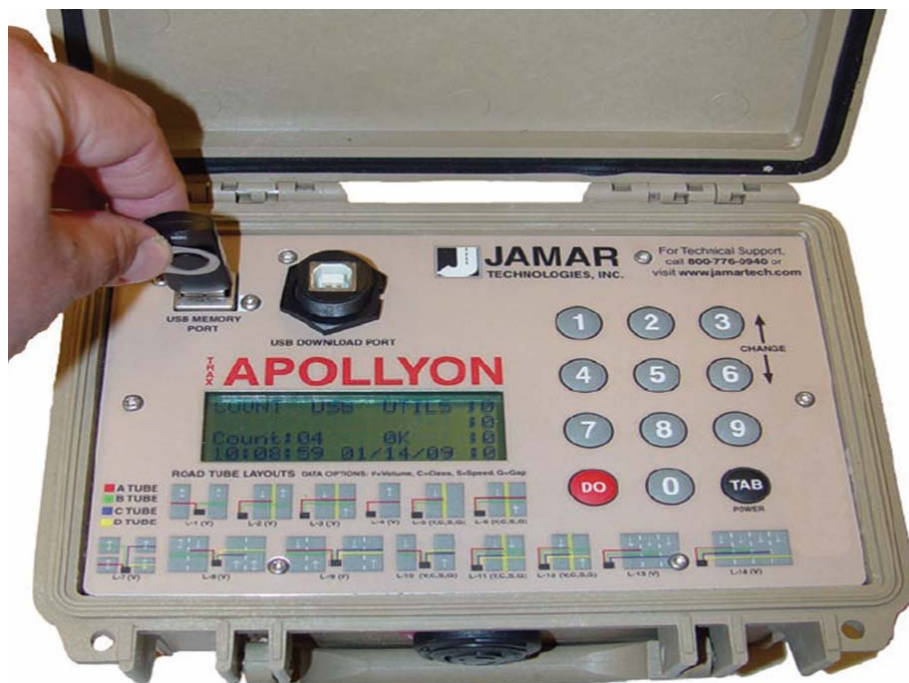


Figura 5. Dispositivo neumático para conteo automático de vehículos

### 3.5 Obtención de las matrices de viaje

La demanda, desde el punto de vista matemático, está representada por las matrices de viaje de cada uno de los segmentos integrantes, habitualmente éstos son: automovilistas, autobuses y camiones.

Cada estación de toma de información representará un conjunto de matrices correspondiente a cada segmento de la demanda.

Como parte culminante de este proceso, se deberá obtener una única matriz por segmento de demanda, misma que deberá asignarse para conocer los flujos de vehículos que circularán en cada uno de los arcos de la red que representa la oferta vial.

En resumen, para obtener las matrices de viaje asignables a un modelo de transporte, deben seguirse los siguientes pasos:

### 3.5.1 Revisión y validación de la muestra de origen-destino

Esta actividad inicia una vez que se ha aplicado un conjunto de encuestas de OD directamente en el sitio de toma de datos. En campo debe verificarse la congruencia de los viajes en términos de su origen y destino, la redacción del nombre de la entidad federativa, municipio, localidad, colonia o referencia y que servirá para determinar la zona origen y zona destino del viaje. Es recomendable que antes de iniciar la aplicación de encuestas se disponga de un listado de las localidades, colonias o sitios relevantes circundantes al sitio de levantamiento de datos, pues esto facilita que los encuestadores se familiaricen e identifiquen con rapidez los nombres locales.

### 3.5.2 Codificación de la muestra

Consiste en la asignación de códigos alfanuméricos a cada uno de los datos recabados de manera que su procesamiento y análisis pueda almacenarse en una base de datos. En el caso de la información de origen y destino es recomendable que los códigos correspondan a la nomenclatura oficial. Para el caso de México, existen códigos numéricos para cada entidad, municipio y localidad, por lo cual se muy recomendable su uso. Parte de la codificación de la muestra es asociar cada origen y destino a una zona, que en la red matemática se representa por un centroide.

La información proveniente de las encuestas debe ser depurada, eliminando aquellas que tienen información incompleta o inconsistente, encuestas cuyos orígenes o destinos no pudieron ser geocodificados, y aquellas cuyos pares origen-destino (O-D) no debieran haber sido interceptados en una estación dada. La experiencia muestra que la proporción de encuestas incompletas o mal asociadas a un punto no representa más del 10% del total en el caso interurbano; la mayor proporción de encuestas perdidas se debe a la imposibilidad de georeferenciar los orígenes o destinos (lugares inubicables).

### 3.5.3 Expansión de la muestra

Se trata del procedimiento mediante el cual la muestra recabada es expresada como Tránsito Diario Promedio Anual o TDPA.

Para obtener este valor debe considerarse que la unidad muestral mínima es la estación, sentido, grupo vehicular.

De manera que para el TDPA es igual a:

$$TDPA = n_k F_h F_d F_s F_m$$

donde,

$n_k$ . Muestra OD. Es el número de encuestas obtenidas en una estación, sentido, grupo vehicular y hora.

$F_h$ . Factor Horario. Es el cociente resultante de dividir el número total de vehículos del grupo seleccionado que pasan en la hora y sentido de análisis entre el número de encuestas OD obtenidas en el mismo sentido y periodo.

$F_d$ . Factor Diario. Es el cociente resultante de dividir el número total de vehículos que pasan en el día entre el número de vehículos que circularon durante el periodo de encuesta.

Con los dos factores anteriores es posible estimar el número de viajes diarios entre cada par origen  $i$  y destino  $j$ :

$$V_{i,j,k} = n_k F_h F_d$$

$F_s$ . Factor semanal. El volumen diario de viajes se ajusta para obtener el volumen promedio semanal, para lo cual se emplea el cociente del tránsito promedio semanal entre el volumen observado el día de la encuesta.

Con los factores anteriormente descritos es posible calcular el Tránsito Diario Promedio Semanal.

$$TDPS_k = n_k F_h F_d F_s$$

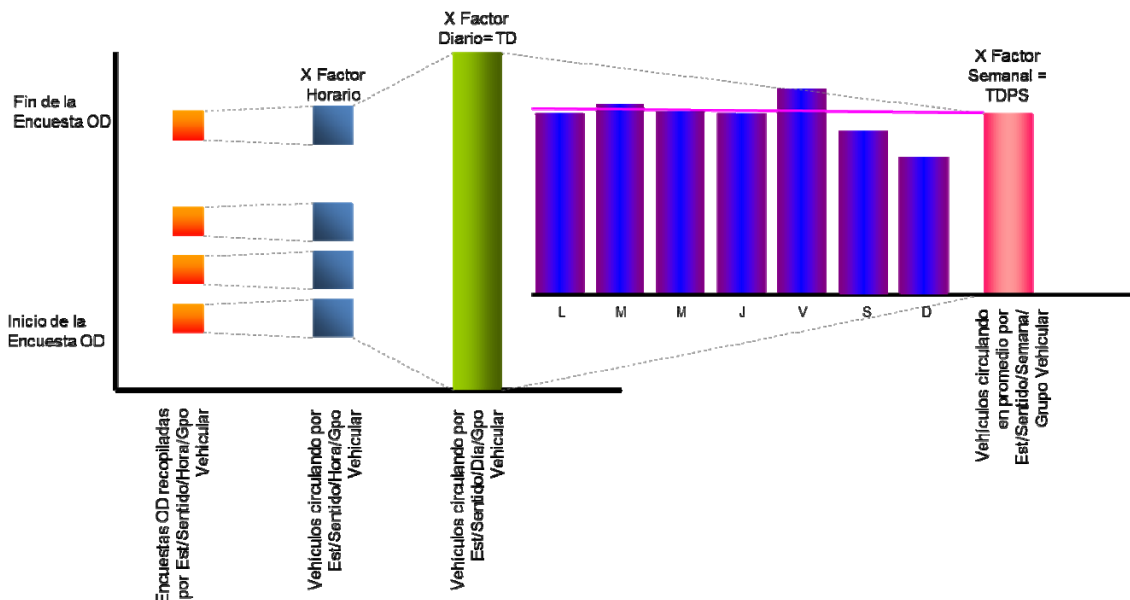


Figura 6. Esquema para obtener el Tránsito Diario Promedio Semanal (TDPS).

Fuente: Elaboración propia

$F_m$ . Factor de desestacionalización o factor mensual. Finalmente, para estimar el tránsito promedio anual, se aplica el factor mensual. Dicho factor es el cociente entre el promedio de tránsito de

todos los meses del año, entre el volumen de tránsito observado durante el mes que se aplica la encuesta. Esta información debe recabarse de sitios en donde se toma información de flujo de manera permanente. En nuestro país esto tiene lugar habitualmente en plazas de cobro.

Con esto se logrará tener la estimación de viajes expresados en tránsito promedio diario anual.

### 3.5.4 Ajustes al cálculo del TDPA cuando se recaba información por más de un día.

Las expresiones descritas anteriormente son válidas siempre y cuando la toma de información se realice durante un día. Sin embargo, es muy común que se recabe información durante más de un día. En los estudios de mercado de autopistas habitualmente se recopila información durante dos días como mínimo, siendo un día entre semana y el otro en fin de semana, por lo cual será necesario ponderar cada observación de manera que se obtenga el volumen como promedio promedio semanal, para posteriormente desestacionalizarlo con el Factor Mensual. En tal caso el cálculo del TDPA debe realizarse de la siguiente forma:

$$TDPA = n_{ES} F_{n,ES} F_{d,ES} F_{s,ES} F_m \frac{5}{7} + n_{FS} F_{n,FS} F_{d,FS} F_{s,FS} F_m \frac{2}{7}$$

donde,

$n_{ES}$ . Muestra obtenida entre semana para cada estación, sentido y grupo vehicular.

$n_{FS}$ . Muestra obtenida en fin de semana para cada estación, sentido y grupo vehicular.

### 3.5.5 Eliminación de duplicidades

De acuerdo con la ubicación de las estaciones de OD, existe la posibilidad de encuestar dos veces a un mismo usuario, lo que significaría el conteo de dos viajes cuando realmente es uno solo, por lo cual es necesario realizar un proceso de eliminación de duplicidades.

Se considera una duplicidad cuando el par OD se presenta en estaciones ubicadas sobre la misma ruta del viaje. No deberán contemplarse duplicidades cuando se detectan flujos con el mismo par OD en estaciones ubicadas en caminos complementarios o alternativos.

Para ejemplificar estos casos, en la figura siguiente se muestran ambos casos: No existen duplicidades entre las estaciones 1 y 2 por corresponder a caminos alternativos, pero sí existirán duplicidades entre las estaciones 1 y 3 o entre las estaciones 2 y 3.

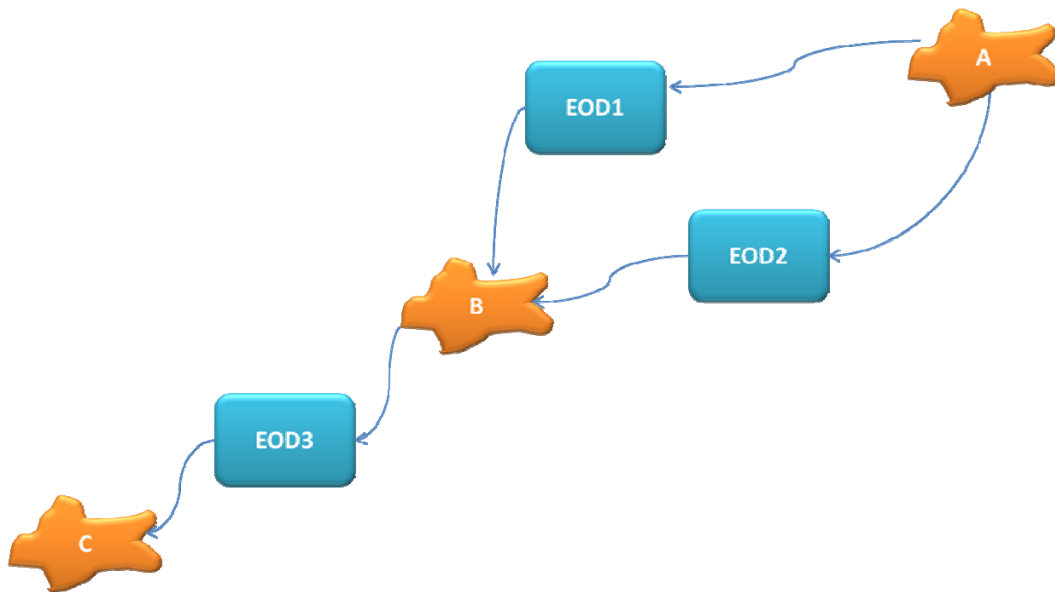


Figura 7. Duplicidades entre diversas estaciones de OD

Fuente: Elaboración propia

La manera en que tratar numéricamente las duplicidades tiene diversos tratamientos. Entre los más comunes es tomar el promedio simple de los viajes o bien un promedio ponderado, siendo este último criterio el que brinda los mejores resultados.

Por promedio simple:

$$V_{ij} = \frac{1}{2}(V_{ij}^n + V_{ij}^m)$$

Por promedio ponderado:

$$V_{ij} = \frac{(V_{ij}^n)^2}{V_{ij}^n} + \frac{(V_{ij}^m)^2}{V_{ij}^m}$$

donde,

$V_{ij}$  = Viaje con eliminación de duplicidades entre  $i$  y  $j$ .

$V_{ij}^n$  = Viaje en la estación  $n$  entre  $i$  y  $j$ .

$V_{ij}^m$  = Viaje en la estación  $m$  entre  $i$  y  $j$ .

## 4 Modelo de captación

El uso de una vía de cuota representa, al menos, una de las alternativas que un usuario tiene para llevar a cabo un viaje interurbano. La decisión de realizar su trayecto usando o no una vía de cuota depende de la información disponible que tenga cada usuario y de cómo valora los factores de decisión como pueden ser el tiempo de viaje, el costo de los peajes, la comodidad, la seguridad, etc.

La forma en que se aborda este problema desde el punto de vista matemático es mediante el uso de modelos de elección discreta.

### 4.1 Modelos de Elección Discreta

La base teórica más usual para generar los modelos de elección discreta, es la teoría de la utilidad aleatoria, que fundamentalmente afirma que:

Los individuos pertenecen a una determinada población homogénea  $Q$ , actúan racionalmente y poseen información perfecta, esto es, eligen siempre su alternativa que maximiza su utilidad neta personal sujeto a sus pertinentes restricciones legales, sociales, físicas y/o presupuestarias (en términos de tiempo y dinero).

Existe un cierto conjunto  $A=\{A_1, \dots, A_i, \dots, A_n\}$  de alternativas disponibles y un conjunto  $X$  de vectores de atributos medibles de los individuos y de las alternativas. Cada individuo dispone de un conjunto  $x \in X$  de atributos y, en general, se enfrenta a un conjunto de opciones de elección disponibles  $A(q) \in A$ .

Cada alternativa  $A_i \in A$  tiene asociada una utilidad  $U_{iq}$  para cada individuo  $q$ .

Sin embargo, quien estudia el fenómeno, no posee información completa acerca de todos los elementos considerados por el individuo cuando hace una elección; por lo tanto, considera que la utilidad tiene dos componentes:

- Una parte sistemática, medible o representativa denominada  $V_{iq}$  que es función de los atributos medibles  $x$ .
- Una componente aleatoria  $\varepsilon_{iq}$ , que refleja las idiosincrasias y/o gustos particulares de cada individuo, además de errores de medición y observación por parte de quien estudia el fenómeno.

De este modo,

$$U_{iq} = V_{iq} + \varepsilon_{iq}$$

La adición de la componente aleatoria permite resolver dos problemas para el modelador:

- Que dos individuos aparentemente idénticos y frente al mismo conjunto de elección, escogen alternativas diferentes, esto se denomina heterogeneidad.
- Que algunos individuos pueden no escoger la mejor alternativa (desde el punto de vista de los atributos considerados por el modelador).

La parte observada  $V_{iq}$  será función de una serie de atributos observados de las alternativas y del propio individuo, que se denominarán  $x_{iq}$ . Esta función requerirá para su calibración el ajuste de unos parámetros  $\theta$ .

$$V_{iq} = (x_{iq} | \theta)$$

En la mayor parte de los modelos de elección discreta que se emplean en la actualidad, se emplean funciones lineales en los parámetros para representar esta utilidad observada, de este modo:

$$V_{iq} = \sum_{k=1}^K \theta_{ik} x_{ikq}$$

En que se supone que los parámetros  $\theta$  son constantes para todos los individuos. Para que la descomposición de  $U$  en  $V$  y  $\varepsilon$  sea relativamente adecuada, se necesita que la población en estudio sea homogénea. Por esto, se suele señalar que se requiere que los individuos tengan las mismas alternativas y enfrenten las mismas restricciones. Para lograr esto puede ser necesario segmentar la demanda.

Un individuo elegirá una de las alternativas si y sólo si una de ellas maximiza su utilidad, es decir:

$$V_{iq} + \varepsilon_{iq} \geq V_{jq} + \varepsilon_{jq}$$

El término no observable  $\varepsilon$  se asume estar distribuido en forma idéntica e independiente entre alternativas y su existencia se atribuye a la no inclusión de atributos no incluidos en el modelo de decisión, por ende, el analista del problema no puede seleccionar la alternativa que maximiza la utilidad, lo único que puede hacer es estimar la probabilidad de tomar una decisión.

En el concepto anterior hay una hipótesis fundamental: el término no observable  $\varepsilon$  es el valor máximo de todos los atributos no medidos directamente por el observador. El máximo de muchas variables aleatorias distribuidas idéntica e independientemente aproximadamente se comportan como una distribución de densidad de probabilidad Gumbel, por lo que:

$$\varepsilon_{iq} \sim \text{Gumbel}(0, \mu)$$

La probabilidad de que alguien elija una alternativa depende fundamentalmente de la diferencia en los errores  $e_{iq}$  y  $e_{jq}$ .

La diferencia de dos distribuciones Gumbel se distribuye de forma logística, por lo que la probabilidad del uso de una alternativa  $i$  es:

$$P_i = \frac{1}{1 + \sum_{j \neq i} \exp(V_j - V_i)}$$

## 4.2 Estimación del Valor Subjetivo del Tiempo

El Valor Subjetivo del Tiempo (VST) es la tasa de sustitución de tiempo y costo a utilidad constante.

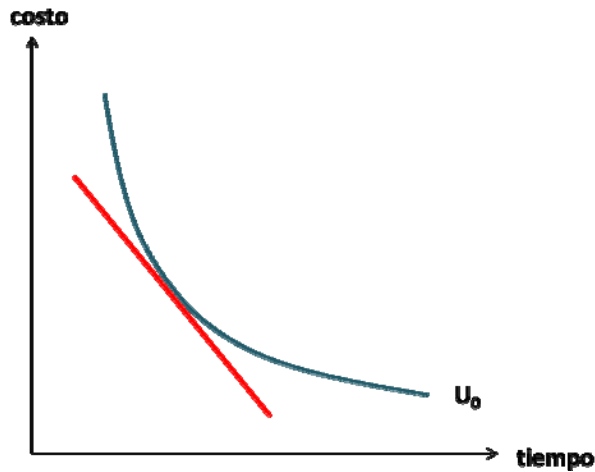


Figura 8. Interpretación gráfica del Valor Subjetivo del Tiempo (VST)

Fuente: Elaboración propia

Matemáticamente el VST es la derivada parcial de la función de utilidad respecto al tiempo y costo:

$$VST = \frac{\partial V_i / \partial t}{\partial V_i / \partial c} \Bigg|_{U_0}$$

Partiendo del hecho de que dos variables fundamentales en la selección de una alternativa de viaje son el tiempo y el costo, entonces la utilidad para cada alternativa  $i$  puede definirse como una función lineal.



$$V_i = \theta_t \text{Tiempo}_i + \theta_c \text{Costo}_i + \theta_0$$

En esta condición el VST simplemente es el cociente:

$$VST = \frac{\theta_t}{\theta_c}$$

En caso de que la utilidad no sea lineal, será necesario calcular las derivadas parciales y posteriormente el VST.

### 4.3 Preferencia Declarada

La Encuesta de Preferencia Declarada (PD) es el mecanismo mediante el cual es posible determinar los VST de los segmentos de demanda que se asume podrán hacer uso de una nueva infraestructura.

Su planteamiento consiste en mostrar al usuario potencial un conjunto de alternativas de viaje no existentes en la actualidad. Bajo este contexto es muy relevante que en su aplicación el encuestado comprenda y se involucre en el planteamiento y revele, a través de sus respuestas, sus verdaderas preferencias. Debido a esta razón es necesario plantear alternativas realistas. Un mal diseño de las alternativas puede conducir a la obtención de resultados de baja calidad e inservibles. Deben evitarse diseños complejos, ambigüedades en el planteamiento de las alternativas o entornos no adecuados de aplicación. Es por ello que deberá tenerse observancia de los aspectos siguientes:

- Definición del contexto, y selección de las variables de interés y sus niveles de variación esperados. En el ámbito de vías de cuota en donde los tiempos y costos son variables fundamentales deberá constatarse el no uso de propuestas de costos demasiado altos o bajos o bien tiempos de viaje demasiado optimistas.
- Diseño preliminar del cuestionario, pre-test y revisión; esta etapa debiera permitir detectar errores flagrantes en el diseño, así como inconsistencias u otros problemas que tengan como resultado disminuir el realismo del experimento. Deberá cuidarse incluso el lenguaje para plantear las distintas situaciones hipotéticas a los encuestados.
- El sitio de aplicación en terreno debe ser adecuado para que el encuestado responda con tranquilidad y seguridad.
- Prueba piloto en terreno, con una muestra reducida (por ejemplo 50 casos), en que no sólo se verifica la calidad de diseño del cuestionario sino que la forma más apropiada de aplicarlo en terreno.
- Revisión, rediseño y preparación de la encuesta definitiva; en esta fase se puede verificar la recuperación de los parámetros utilizando una muestra simulada (Ortúzar y Willumsen, 2001, Cap. 3)

- A cada encuestado se le presentarán no una, sino varios escenarios hipotéticos. El número de escenarios no deberá ser excesivo, pues de otra manera se corre el riesgo de recabar respuestas apresuradas. En general se recomienda no plantear más de 8 escenarios.



Figura 9. Bahía de encuesta para recopilación de encuestas OD y de PD

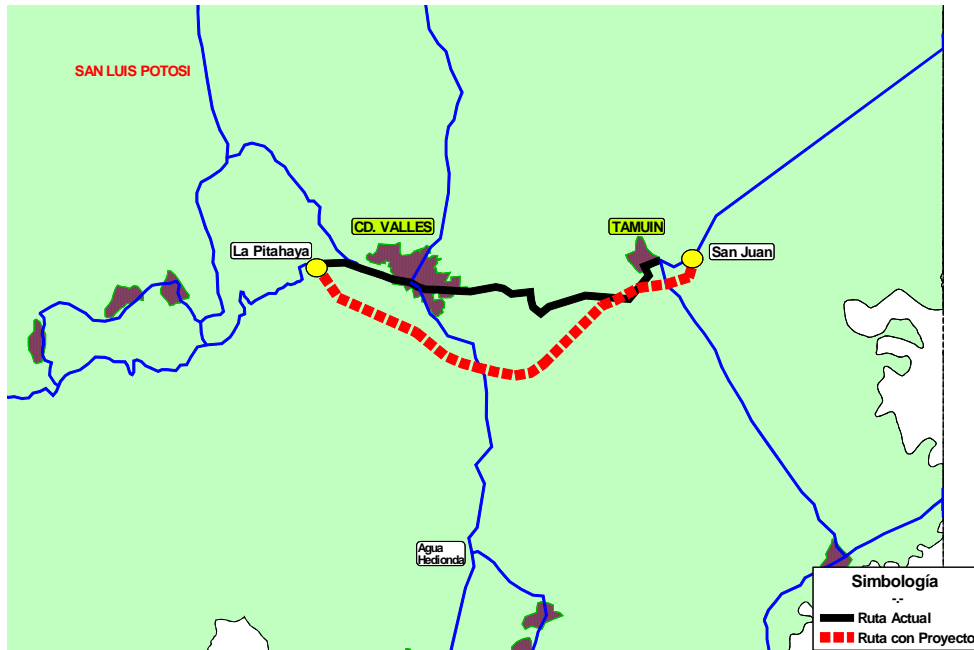


Figura 10. Ejemplo de planteamiento de un nuevo proyecto para PD

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Ejemplo de planteamiento de escenarios

**AUTOMÓVIL**  
**TRAYECTO TAMUÍN - LA PITAHAYA** VIAJE LARGO

SITUACION	Actual ( A )		Con Proyecto ( P )		Tiempo
	Tiempo	Costo Peaje	Tiempo	Costo Peaje	Tiempo
1	50 Min	0	35 Min	\$ 50	15 Min
2	50 Min	0	25 Min	\$ 60	25 Min
3	50 Min	0	30 Min	\$ 40	20 Min
4	50 Min	0	35 Min	\$ 40	15 Min
5	50 Min	0	30 Min	\$ 50	20 Min
6	50 Min	0	30 Min	\$ 60	20 Min
7	50 Min	0	25 Min	\$ 40	25 Min

Fuente: Elaboración propia

Cada una de las situaciones planteadas en la cédula anterior representa cada escenario hipotético planteado al usuario.

#### 4.4 Preparación de datos

Una vez recabada la información de campo se requiere estructurar una base de datos codificada numéricamente para estimar tanto los coeficientes de las funciones de utilidad como una serie de indicadores que permiten evaluar la calidad de los resultados obtenidos.

En el mercado existen algunas herramientas informáticas que permiten llevar a cabo estos análisis. Entre las más conocidas están SPSS, Alogit y Biogeme. Para fines de esta tesis se hará referencia a esta última herramienta.

##### 4.4.1 Formato de datos

Para obtener los análisis con Biogeme se requiere integrar un archivo de texto en donde el primer renglón deberá contener el nombre de las variables separadas al menos por un espacio en blanco, cada respuesta obtenida deberá colocarse en un renglón con toda la información asociada al ejercicio de PD. De esta manera si, por ejemplo, se encuestó a 100 usuarios y a cada uno se le plantearon 8 escenarios, entonces la base de datos deberá contener 800 registros.

ID	Tarjeta	tipo_vehí	mot_vje	nivel_ing	C0	T0	C1	T1	Resp	Dia	Diseño
1	23511	1	1	2	4	0	30	40	25	1	1
2	23511	2	1	2	4	0	30	50	15	0	1
3	23511	3	1	2	4	0	30	30	20	0	1
4	23511	4	1	2	4	0	30	30	25	0	1
5	23511	5	1	2	4	0	30	40	20	0	1
6	23511	6	1	2	4	0	30	50	20	0	1
7	23511	7	1	2	4	0	30	30	15	0	1
8	23512	1	1	1	1	0	30	40	25	2	1
9	23512	2	1	1	1	0	30	50	15	2	1
10	23512	3	1	1	1	0	30	30	20	2	1
11	23512	4	1	1	1	0	30	30	25	1	1
12	23512	5	1	1	1	0	30	40	20	2	1
13	23512	6	1	1	1	0	30	50	20	1	1
14	23512	7	1	1	1	0	30	30	15	2	1
15	23513	1	1	2	1	0	50	50	35	2	1
16	23513	2	1	2	1	0	50	60	25	2	1
17	23513	3	1	2	1	0	50	40	30	2	1
18	23513	4	1	2	1	0	50	40	35	2	1
19	23513	5	1	2	1	0	50	50	30	2	1
20	23513	6	1	2	1	0	50	60	30	1	1
21	23513	7	1	2	1	0	50	40	25	2	1
22	23514	1	1	1	1	0	30	40	25	1	1
23	23514	2	1	1	1	0	30	50	15	1	1
24	23514	3	1	1	1	0	30	30	20	1	1
25	23514	4	1	1	1	0	30	30	25	1	1
26	23514	5	1	1	1	0	30	40	20	1	1
27	23514	6	1	1	1	0	30	50	20	1	1
28	23514	7	1	1	1	0	30	30	15	2	1
29	23514	7	1	1	1	0	30	30	15	2	1

Figura 11. Ejemplo archivo de texto para procesamiento de PD

#### 4.4.2 Especificación del modelo

Además de archivo de texto con la recopilación de respuestas y de los valores expuestos a cada encuestado, es necesario preparar un archivo con extensión \*.mod en donde se especifican los parámetros que servirán para estimar los coeficientes de regresión de la función de utilidad, así como definir qué registros serán considerados en el análisis.

A continuación se hará una breve descripción de las secciones más importantes del archivo de especificación del modelo.

**Sección Choice.** Especifica cuál es la variable que representa las respuestas del encuestado. Es común codificar 1 como “Uso la alternativa sin proyecto” y 2 “Uso la alternativa con proyecto”.

Ejemplo:

[Choice]  
Resp

**Sección Beta.** En esta sección se listan los coeficientes de regresión involucradas en la definición de las funciones de utilidad. Se define su valor inicial, el rango de valores que podría tomar cada coeficiente y finalmente si el valor a estimar es variable o fijo. Se ejemplifica un caso:

```
[Beta]
// Name      Value  LowerBound  UpperBound  status (0=variable, 1=fixed)
CoefC       0      -10000      10000      0
CoefT       0      -10000      10000      0
K           0      -10000      10000      0
```

**Sección Utilities.** En esta sección se realiza de descripción de las funciones de utilidad para aquellos usuarios que optan por usar la alternativa sin proyecto y con proyecto. Hay tres elementos adicionales que deben ser definidos, en primer lugar un número consecutivo que identifique cada función de utilidad, en segundo lugar un nombre para la alternativa (en el ejemplo denominados ALT1 y ALT2), y en tercer lugar una variable de disponibilidad que debe estar contenida en el archivo de texto y cuyo valor es 1 si el registro debe ser considerado en el análisis ó 0 en caso contrario. A continuación un ejemplo:

```
[Utilities]
// Id  Name Avail  linear-in-parameter expression (beta1*x1 + beta2*x2 + ... )
1     ALT1  Disp  CoefC * C0 + CoefT * T0
2     ALT2  Disp  CoefC * C1 + CoefT * T1 + K * one
```

En el ejemplo anterior la ALT2 tiene como tercer elemento una constante K. Para su correcta interpretación debe expresarse como el producto de dos variables.

**Sección Expression.** Aquí se definen todas las variables y/o expresiones aritméticas que no están contenidas en el archivo de texto. Haciendo referencia al caso anterior, será necesario definir la variable one para expresar el tercer elemento de ALT2 como producto.

```
[Expressions]
one = 1
```

**Sección Exclude.** En esta sección se especifican todos los criterios que aplican para seleccionar los registros de interés. Por ejemplo en el caso siguiente se especifica que deberán omitirse del análisis aquellas registros cuya respuesta sea inferior a uno y los registros en los cuales el valor tipo\_vehí sea diferente de uno.

```
[Exclude]
Resp < 1 || tipo_vehí != 1
```

**Sección Model.** Especifica cuál es el tipo de modelo a ser estimado. Las alternativas son: Logit Multinomial \$MNL, Logit Anidado \$NL, Logit de Cruce Anidado o Cross-Nested Logit \$CNL y el modelo GEB de redes \$NGEV.

```
[Model]
$MNL
```

#### 4.4.3 Ejecución de la aplicación

Una vez hecha la preparación del archivo de texto y del modelo, entonces mediante uso del símbolo de sistema será necesario aplicar el comando en el directorio en donde se haya instalado la aplicación.

```
C:\Biogeme>Biogeme modelo datos.dat
```

#### 4.5 Obtención de estadísticos e indicadores

Posterior a la ejecución de la aplicación se obtienen un conjunto de resultados e indicadores que permiten determinar la calidad de los resultados.

Model:	Multinomial Logit
Number of estimated parameters:	3
Number of observations:	10419
Number of individuals:	10419
Null log-likelihood:	-7221.900
Cte log-likelihood:	-7145.647
Init log-likelihood:	-7221.900
Final log-likelihood:	-6321.838
Likelihood ratio test:	1800.124
Rho-square:	0.125
Adjusted rho-square:	0.124
Final gradient norm:	+8.495e-003
Diagnostic:	Convergence reached...
Iterations:	12
Run time:	00:01
Variance-covariance:	from analytical hessian
Sample file:	PD_Ejemplo.txt

Se hará una descripción de los resultados más relevantes y su interpretación.

##### 4.5.1 Verosimilitud (Likelihood)

La verosimilitud es una función de los parámetros de un modelo estadístico que permite hacer inferencias de su valor a partir de un conjunto de observaciones y matemáticamente se expresa como:

$$LL(\theta) = \sum_{n=1}^N \sum_i y_{iq} \ln(P_{iq})$$

En términos prácticos se trabaja con el logaritmo de la verosimilitud, denominándose log-verosimilitud (log-likelihood). En la expresión anterior  $y_{iq} = 1$  si el individuo  $q$  ha escogido la alternativa  $i$  y cero en otro caso, todo esto para cada  $n$ -ésima observación de la muestra.

Entonces, lo que se pretende, conocidas las preferencias de cada individuo frente a cada alternativa, es estimar el vector  $\beta$  que maximice la verosimilitud, en otras palabras, maximizar la sumatoria de los logaritmos de las probabilidades de cada individuo. Este método es conocido como máxima verosimilitud y su valor se denomina log-verosimilitud final  $L^*$ . Existen dos log-verosimilitudes de interés correspondientes a modelos restringidos que son de particular interés, pues su comparación con la log-verosimilitud final permiten evaluar la calidad de la regresión. Se explican a continuación.

#### 4.5.2 Log verosimilitud nula (Null log likelihood)

Se define como la log-verosimilitud de una muestra para un modelo Logit Multinomial en donde todos los parámetros  $\beta$  son iguales a cero. Se calcula como:

$$L^0 = \sum_{n \in \text{Muestra}} w_n \ln \frac{1}{C_n}$$

donde,

$C_n$ . Es el número de alternativas disponibles para el individuo  $n$ .

$w_n$ . Es la ponderación.

#### 4.5.3 Log verosimilitud constante (Constant log likelihood)

En un modelo Logit Multinomial es la log verosimilitud de una muestra en donde los únicos coeficientes son las constantes específicas de cada alternativa. Si todas las alternativas siempre están disponibles, entonces se estima como:

$$L^c = \sum_{j \in C} n_j \ln(n_j) - n \ln(n)$$

donde,

$n_j$  es el número de veces que la alternativa  $j$  ha sido elegida

$n$ , es el número de observaciones de la muestra

#### 4.5.4 Parámetro de relación de verosimilitudes (Likelihood ratio test)

Compara las verosimilitudes de los modelos restringidos y no restringidos.

$$LR = -2(L^0 - L^*)$$

donde,

$L^0$  – Log verosimilitud nula.

$L^*$  - Log verosimilitud final.

Siempre la verosimilitud no restringida, es decir  $L^*$  será mayor que la verosimilitud restringida  $L^0$ , debido a que los residuos en los modelos no restringidos son menos que los residuos para modelos restringidos.

Este concepto puede aplicarse para determinar si es adecuado segmentar la demanda de un conjunto de observaciones y explicar de mejor manera la preferencia de los usuarios. Para el caso de una vía de cuota, será interesante saber por ejemplo si el mercado de automóviles debe ser segmentado por motivo de viaje o por ingreso o bien si no vale la pena segmentarlo. El valor calculado se compara con un valor crítico de la distribución chi cuadrada de acuerdo con el número de restricciones y nivel de confianza deseados. Para tal fin, se evalúa como:

$$LR = -2(L_T - \sum L_i) \sim \chi_{nr,nc}^2$$

donde,

$L_T$ . Log verosimilitud final de la muestra total.

$L_j$ . Log verosimilitud de cada segmentación de muestra  $i$ .

$\chi_{nr,nc}^2$  – Valor de la función Chi Cuadrada para  $nr$  grados de libertad, que es igual al número de coeficientes a estimar menos uno, y para un  $nc$  nivel de confianza.

Finalmente si:

$LR > \chi_{nr,nc}^2$  es recomendable segmentar la muestra.

$LR < \chi_{nr,nc}^2$  no es recomendable segmentar la muestra.

Esto sólo es posible de aplicar cuando un modelo es una versión restringida de otro

#### 4.5.5 Máxima verosimilitud nula y constante

Compara la verosimilitud final con la que teóricamente podría alcanzarse respecto a las verosimilitudes restringidas. Varía entre 0 y 1 en donde resultados cercanos a cero indicarían que el modelo propuesto no representa la preferencia del usuario adecuadamente.

$$\rho^2(0) = 1 - \frac{L^*}{L^0}$$

$$\rho^2(C) = 1 - \frac{L^*}{L^C}$$

En Biogeme sólo se reporta  $r^2(0)$  y se enuncia como Rho-square.

En la práctica profesional se ha constatado que modelos de selección con valores entre 0.2 y 0.5 brindan los mejores resultados.



#### 4.5.6 Parámetros de utilidad

Esta sección del reporte de resultados muestra el valor calculado de cada coeficiente y/o constante de las funciones de utilidad, así como algunos otros indicadores que determinan si la variable a la que está asociado cada coeficiente es significativa.

**Tabla 10. Evaluación de coeficientes de regresión**

Name	Value	Std err	t-test	p-value
CoefC	-0.0836	0.00266	-31.42	0.00
CoefT	-0.153	0.00496	-30.90	0.00
K	0.944	0.100	9.44	0.00

Los programas de estimación entregan, en convergencia, la matriz de covarianza  $S = \{\sigma_{kk}^2\}$  que contiene los errores estándar de los parámetros estimados. De este modo, si  $\theta_k = 0$ , se puede definir el valor  $t$  por:

$$t = \frac{\hat{\theta}_k}{\sigma_{kk}} \sim N(0,1)$$

Con esto es posible evaluar si  $\theta_k$  es significativamente distinto de cero. Es una aproximación para muestras grandes en que  $t$  se prueba con la distribución Normal. Así, si  $t > 1.96$  para  $(1 - \alpha) = 95\%$ , se rechaza la hipótesis nula  $\theta_k = 0$  y se acepta que el atributo  $x_k$  tiene un efecto significativo.

#### 4.5.7 Funciones de utilidad

En el reporte de resultados se enuncian las funciones de utilidad para cada alternativa, así como la disponibilidad representada por la variable binaria de disponibilidad (availability)

**Tabla 11. Definición de funciones de utilidad por alternativa**

Id	Name	Availability	Specification
1	ALT1	Disp	CoefC * C0 + CoefT * T0
2	ALT2	Disp	CoefC * C1 + CoefT * T1 + K * one

#### 4.5.8 Covarianza y correlación entre coeficientes

La covarianza es un valor que indica el grado de variación conjunta de dos variables aleatorias. Es el dato básico para determinar si existe una dependencia entre ambas variables y además es el dato necesario para estimar otros parámetros básicos, como el coeficiente de correlación lineal o la recta de regresión

El valor de la covarianza tiene tres posibles casos:

- Si  $S_{xy} > 0$  hay dependencia directa (positiva), es decir, a grandes valores de  $x$  corresponden grandes valores de  $y$ .
- Si  $S_{xy} = 0$  Una covarianza próxima a cero se interpreta como la no existencia de una relación lineal entre las dos variables estudiadas, lo que indicaría independencia entre variables.
- Si  $S_{xy} < 0$  hay dependencia inversa o negativa, es decir, a grandes valores de  $x$  corresponden pequeños valores de  $y$ .

La correlación indica la medida de asociación lineal que existe entre dos variables aleatorias. Se considera que dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra, de forma que, si tenemos dos variables existe correlación si al aumentar los valores de la primera lo hacen también los de la segunda y viceversa. La correlación entre dos variables no implica, por sí misma, ninguna relación de causalidad. Este aspecto sólo es posible determinarlo mediante la interpretación natural que exista entre las variables.

La correlación lineal varía en el intervalo  $-1 \leq r \leq 1$  y mide la relación lineal entre dos variables  $X$  y  $Y$ , si  $X$  se emplea para predecir  $Y$  y viceversa con la siguiente interpretación:

- Si  $r = -1$  indica una asociación lineal negativa.
- Si  $r = 0$  indica la no existencia de una asociación lineal entre las variables.
- Si  $r = 1$  indica una asociación lineal positiva.

Tabla 12. Covarianza y correlación entre coeficientes

Coefficient1	Coefficient2	Covariance	Correlation	t-test	p-value
CoefC	K	-0.000201	-0.756	-10.07	0.00
CoefT	K	0.000116	0.234	-11.09	0.00
CoefC	CoefT	5.68e-006	0.430	15.46	0.00

## 5 Asignación de demanda a través del método de selección de ruta por costo generalizado

---

### 5.1 Fundamento

En una red vial integrada por arcos que tienen asociados costos y tiempos existirá una ruta más corta en términos de costo generalizado para cada par origen-destino. La asignación de viajes bajo este criterio se denomina todo o nada. El método es simple, pero sin embargo presenta dos inconvenientes, el primero es que podría asignarse más tránsito al que físicamente es posible admitir y por otro lado es que los usuarios no siempre usan la ruta mínima.

De hecho, los usuarios que se trasladan entre dos puntos, pueden emplear distintas trayectorias fundamentalmente por tres razones:

- 1) Diferencias en los objetivos de viaje, mientras un usuario desea minimizar tiempos, otro puede optar por evitar el pago de peajes.
- 2) Congestión en uno o más arcos, lo que provoca la búsqueda de alternativas para evitar embotellamientos.
- 3) Diferencias en la percepción de atributos de las distintas rutas, así como la imprecisión para estimar tiempos y distancias de viaje,

Para subsanar la primera de estas deficiencias es recomendable modelar identificando distintos grupos de usuarios que sean lo más homogéneos posibles en términos de sus objetivos en la selección de ruta.

La segunda razón se refiere al hecho de que en la medida en que algunas rutas se congestionan, los tiempos de viaje aumentan haciendo más atractivas otras rutas alternativas.

Para resolver la tercera razón podrían emplearse modelos estocásticos que contemplan que los costos de cada segmento no son percibidos con exactitud, sin embargo no es recomendable el uso de métodos estocásticos para la modelación de vías de cuota por las siguientes razones: estos métodos son muy sensibles a la forma en que se codifica la red pudiendo generarse comportamientos difíciles de racionalizar, y por otro lado, el uso de números aleatorios producen resultados que dependen de la semilla utilizada. Estos aspectos hacen que la interpretación de los resultados sea difícil y poco confiable.

En contraparte, la asignación de equilibrio del usuario modela condiciones en que los viajeros buscan sus mejores rutas hasta que encuentran la mejor bajo el primer principio de Wardrop que aplicado al caso de redes con vías de cuota implica que en situaciones de congestión se logran condiciones de equilibrio cuando todas las rutas en uso para cada par origen-destino tienen el mismo costo y las que no se usan tienen un costo igual o mayor.

El uso del equilibrio de Wardrop tiene propiedades ventajosas como el hecho de que si la función flujo-costo generalizado es monótonamente creciente, entonces se tendrá una solución única.

Matemáticamente el problema es el siguiente:

Sea  $C_a$  la función de flujo-costo para el arco  $a$  y volumen  $V_a$  y la variable binaria  $\delta_{ijr}^a$  que toma el valor 1 si la ruta  $r$  entre  $i$  y  $j$  pasa por el arco  $a$ , y cero en caso contrario.

El volumen en el arco  $a$  en función de la matriz de viajes  $T_{ijr}$  se define como:

$$V_a = \sum_{ijr} \delta_{ijr}^a T_{ijr}$$

El costo por viajar por la ruta  $r$  se expresa como:

$$C_r = \sum_a \delta_{ijr}^a C_a(V_a)$$

Entonces se trata de minimizar la función objetivo siguiente:

$$Z(T_{ijr}) = \sum_a \int_0^{V_a} C_a(v) dv$$

Sujeto a las restricciones:

$$\sum_r T_{ijr} = T_{ij}$$

$$T_{ijr} \geq 0$$

Actualmente las aplicaciones de asignación como Emme, TransCAD permiten aplicar este método de asignación incluso con diferentes clases de usuarios.

## 5.2 Segmentación de la demanda

### 5.2.1 Automóviles

Es recomendable segmentar a los usuarios de automóviles distinguiendo a quienes cubren sus gastos por cuenta propia y a quienes reciben viáticos de su empresa para solventar su viaje. Otro criterio de segmentación recomendable es el motivo de viaje; los viajeros que viajan por trabajo perciben los atributos de viaje de forma distinta a quienes lo hacen por placer o compras, además de que habitualmente los viajes por trabajo en condiciones normales representan el grupo más numeroso y con más frecuencia respecto a los otros motivos de viaje, a menos que se trate de una zona turística. El ingreso también es un criterio recomendable de segmentación.

### 5.2.2 Camiones

En el caso de los vehículos de carga es adecuado segmentar a los usuarios por el número de ejes y por la tenencia del vehículo. En cuanto al primer criterio es relevante homologar el criterio de segmentación de acuerdo al cobro que se hace en vías de cuota. Habitualmente en vías de cuota se usan tres tarifas para este tipo de vehículos agrupándose en camiones unitarios o camiones de 2 a 4 ejes y que se refiere fundamentalmente a vehículos sin remolque e integrados por vehículos de un solo cuerpo, camiones articulados de un remolque o camiones de 5 a 6 ejes y camiones articulados de dos remolques o camiones con 7 ejes o más correspondiendo a los denominados fulles.

Estos grupos se abrevian comúnmente como CU, CA1 y CA2. En cuanto al segundo criterio, es recomendable distinguir a aquellos usuarios que son dueños de su unidad y por ende, recaen en ellos la toma de decisión en cuanto al uso de vías de cuota a no, y aquellos usuarios que son empleados de empresas transportistas en donde se fijan políticas de operación en las cuales es común el pago de un seguro por el movimiento de carga en donde se exige el uso de vías de cuota por seguridad y rapidez, y en donde incluso se hace un seguimiento en tiempo real de la unidad. Vale la pena mencionar que en el caso de Camiones Unitarios es más común que se presenten usuarios dueños de su unidad u hombre-camión, mientras que en el caso de Camiones Articulados es menos común.

### 5.2.3 Autobuses

En cuanto a los autobuses se recomienda distinguir entre las distintas vocaciones de servicio:

- Buses con servicio de primera. Se refiere a autobuses con itinerario fijo y en donde el ascenso y descenso de pasajeros se hace generalmente en terminales y cubren trayectos relativamente largos. Esta modalidad de servicio implica el uso de vías de cuota, pues el objetivo minimizar el tiempo de viaje.
- Buses con servicio de segunda o alimentador. También operan con un itinerario fijo, pero cubriendo tramos más cortos, permitiendo el ascenso y descenso no sólo en terminales, sino también en parabuses. Cumplen más bien las funciones de un servicio público suburbano, y por tanto, harán más bien uso de vías libres de peaje.
- Buses turísticos. Este tipo de servicio se emplea por agencias de viaje o promotores turísticos en donde el objetivo es transportar a un grupo de viajeros principalmente por motivo de ocio. Se trata de un servicio de fletamiento, sin itinerario fijo, en donde la decisión del uso de vías de cuota depende de las políticas de la empresa o del dueño de la unidad.

### 5.3 Calibración del modelo

La calibración es el mecanismo a través del cual se garantiza que el modelo de redes representa adecuadamente la región en estudio de manera que:

- La red tenga una extensión suficiente para representar la movilidad de los viajes.
- Representar de manera realista los costos de operación de los distintos grupos vehiculares así como de la función flujo-tiempo.
- Representar los costos adicionales, es decir los peajes, como un costo monetario y no como una demora de tiempo.
- Emplear suficientes categorías de usuarios y que cada una tenga un valor de tiempo (VST) apropiado.
- Garantizar que las matrices utilizadas en el modelo sean lo más realistas posibles.

En términos prácticos la calibración se trata de comparar los volúmenes asignados por el modelo respecto a los observados en campo.

La calibración se analiza con las siguientes pruebas:

- Dispersión de volúmenes observados vs asignados.
- Indicador GEH (del nombre de Geoffrey E. Havers)
- Indicador %RMSE (Percentage Root Mean Square Error)

A continuación se describe cada uno de ellos.

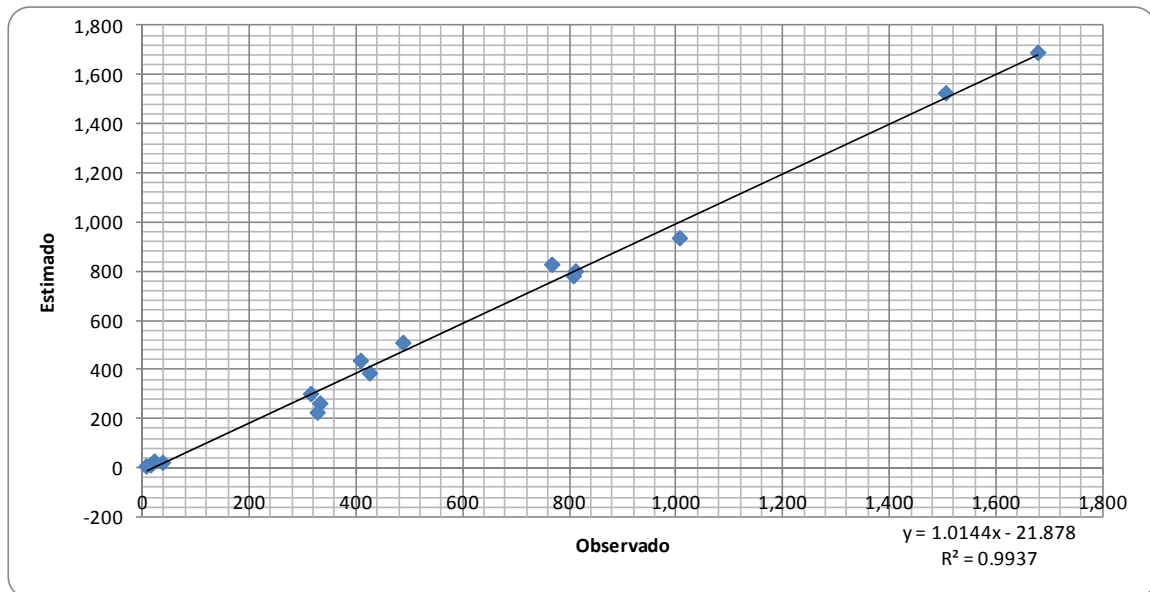
#### 5.3.1 Dispersión de volúmenes

La calibración del modelo se representa en gráficas de dispersión de los volúmenes vehiculares observados versus asignados por periodo de modelación, grupo vehicular y estación. Al graficar cada par ordenado es posible obtener una recta de regresión por mínimos cuadrados en donde es deseable que:

- Su pendiente sea cercana a uno
- La ordenada al origen sea próxima a cero.
- El valor de  $R^2$  sea superior a 0.7

En la Gráfica 7 se observa un ejemplo de la presentación de resultados.

Gráfica 7. Ejemplo de la gráfica de dispersión de volúmenes observados y asignados



Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.2 Calibración por el indicador GEH

El indicador GEH tiene la ventaja de tomar en cuenta el error relativo y de no depender de valores nulos que pueden aparecer. Este indicador se define como:

$$GEH = \sqrt{\frac{(O_i - E_i)^2}{0.5 \times (O_i + E_i)}}$$

donde,

$O_i$  : Valores observados de una variable, conteos diarios en un arco  $i$ .

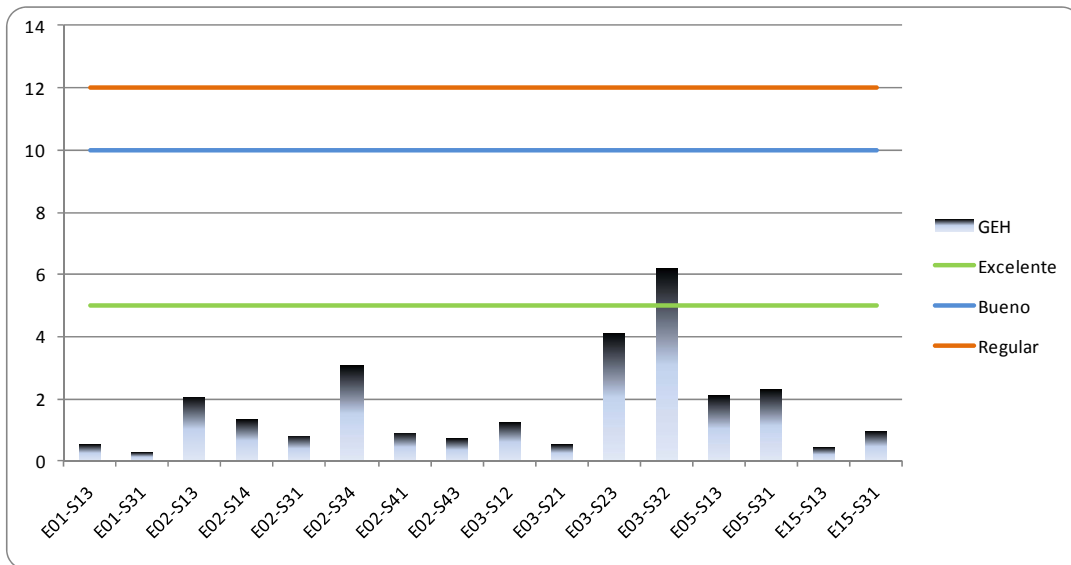
$E_i$  : Valores modelados de la misma variable, volúmenes diarios en el mismo arco  $i$ .

Generalmente se acepta que un modelo de asignación de tráfico está bien calibrado si:

- Al menos el 60% de las asignaciones de cada estación de encuesta tienen un GEH inferior a 5.0.
- El 95% de las asignaciones de cada estación de encuesta tienen un GEH inferior a 10.0.
- Todos las asignaciones de cada estación de encuesta tienen un GEH inferior a 12.0 (Ver

En la siguiente gráfica se presenta un ejemplo de la presentación de resultados de la calibración por el método de GEH.

Gráfica 8. Ejemplo resultados de la calibración por el método GEH



Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.3 Calibración por raíz cuadrada del error cuadrático porcentual

El indicador %RMSE (Percentage Root Mean Square Error, o raíz cuadrada del error cuadrático porcentual) se aplica a la red completa de observaciones. Se define como:

$$\% RMSE = \frac{100 \sqrt{\frac{\sum (E_i - O_i)^2}{Nobs - 1}}}{\frac{\sum O_i}{Nobs}}$$

donde,

$O_i$ : Valores observados de una variable, conteos diarios en un arco  $i$ .

$E_i$ : Valores modelados de la misma variable, volúmenes diarios en el mismo arco  $i$ .

$N_{obs}$ : Número de observaciones (aforos en este caso).

Generalmente se requiere que el porcentaje RMSE sea inferior a 30%.



## 6 Asignación de demanda a través del método de selección explícita de vías de cuota

Estos modelos se fundamentan en el uso de funciones logit, producto de la preferencia declarada, para determinar la proporción de usuarios de cada clase que harían uso de vías de cuota.

### 6.1 Fundamento

Para este planteamiento, se emplean los siguientes subíndices y superíndices:

- $i \in I$ , representa cada uno de los  $i$ -ésimos pares OD del conjunto total  $I$  de pares OD.
- $c \in C$ , representa cada una de las  $c$  clases de usuarios del conjunto total de  $C$  clases integrantes de la demanda total por asignar.
- $a \in A$ , representa cada uno de los  $a$  arcos que integran la red de transporte  $R(N, A)$  compuesta de un conjunto de  $N$  nodos y  $A$  arcos.
- $k \in K_i^c$ , representa cada una de las  $k$  rutas para desplazarse por el  $i$ -ésimo para OD para la clase  $c$  de usuarios.
- El superíndice  $ct$  indica usuarios de la clase  $c$  que usan vías de cuota, mientras que el superíndice  $cn$  se refiere a usuarios de la clase  $c$  que no usan vías de cuota.
- $h_k$  representa el flujo de cada  $k$ -ésima ruta.

Sean:

$g_i^{ct}$  el número de usuarios de la clase  $c$  quienes están dispuesto a pagar peajes.  
 $g_i^{cn}$ , el complemento de la clase  $c$  que no pagan peajes.

Por lo tanto:

$$g_i^c = g_i^{ct} + g_i^{cn}, i \in I, c \in C$$

Se considera además, que la demanda  $g_i^c$  es fija y conocida.

Se define también  $K_i^{ct}$  y  $K_i^{cn}$  como el conjunto de rutas que contienen vías de cuota y aquellas que no las contienen, respectivamente.

El modelo se plantea de la siguiente forma:

$$\left. \begin{array}{l} s_k^{ct}(v) = u_i^{ct}, \text{ si } h_k > 0 \\ s_k^{ct}(v) \geq u_i^{ct}, \text{ si } h_k = 0 \end{array} \right\} k \in K_i^{ct}, i \in I, c \in C$$

$$\left. \begin{array}{l} s_k^{cn}(v) = u_i^{cn}, \text{ si } h_k > 0 \\ s_k^{cn}(v) \geq u_i^{cn}, \text{ si } h_k = 0 \end{array} \right\} k \in K_i^{cn}, i \in I, c \in C$$

$$\sum_{k \in K_i^c} h_k - g_i^c = 0, i \in I, c \in C$$

$$\sum_{k \in K_i^{cn}} h_k - g_i^{cn} = 0, i \in I, c \in C$$

donde,

La función de tiempo de viaje de la  $k$ -ésima ruta perteneciente a la clase  $c$  de usuarios, cuyo valor del tiempo es  $\tau^c$ , y cuyo peaje asociado es  $t_a^c$  y con tiempo de viaje  $s_a$  (expresado como función volumen demora) se expresa como:

$$s_k^c(v) = \sum_{a \in A} d_{ak}(s_a(v_a) + t_a^c \theta^a), \forall k \in K_i^c, i \in I, c \in C$$

En la ecuación anterior  $v_a$  representa la sumatoria de vehículos de todas las clases que circulan en el arco  $a$ .

La variable binaria  $d_{ak}$  toma el valor 1 si la ruta  $k$  pasa por el arco  $a$ , y cero en caso contrario.

El cálculo de la demanda de cada  $i$ -ésimo par OD para la clase  $c$  que hace uso de rutas con vías de cuota es:

$$g_i^{ct} = \frac{g_i^c}{1 + \exp(\alpha^c t_i^c + \beta^c (u_i^{ct} - u_i^{cn}))}$$

Y por tanto, la demanda que no usa vías de cuota es:

$$g_i^{cn} = g_i^c - g_i^{ct}$$

En donde  $t_i^c$  es el peaje pagado por los usuarios que usan el  $i$ -ésimo par OD.

Existe una dificultad con esta formulación debido a que las rutas empleadas no se conocen antes del cálculo del equilibrio de flujos. Además, el número posible de rutas es grande. Por otro lado hay una formulación equivalente en términos de la proporción de la demanda que usa la  $k$ -ésima ruta, se denominará a esta proporción como  $p_k$ . Entonces, los flujos  $h_k$  de cada ruta pueden expresarse como:

$$\left. \begin{aligned} h_k &= p_k g_i^{ct}, k \in K_i^{ct} \\ h_k &= p_k g_i^{cn}, k \in K_i^{cn} \end{aligned} \right\} i \in I, c \in C$$

Los flujos de cada arco se expresan entonces como:

$$v_a^{ct} = \sum_{k \in K_i^{ct}} d_{ak} p_k g_i^{ct}, a \in A, c \in C$$

$$v_a^{CN} = \sum_{k \in K_i^{CN}} \delta_{ak} p_k \theta_i^{CN}, a \in A^N$$

En donde  $A^N$  es la subred que contiene a todos los arcos que no pertenecen a vías de cuota.

Entonces el volumen total de circulando en el arco  $a$ .

$$v_a = \sum_{c \in C} (v_a^{CC} + v_a^{CN}), a \in A$$

El costo de las rutas para vías de cuota y libres son respectivamente:

$$s_k^{CC}(v) = \sum_{a \in A} \delta_{ak} s_a(v_a), k \in K_i^{CC}, i \in I$$

$$s_k^{CN}(v) = \sum_{a \in A^N} \delta_{ak} s_a(v_a), k \in K_i^{CN}, i \in I$$

La formulación en el ámbito de las proporciones de volúmenes en cada ruta  $p_k$  consiste en:

- El uso de desigualdades del equilibrio del usuario  $s_k^{CC}(v)$  y  $s_k^{CN}(v)$ .
- La conservación de flujos:

$$\sum_{k \in K_i^{CC}} p_k \theta_i^{CC} - \theta_i^{CC} = 0 \Rightarrow \theta_i^{CC} \left( \sum_{k \in K_i^{CC}} p_k - 1 \right) = 0, i \in I, c \in C$$

$$\sum_{k \in K_i^{CN}} p_k \theta_i^{CN} - \theta_i^{CN} = 0 \Rightarrow \theta_i^{CN} \left( \sum_{k \in K_i^{CN}} p_k - 1 \right) = 0, i \in I, c \in C$$

- El cálculo de la proporción de la demanda que usa vías de cuota y su complemento:

$$\theta_i^{CC} = \frac{\theta_i^c}{1 + \exp \left( \alpha^c \left[ \sum_{k \in K_i^{CN}} p_k t_k^c \right] + \beta^c (u_i^{CC} - u_i^{CN}) \right)}$$

$$\theta_i^{CN} = \theta_i^c - \theta_i^{CC}$$

Esta formulación recalca la importancia de las proporciones de ruta  $p_k$  y la dimensión del problema; la existencia de  $c$  clases de usuarios, requiere el uso de  $2c$  vectores para cada arco y con matrices de dimensión  $i^2$ . Los métodos actuales de solución se basan en el uso de algoritmos heurísticos de buen desempeño, pero sin soporte de pruebas de convergencia.

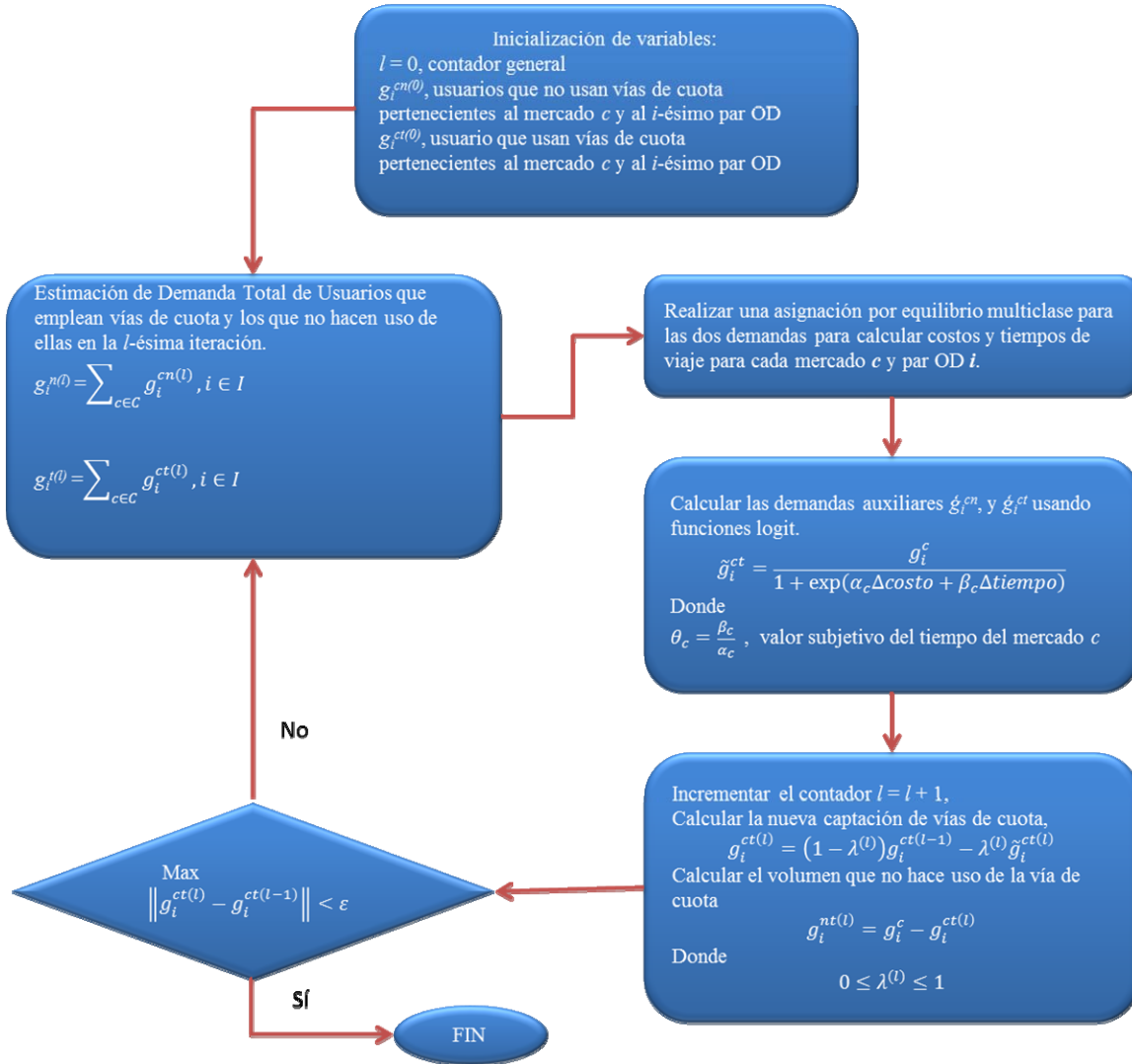
Para simplificar el modelo se asume que los vehículos de las diferentes clases son homogéneos y que las impedancias de viaje de cada para OD se simplifican a:

$$\left. \begin{array}{l} u_i^{c1} = u_i^c \\ u_i^{cn} = u_i^n \end{array} \right\} i \in I, c \in C$$

Esto implica que todos los usuarios de vías de cuota deben ser agregados en una sola clase y los que no las usan en otra. La justificación se basa en la suposición de que el peaje se percibe al nivel de la función de demanda, anterior al viaje, y una vez que se toma la decisión de pagar o no, la elección de ruta no se rige por el costo generalizado, sino sólo por el tiempo de viaje.

## 6.2 Algoritmo de solución

Se presenta a continuación el algoritmo heurístico para solucionar el problema.



Gráfica 9. Algoritmo Heurístico de selección explícita de vías de cuota

El tamaño de  $\lambda$  puede ser elegido implementando el método de promedios sucesivos. El algoritmo requiere de por lo menos  $2|C|$  matrices OD y de  $2|C|$  vectores de flujo.

## 7 Aplicación a un caso en México

### 7.1 Libramiento Norponiente de Irapuato

Para poder analizar cada uno de los dos métodos de asignación revisados se estudiará el Libramiento Norponiente de Irapuato que inició operaciones en 2011.

La vialidad está integrada por 29 kilómetros de longitud con una sección transversal de 12 metros para alojar dos carriles de 3.5 metros cada y un acotamiento lateral de 2.5 metros. Comunica a las carreteras Irapuato-Guadalajara e Irapuato-León.

El libramiento se desarrolla en un terreno plano fundamentalmente, lo que permite que los vehículos ligeros circulen a 110 km/h.

La función principal es permitir el paso de vehículos procedentes del occidente del país y con destino hacia León, Guanajuato sin tener que pasar por Irapuato.

Los trabajos de campo para estimar la demanda se realizaron en 2007, por lo que podrá ser posible revisar los resultados de cada método de asignación. Todos los valores de asignación empleados en el estudio de este caso se refieren a volúmenes diarios de tránsito. De igual manera, se asume que todos los conductores, con la salvedad de los autobuses, son quienes toman la decisión de hacer uso o no de vías de cuota.

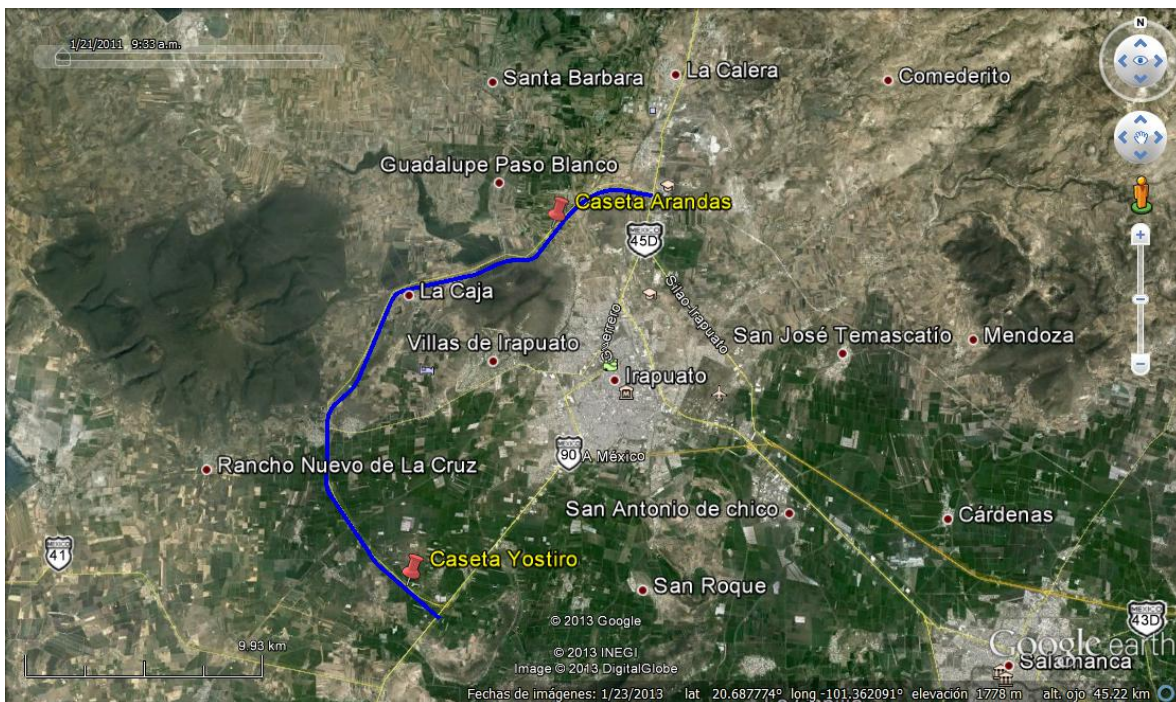


Figura 12. Libramiento de Irapuato y sus plazas de cobro.

Fuente: Google Earth.

## 7.2 Información recopilada

### 7.2.1 Componente de oferta

La red de análisis empleada tiene una extensión territorial que contiene los principales generadores de viaje como son las Zona Metropolitanas de Ciudad de México, Guadalajara, Irapuato, León, Salamanca, Celaya, Querétaro y La Piedad.

Cada uno de los arcos fue caracterizado en términos de número de carriles, velocidades observadas, tipo de terreno y longitud.

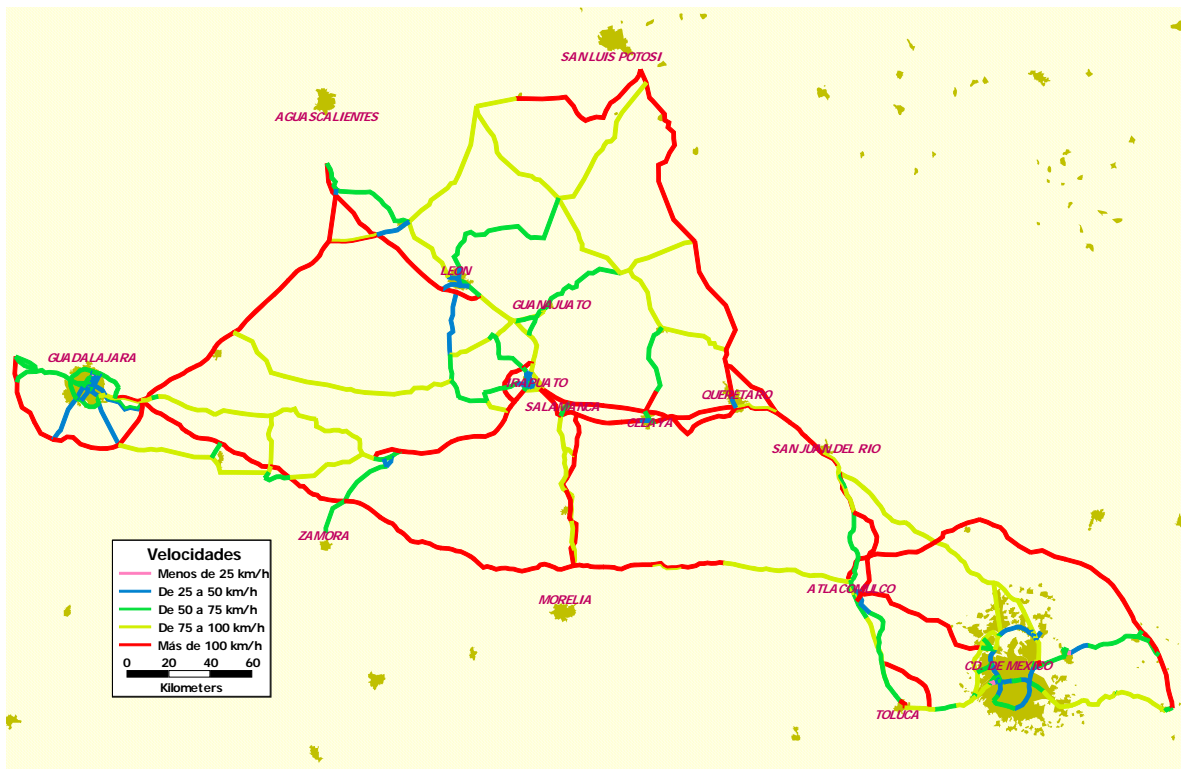


Figura 13. Red de análisis.

Fuente: Elaboración Propia.



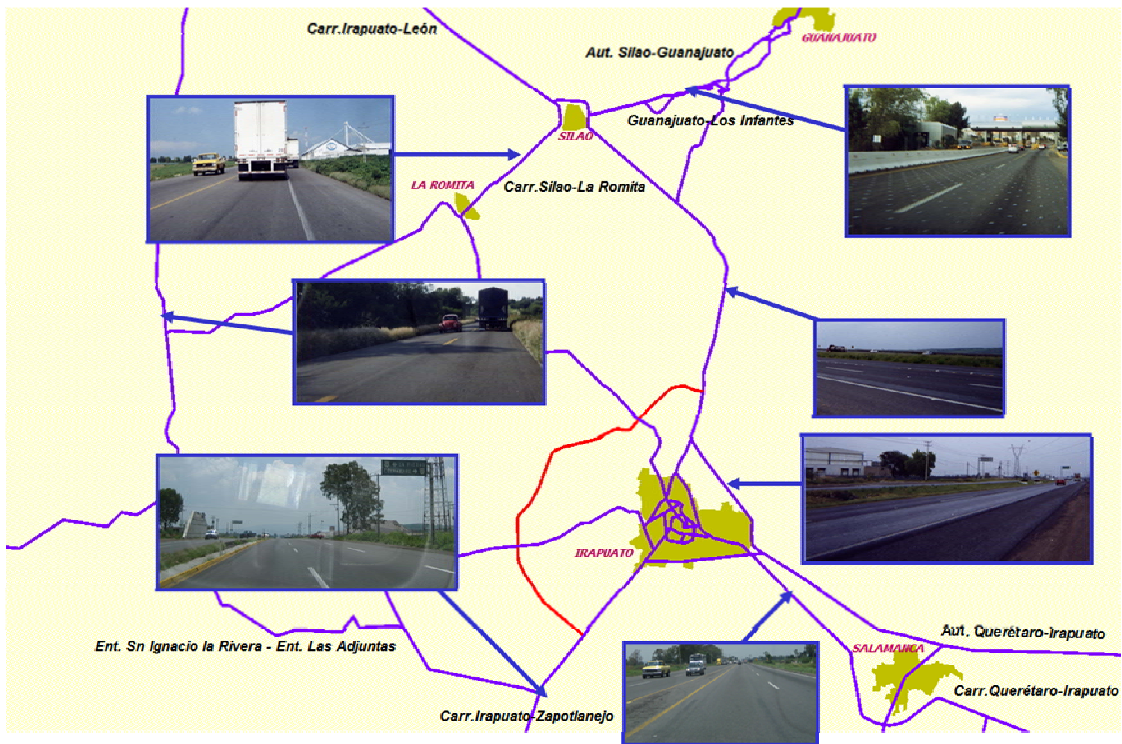


Figura 14. Revisión de características físicas de la red de influencia.

Fuente: Elaboración Propia.

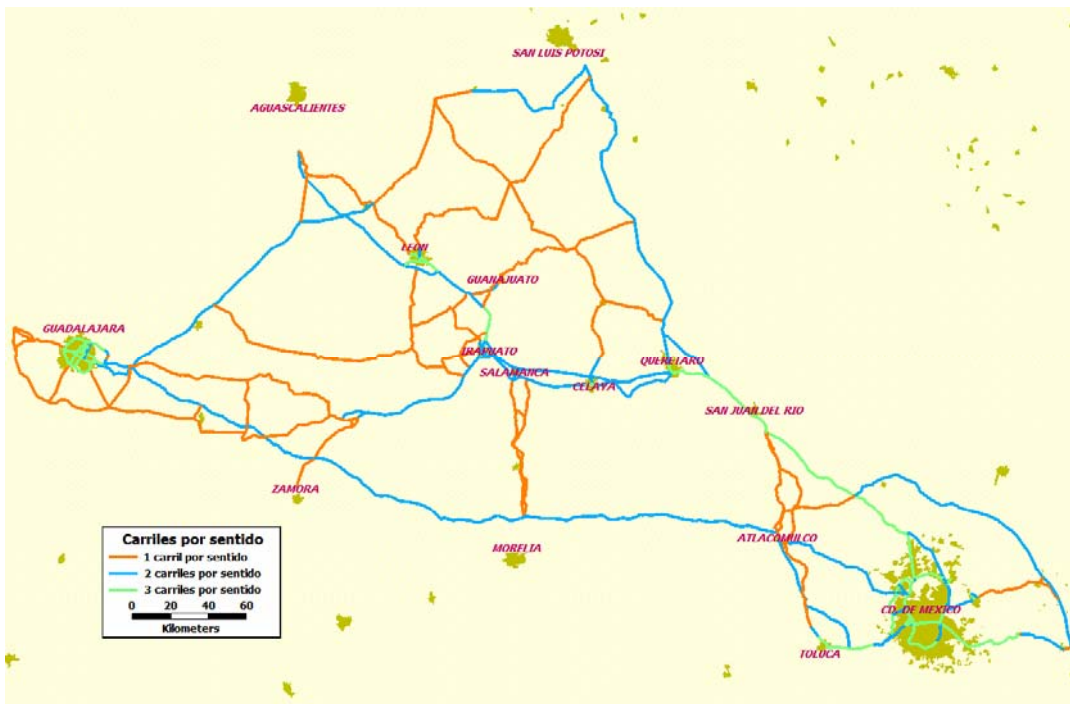


Figura 15. Carriles por sentido.

Fuente: Elaboración Propia.



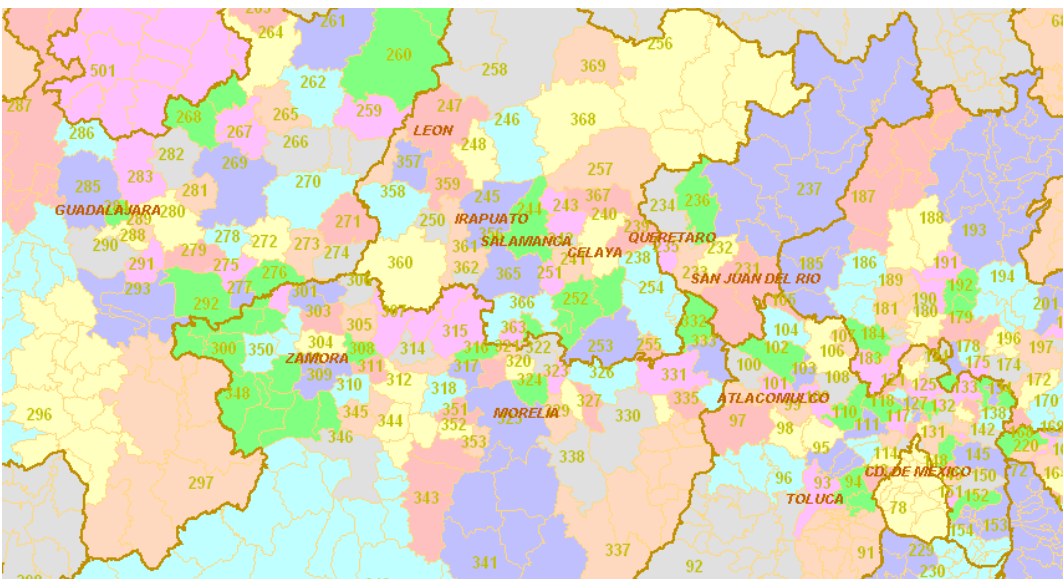
### 7.2.2 Zonificación

Como parte del análisis de la demanda se realizó una zonificación que incluye al país completo (32 estados), además de Guatemala, Belice y los Estados Unidos. Se desagregó al nivel de municipios para los estados de Guanajuato, Jalisco y México para la modelación de los viajes.



**Figura 16. Zonificación a nivel nacional y estatal**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 17. Zonificación a nivel regional**

Fuente: Elaboración Propia.

### 7.2.3 Componente de demanda

Se recabó información de origen y destino en dos estaciones, con el propósito de identificar la demanda potencial y sus principales características. La información se recopiló en septiembre de 2007.

La cédula de encuesta recopiló los siguientes datos:

- Autos:
  - Origen-Destino.
  - Motivo de viaje.
  - Ingreso mensual.
  - Pasajeros a bordo.
  - Frecuencia de viaje.
- Camiones:
  - Origen-Destino.
  - Carga transportada.
  - Tonelaje transportado.
  - Frecuencia de viaje.
  - Tamaño de la empresa.

Para la integración de la demanda de buses se recopiló información en las terminales de Irapuato, León y Guanajuato. En cada estación de OD se registró la hora de paso de cada autobús, su destino y la empresa.



Figura 18. Ubicación de estaciones OD

Fuente: Elaboración Propia.

Conforme a las recomendaciones para el tratamiento de la demanda de viajes, se agrupó la demanda en 7 clases de usuarios. Concluido el proceso de expansión y eliminación de conteos dobles se determinó que la demanda diaria para el año base 2007 es de 61,287 viajes.

**Tabla 13. Composición de la demanda al año base 2007 por clase de usuario**

<b>Grupo Vehicular</b>	<b>Vehículos al día</b>
Total Autos	45,212
Autos por motivo Trabajo	29,660
Autos por motivo Paseo	7,081
Autos por Otros motivos	8,471
Buses	1,950
Camiones de 2 a 4 ejes (CU)	7,664
Camiones de 5 a 6 ejes (CA1)	4,669
Camiones de 7 a 9 ejes (CA2)	1,792
<b>TDPA</b>	<b>61,287</b>

Fuente: Elaboración Propia.

Con base en las proyecciones socioeconómicas, la demanda se proyectó para el año 2012 para efectos comparativos y cuyos valores se muestran en la Tabla 14. Es precisamente esta demanda es la que se asignará al modelo para su análisis.

**Tabla 14. Composición de la demanda al año 2012 por clase de usuario**

<b>Grupo Vehicular</b>	<b>Vehículos al día</b>
Total Autos	48,783
Autos por motivo Trabajo	31,995
Autos por motivo Paseo	7,609
Autos por Otros motivos	9,179
Buses	2,139
Camiones de 2 a 4 ejes (CU)	8,395
Camiones de 5 a 6 ejes (CA1)	5,058
Camiones de 7 a 9 ejes (CA2)	1,939
<b>TDPA</b>	<b>66,314</b>

Fuente: Elaboración Propia.

### 7.3 Calibración del modelo de transporte

Con esta actividad se busca que el modelo de transporte represente lo más fidedignamente posible el tránsito observado en las estaciones de levantamiento de información de campo; ello, por grupo vehicular. La cantidad de observaciones fue de 20 correspondiente a cada estación, sentido y los cinco grupos vehiculares integrantes de la demanda.

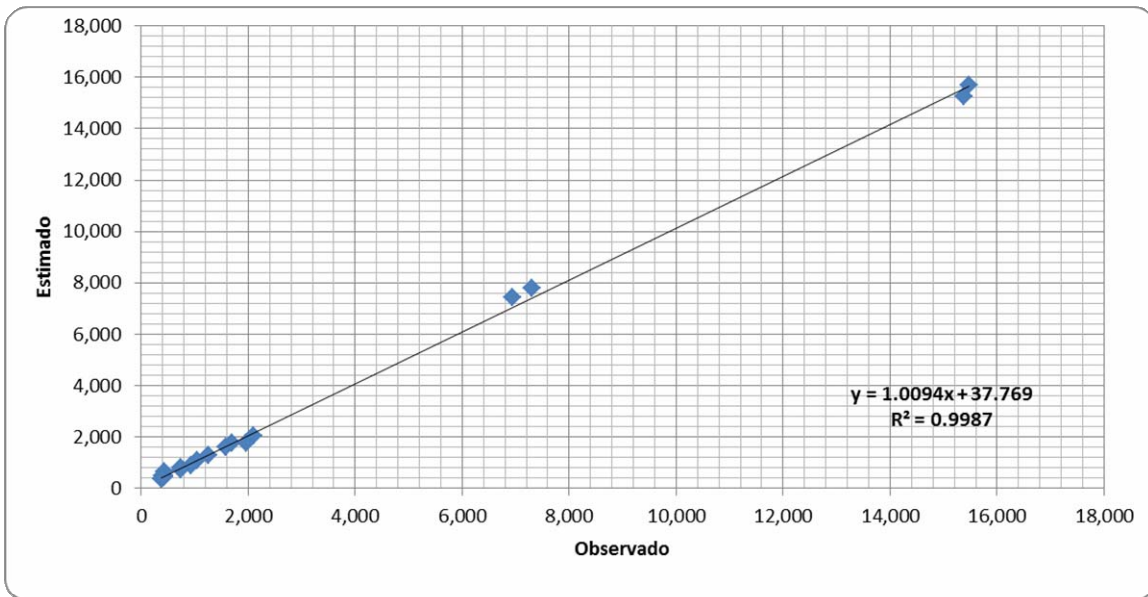


Figura 19. Recta de regresión de calibración

Fuente: Elaboración Propia.

El valor de la pendiente indica que es una recta casi a 45°.

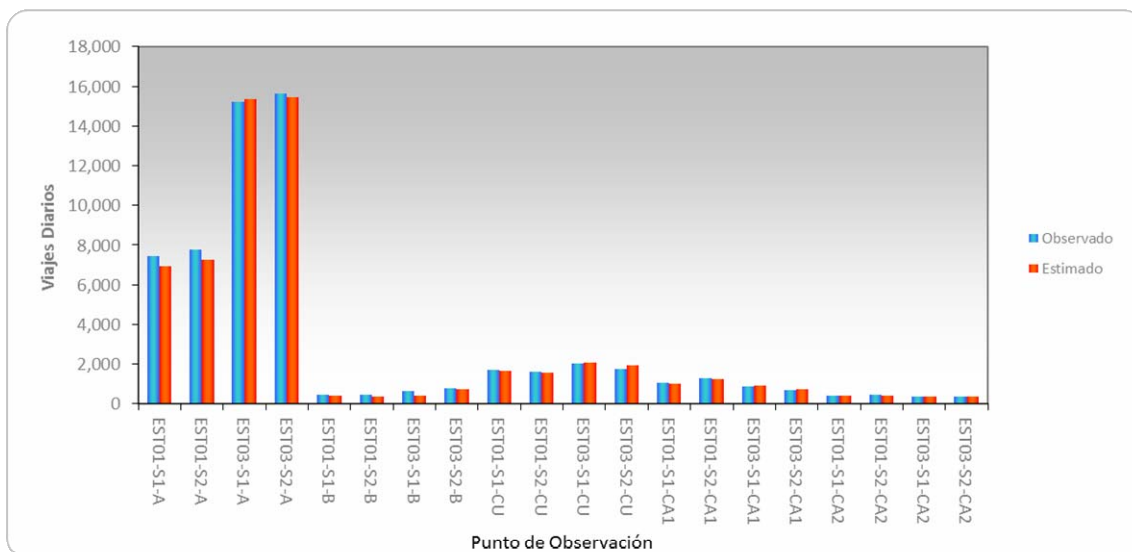


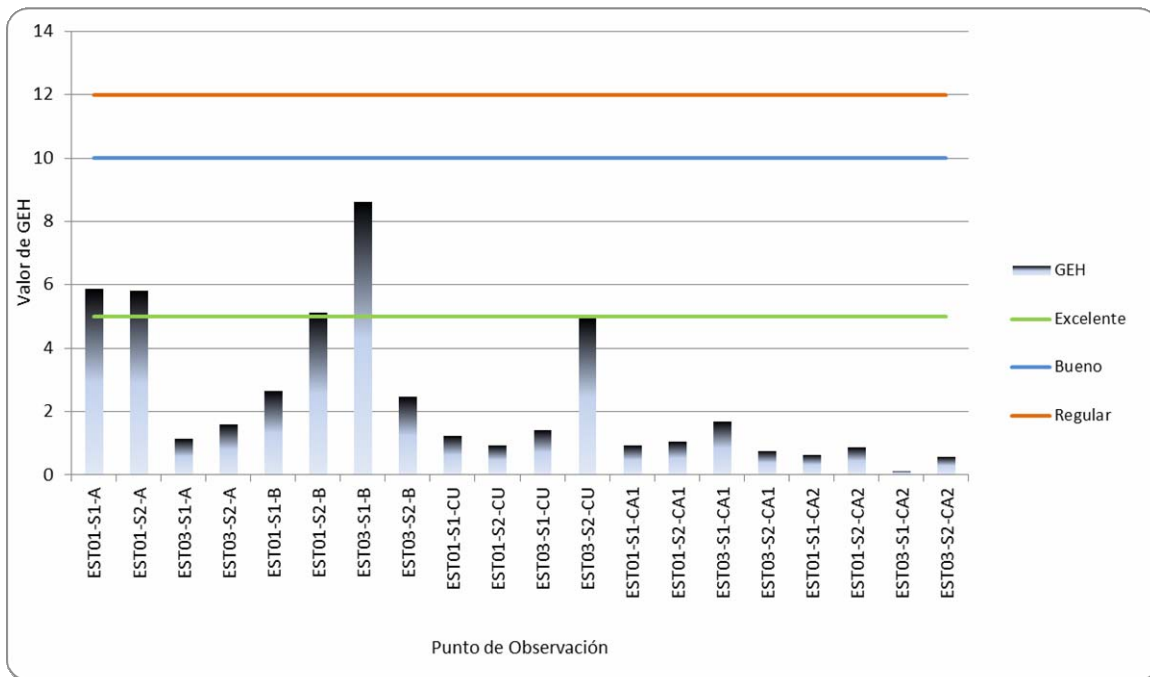
Figura 20. Comparativo de volúmenes observados contra estimados por el modelo de transporte

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 15. Estimación del indicador GEH

Punto	Observado	Estimado	$(O_i - E_i)^2$	$0.5 * (O_i - E_i)$	GEH
EST01-S1-A	7,442	6,943	248094	7192	6
EST01-S2-A	7,803	7,299	253190	7551	6
EST03-S1-A	15,250	15,389	19293	15320	1
EST03-S2-A	15,675	15,478	38612	15576	2
EST01-S1-B	497	440	3241	468	3
EST01-S2-B	495	388	11491	442	5
EST03-S1-B	643	443	40172	543	9
EST03-S2-B	802	734	4663	768	2
EST01-S1-CU	1,749	1,699	2541	1724	1
EST01-S2-CU	1,617	1,581	1299	1599	1
EST03-S1-CU	2,041	2,104	4037	2072	1
EST03-S2-CU	1,751	1,964	44999	1857	5
EST01-S1-CA1	1,082	1,052	874	1067	1
EST01-S2-CA1	1,300	1,263	1387	1281	1
EST03-S1-CA1	881	931	2493	906	2
EST03-S2-CA1	718	738	394	728	1
EST01-S1-CA2	452	440	161	446	1
EST01-S2-CA2	456	438	334	447	1
EST03-S1-CA2	369	370	3	370	0
EST03-S2-CA2	395	406	123	400	1
<b>Totales</b>	<b>61,418</b>	<b>60,100</b>	<b>677,402</b>		

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 21. Valor del GEH por punto de observación**

Fuente: Elaboración Propia.

Cálculo de la raíz cuadrada del error cuadrático porcentual.

$$\%RMSE = \frac{100 \sqrt{\frac{\sum (E_i - O_i)^2}{Nobs - 1}}}{\frac{\sum O_i}{Nobs}} = \frac{100 \sqrt{\frac{\sum (677,402)^2}{20 - 1}}}{\frac{\sum 61,418}{20}} = 6.1$$

Este valor anterior es una medida de las diferencias entre los valores pronosticados por un modelo y los valores realmente observados. Estas diferencias individuales se denominan residuos cuando se realizan los cálculos sobre la muestra de datos que se utilizó para la estimación, y se denominan errores de predicción cuando se calcula fuera de la muestra.

El RMSE es una buena medida de la precisión, pero sólo para comparar los errores de predicción de los diferentes modelos para una variable particular y no entre las variables, ya que es dependiente de la escala.

El resultado de 6.1 es aceptable, pues se recomienda que este indicador sea inferior a 30.

### 7.4 Valor Subjetivo del Tiempo por clase

Se muestran los coeficientes de tiempo y costo, así como los valores de tiempo empleados para cada clase de usuario.

Tabla 16. VST por clase

Grupo Vehicular	Tiempo	Costo	VOT
<b>Autos Trabajo</b>	-0.1034	-0.0604	1.71
<b>Autos Paseo</b>	-0.1026	-0.0822	1.25
<b>Autos Otros</b>	-0.1026	-0.0822	1.25
<b>Camión Unitario</b>	-0.0962	-0.0432	2.23
<b>Camión Articulado 1</b>	-0.1058	-0.0346	3.06
<b>Camión Articulado 2</b>	-0.1058	-0.0346	3.06

Fuente: Elaboración Propia.

### 7.5 Asignación por costo generalizado

La integración del modelo de transporte se realizó usando la herramienta Emme 4, que de hecho permite hacer la asignación multiclase por costo generalizado.

La especificación para ejecutar la asignación se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 17. Parámetros para asignación por costo generalizado

Clase	matriz	Costo Generalizado	Factor de Percepción
Autos Trabajo	mf1	función volumen-demora + cuota/VST	0.584
Autos Paseo	mf2	función volumen-demora + cuota/VST	0.801
Autos Otros	mf3	función volumen-demora + cuota/VST	0.801
Buses	mf54	función volumen-demora	
Camiones Unitarios	mf55	función volumen-demora + cuota/VST	0.449
Camiones Articulados 1	mf56	función volumen-demora + cuota/VST	0.327
Camiones Articulados 2	mf57	función volumen-demora	0.327

Es relevante aclarar que para realizar la asignación multiclase fue necesario expresar las matrices de vehículos pesados en vehículos ligeros equivalentes por lo cual se hicieron las siguientes consideraciones:

- Buses y Camiones Unitarios = 2 vehículos ligeros
- Camiones Articulados 1 = 3 vehículos ligeros
- Camiones Articulados 2 = 3.5 vehículos ligeros



Para efecto de los buses se asignaron sólo por tiempo de viaje, puesto que el objetivo de este vehicular es minimizar el tiempo de viaje, pues en su mayoría, estas unidades son operadas por empresas transportistas y no hombres-camión.

En el resto de los grupos vehiculares, el costo generalizado se calcula mediante el cálculo del tiempo de viaje mediante la función volumen demora del arco más la cuota en el arco (si existe) y convertida a minutos de viaje mediante el factor de percepción, que no es otra cosa, sino el inverso del valor del tiempo.

Bajo esta metodología de asignación, como ya se revisó el capítulo 5, se calcula el costo generalizado de cada arco, y con base en esto se calcula la ruta mínima entre cada par origen-destino, bajo la observancia de no congestionar los arcos, en cuyo caso, la demanda usa otras alternativas de ruta hasta que se llega al equilibrio.

### 7.5.1 Estimación de vehículos captados

En el caso de los automóviles, el resultado de la asignación indica que sólo el primer tramo del libramiento tiene captación. Debe recordarse que las tres clases que integran la demanda de automóviles están sometidas a un procedimiento de asignación por costo generalizado.

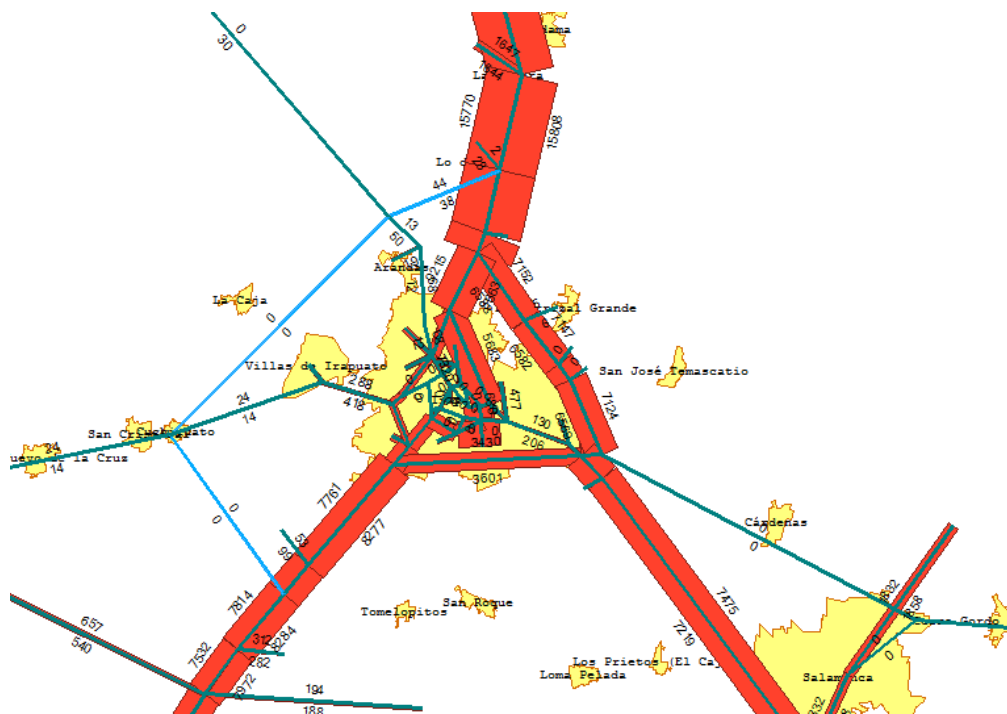


Figura 22. Asignación de vehículos ligeros, Libramiento Norponiente de Irapuato

Fuente: Elaboración Propia.

En el caso de los vehículos pesados, el efecto es muy similar, aunque en este caso sí se presenta uso de los tramos subsecuentes del libramiento.





Figura 23. Asignación de vehículos pesados, Libramiento Norponiente de Irapuato

Fuente: Elaboración Propia.

Este comportamiento parece no ser típico de un libramiento, pues presenta una captación muy baja. Cabe mencionar que en este proyecto en particular, al oriente de Irapuato, se tiene un libramiento sin pago de peaje y con sección de 4 carriles, lo que pone en desventaja al Libramiento Norponiente.

### 7.5.2 Estimación de la demanda potencial

En proyectos que involucran vías de cuota es muy común (y deseable) conocer la denominada demanda potencial, esta demanda se estima haciendo una asignación en donde el único costo de cada arco es el tiempo de viaje. Su cálculo permite estimar cuántos usuarios harían uso de una vía de cuota si el costo por usarlo fuera de cero.

El cociente entre la demanda captada y la demanda potencial es una manera de medir la bondad del proyecto. Este cociente está directamente relacionado con las ventajas en términos de ahorro de tiempo, seguridad, instalaciones y otros factores.

La demanda potencial se muestra en las barras color azul de las siguientes figuras.

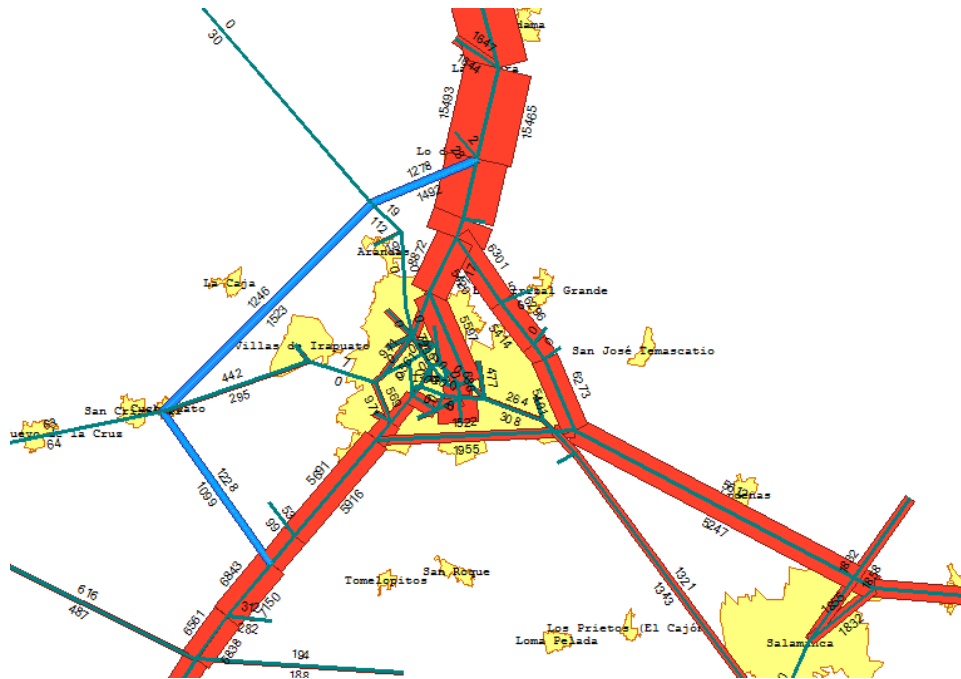


Figura 24. Demanda potencial de vehículos ligeros, Libramiento Norponiente de Irapuato

Fuente: Elaboración Propia.

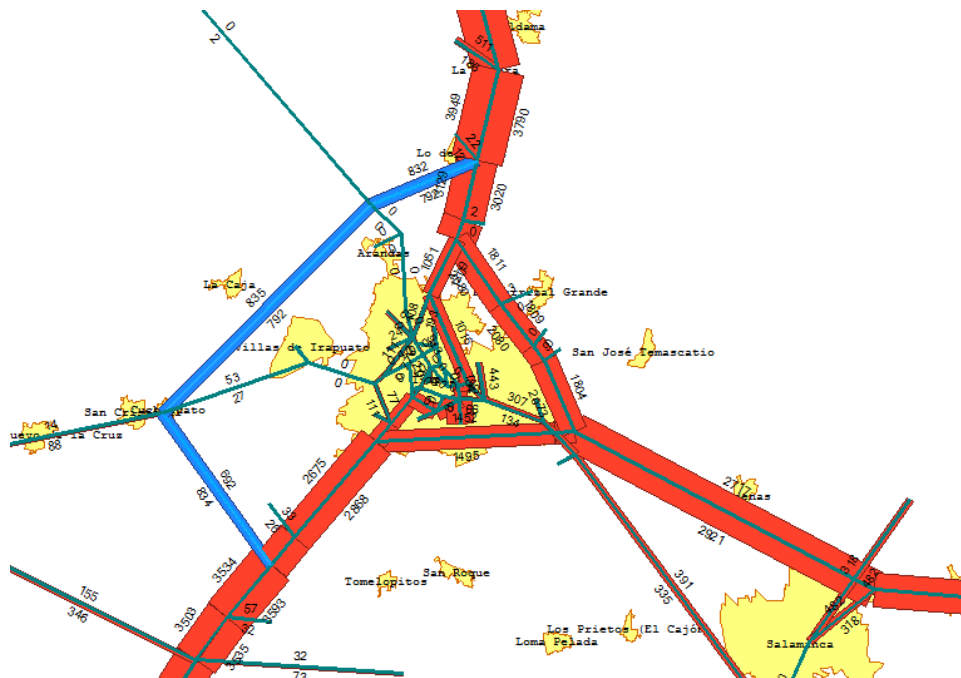


Figura 25. Demanda potencial de vehículos pesados, Libramiento Norponiente de Irapuato

Fuente: Elaboración Propia.

### 7.5.3 Análisis de resultados

Los resultados de la tabla siguiente muestran la demanda que haría uso del libramiento bajo la hipótesis de no pagar costo alguno por su uso. En otras palabras, es la demanda máxima que podría hacer uso del libramiento, evidentemente su uso decrece conforme se aplica alguna tarifa.

**Tabla 18. Demanda potencial por grupo vehicular y tramo**

Tramo	Longitud	A	B	CU	CA1	CA2	TOT
1	5.4	2,771	98	797	483	247	4,396
2	14.6	2,769	98	797	483	247	4,394
3	9.0	2,327	25	762	483	250	3,847
<b>Tránsito Equivalente</b>	<b>29.0</b>	<b>2,632</b>	<b>75</b>	<b>786</b>	<b>483</b>	<b>248</b>	<b>4,225</b>

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de asignación muestran una captación muy baja, en donde salvo el caso de los autobuses, en donde por política de mercado buscan minimizar el tiempo de viaje, el resto de las clases aparentemente no tendrían interés en el uso de esta alternativa.

**Tabla 19. Demanda captada por grupo vehicular y tramo**

Tramo	Longitud	A	B	CU	CA1	CA2	TOT
1	5.4	82	98	0	0	0	180
2	14.6	0	98	0	0	0	98
3	9.0	0	25	0	0	0	25
<b>Tránsito Equivalente</b>	<b>29.0</b>	<b>15</b>	<b>75</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>91</b>

Fuente: Elaboración propia.

Este efecto puede obedecer a diversas causas, entre otras ahorros de tiempo muy pequeños o bien altas tarifas.

Sin embargo el método de asignación empleado, también implica que la selección de pares captados dependa exclusivamente del cálculo de la ruta más corta considerando como ponderación el costo generalizado. Este criterio tiene efectos cuestionables en el análisis de proyectos con vías de cuota, pues asume que la totalidad de los viajes entre un par OD en particular o bien, usa la alternativa con cuota, o bien lo hace por la alternativa sin cuota.

**Tabla 20. Demanda captada por grupo vehicular y tramo, vehículos ligeros**

ORIGEN	DESTINO	Tmp sin Pry [min]	Tmp con Pry [min]	Cos sin Pry [\$]	Cos con Pry [\$]	Costo Gen (AT) [min]	Costo Gen (AP, AO) [min]	Potenciales [TDPA]	Captados [TDPA]
Aldama, Irapuato, Gto.	Arandas, Irap	37.6	26.7	0	8.1	31.3	33.0	27.0	27.0
Romita, Gto.	Salamanca, Gto.	84.0	79.0	19	27.1	87.7	87.8	24.6	24.6
El Copal, Irapuato, Gto.	Arandas, Irap	33.4	26.0	0	8.1	30.6	32.3	11.3	11.3
Arandas, Irap	Guanajuato, Gto.	64.8	53.7	0	8.1	58.7	60.4	7.3	7.3
Arandas, Irap	Aguascalientes, Ags.	122.7	114.0	160	168.1	166.6	168.3	5.7	5.7
Silao, Gto.	Arandas, Irap	51.4	40.4	0	8.1	45.1	46.8	5.6	5.6
Villas de Irapuato, Irap	Leon, Gto.	85.0	84.1	0	30.0	85.3	85.3	164.3	0.0
Pénjamo, Gto.	Leon, Gto.	117.5	112.0	0	43.5	118.4	118.4	162.3	0.0
Leon, Gto.	Abasolo, Gto.	106.7	100.1	0	43.5	107.3	107.3	139.6	0.0
Abasolo, Gto.	Leon, Gto.	105.7	100.3	0	43.5	106.4	106.4	113.5	0.0
Leon, Gto.	Villas de Irapuato, Irap	84.7	83.9	0	30.0	84.9	84.9	102.3	0.0
Abasolo, Gto.	Guanajuato, Gto.	89.8	84.5	0	43.5	90.5	90.5	81.6	0.0
Leon, Gto.	Pénjamo, Gto.	118.5	111.9	0	43.5	119.3	119.3	69.2	0.0
Pénjamo, Gto.	Guanajuato, Gto.	101.6	96.3	0	43.5	102.5	102.5	61.5	0.0
Guanajuato, Gto.	Villas de Irapuato, Irap	68.3	67.6	0	30.0	68.6	68.6	53.8	0.0
Resto de los pares								1993.2	0.0
Totales								3022.9	81.6
Tiempo promedio de viaje de los 15 principales pares		84.8	78.7						
Costo promedio de de viaje de los 15 principales pares				11.9	38.6				
Ahorro promedio en términos de viaje (minutos)		6.1							
Tiempo promedio de viaje del resto de los pares		137.9	132.9						
Costo promedio de de viaje del resto de los pares				36.2	58.6				
Ahorro promedio en términos de viaje (minutos)		5.1							

Fuente: Elaboración propia.

Este efecto del método de asignación se muestra en la tabla anterior; los tiempos de ahorro son pequeños y al hacer el cálculo del costo generalizado por clase, en la mayor parte de los casos, el costo por la alternativa sin cuota prevalece.

El problema principal del uso de esta metodología de asignación es que la estimación de demanda captada puede ser subestimada o sobreestimada con un error importante, particularmente cuando el proyecto tiene beneficios marginales. En el caso de un proyecto en donde los beneficios por ahorro en tiempo de viaje son grandes, la sobreestimación de la demanda captada podría derivar en una estimación de ingresos demasiado optimista.

## 7.6 Asignación por selección explícita de vías de cuota

### 7.6.1 Algoritmo de solución

La interpretación de esta metodología de asignación se plasmó en una macro de asignación de Emme y se explica el algoritmo de solución.

- Se parte de la existencia de tantas matrices como el número de clases de usuarios.
- Se propone la primera segmentación por clase, entre usuarios que usan vías de cuota y usuarios que lo usan. Para ello se propone asignar la mitad de la demanda de cada clase, es decir:

$$\begin{aligned}g_i^{ct} &= 0.5 g_i^c \\g_i^{cn} &= 0.5 g_i^c\end{aligned}$$

- Se realiza el cálculo de costos y tiempos por alternativa para cada clase; para tal fin se realiza una asignación multiclasa empleando sólo las demandas  $g_i^{ct}$  y  $g_i^{cn}$  por costo generalizado convirtiendo el peaje de cada ruta a minutos multiplicándolo por el inverso del valor subjetivo de la case correspondiente.
- Se acumula el valor del contador  $l = l + 1$ .
- Obtener las demandas auxiliares empleando un modelo logit binomial

$$\tilde{Q}_i^{cuota(l)} = Q_i^{Total(l)} \left\{ \frac{\exp(\alpha C_{cuota}^{(l)} + \beta T_{cuota}^{(l)})}{\exp(\alpha C_{cuota}^{(l)} + \beta T_{cuota}^{(l)}) + \exp(\beta T_{libre}^{(l)})} \right\}$$

- Calcular el promedio ponderado:

$$Q_i^{cuota(l)} = (1 - \lambda^{(l)}) Q_i^{cuota(l-1)} - \lambda^{(l)} \tilde{Q}_i^{cuota(l)}$$

- Estimar la nueva demanda para los usuarios que no usan vías de cuota

$$Q_i^{libre(l)} = Q_i^{total} - Q_i^{cuota(l)}$$

- Realizar la prueba de convergencia y en caso de que se cumpla el criterio de finalización dar por terminado el proceso, caso contrario hacer una nueva iteración

$$abs\|Q_i^{cuota(l)} - Q_i^{cuota(l-1)}\| \leq \varepsilon$$

### 7.6.2 Resultados

Se muestran a continuación de los resultados obtenidos con este metodología para la demanda del año 2012.

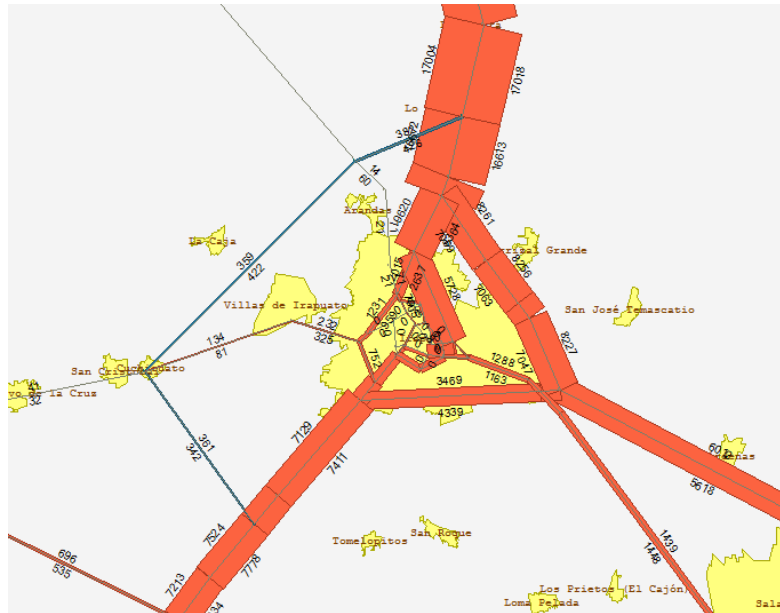


Figura 26. Asignación de vehículos ligeros con método de selección explícita de vías de cuota

Fuente: Elaboración propia.

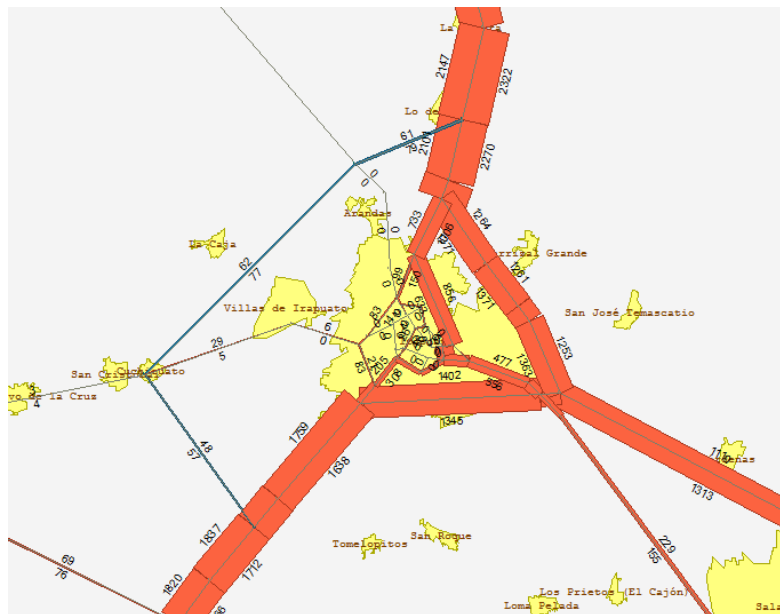


Figura 27. Asignación de Camiones Unitarios con método de selección explícita de vías de cuota

Fuente: Elaboración propia.

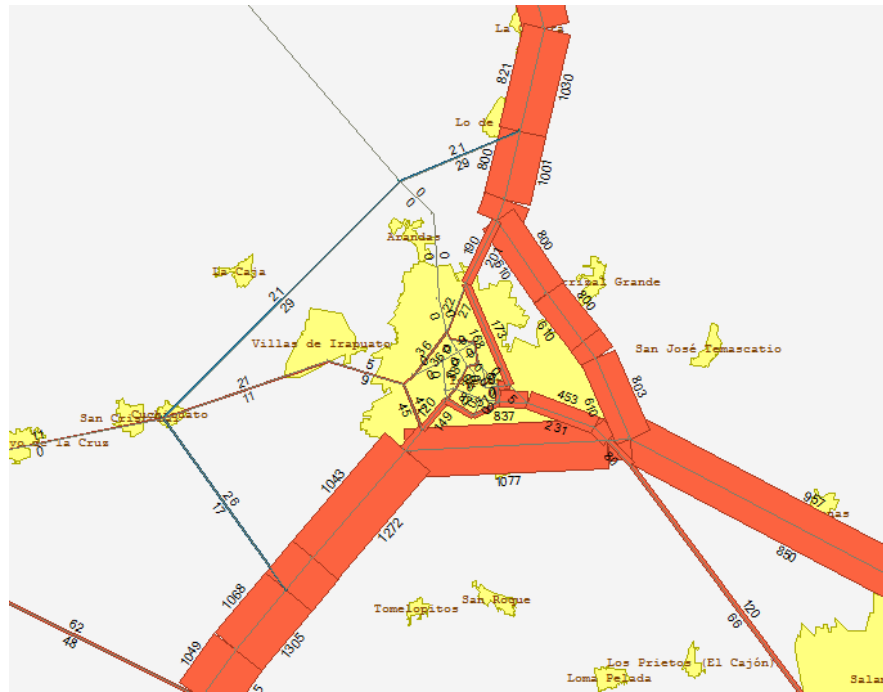


Figura 28. Asignación de Camiones Articulados 1 con método de selección explícita de vías de cuota

Fuente: Elaboración propia.

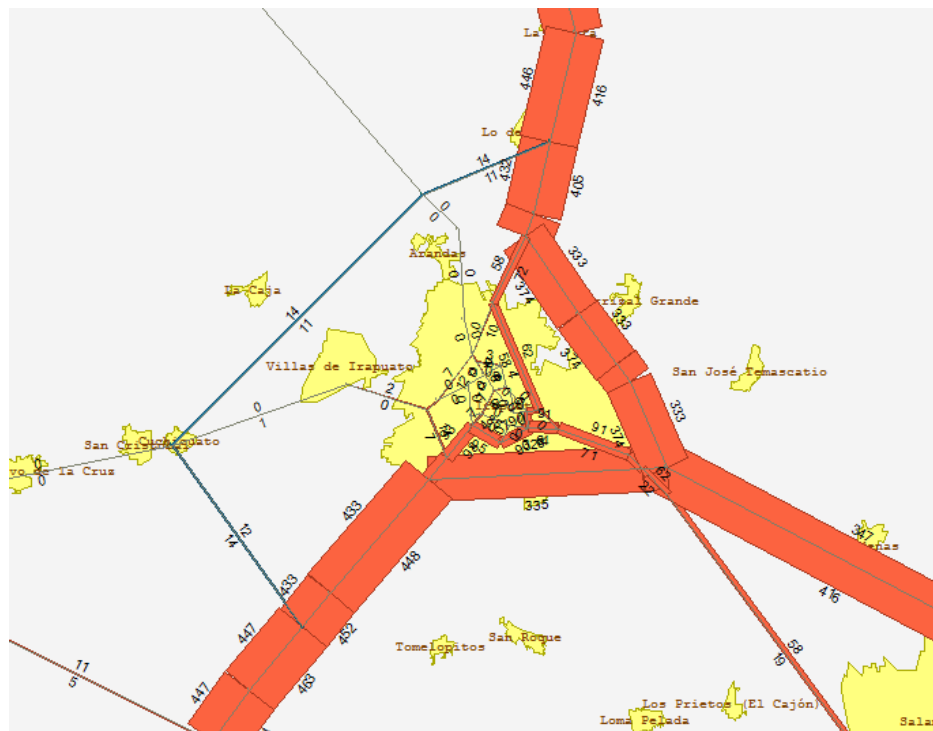


Figura 29. Asignación de Camiones Articulados 2 con método de selección explícita de vías de cuota

Fuente: Elaboración propia.

Las asignaciones anteriores se realizaron con base en las tarifas vigentes en este libramiento y que son las siguientes:

- A:** Automóviles, 2.06 \$/km.
- B:** Buses, 4.06 \$/km.
- CU:** Camiones Unitarios (De 2 a 4 ejes), 2.96 \$/km.
- CA1:** Camiones Articulados 1 (De 5 a 6 ejes), 4.37 \$/km.
- CA2:** Camiones Articulados 2 (De 7 a 9 ejes), 5.95 \$/km.

La demanda captada bajo esta metodología de asignación muestra resultados más lógicos respecto a los que se obtuvieron anteriormente.

**Tabla 21. Demanda Asignada por Método de Selección Explícita de Vías de Cuota**

Tramo	Longitud	A	B	CU	CA1	CA2	TOT
1	5.4	808	26	140	50	25	1,049
2	14.6	781	26	139	50	25	1,021
3	9.0	703	26	105	43	26	903
<b>Tránsito Equivalente</b>	<b>29.0</b>	<b>762</b>	<b>26</b>	<b>129</b>	<b>47</b>	<b>25</b>	<b>990</b>

En términos de captación respecto a los tiempos y costos de viaje, se tiene lo siguiente:

**Tabla 22. Demanda captada por grupo vehicular y tramo, vehículos ligeros**

ORIGEN	DESTINO	Tmp sin Pry [min]	Tmp con Pry [min]	Cos sin Pry [\$]	Cos con Pry [\$]	Potenciales [TDPA]	Captados [TDPA]
EUA	Zamora, Mich.	300.4	297.0	114	53.9	17.7	17.6
Aldama, Irapuato, Gto.	Arandas, Irap	37.5	26.7	0	10.0	27.0	16.4
Villas de Irapuato, Irap	Abasolo, Gto.	46.1	43.6	0	16.7	49.2	14.4
Nuevo León	Abasolo, Gto.	217.6	214.4	114	53.9	14.2	14.0
Pénjamo, Gto.	San Luis de la Paz, Gto.	173.7	171.0	114	53.9	14.1	13.8
San Luis Potosí	Pénjamo, Gto.	229.4	226.1	114	53.9	13.8	13.5
Pénjamo, Gto.	San Luis Potosí	229.6	226.8	114	53.9	13.6	13.4
Villas de Irapuato, Irap	Leon, Gto.	84.9	84.0	0	37.2	164.3	13.1
Romita, Gto.	Salamanca, Gto.	83.8	78.9	19	29.0	24.6	11.7
Tamaulipas	Uruapan, Mich.	300.4	297.0	114	53.9	11.8	11.6
San Luis Potosí	Vista Hermosa, Jal.	285.6	282.1	135.6	75.5	10.5	10.4
Zamora, Mich.	Coahuila	300.6	297.7	114	53.9	9.7	9.5
Leon, Gto.	Villas de Irapuato, Irap	84.4	83.7	0	37.2	102.3	9.1
Cuerámaro, Gto.	Guanajuato, Gto.	99.2	97.5	20	37.2	29.8	7.6
Leon, Gto.	Abasolo, Gto.	106.3	99.8	0	53.9	139.6	7.5
Resto de los pares						2382.9	231.4
Totales						3024.9	415.0
Tiempo promedio de viaje de los 15 principales pares		172.0	168.4				
Costo promedio de de viaje de los 15 principales pares				64.8	45.0		
Ahorro promedio en términos de viaje (minutos)		3.6					
Tiempo promedio de viaje del resto de los pares		130.2	125.0				
Costo promedio de de viaje del resto de los pares				32.9	68.2		
Ahorro promedio en términos de viaje (minutos)		5.2					

Fuente: Elaboración propia.



Como pudo observarse, bajo esta metodología, los flujos de viaje entre cada Par Origen-Destino se segmentan, lo que refleja de mejor manera el hecho de que los usuarios de una clase eligen su alternativa de viaje de manera diferenciada, lo que evita la rigidez del método de asignación por costo generalizado.

### 7.6.3 Evaluación de los resultados

Una vez concluido el proceso de asignación, se procedió a revisar la demanda que al año 2012 circuló realmente por el Libramiento de Irapuato.

De acuerdo a la información publicada en Datos Viales, el Libramiento de Irapuato presentó la siguiente captación:

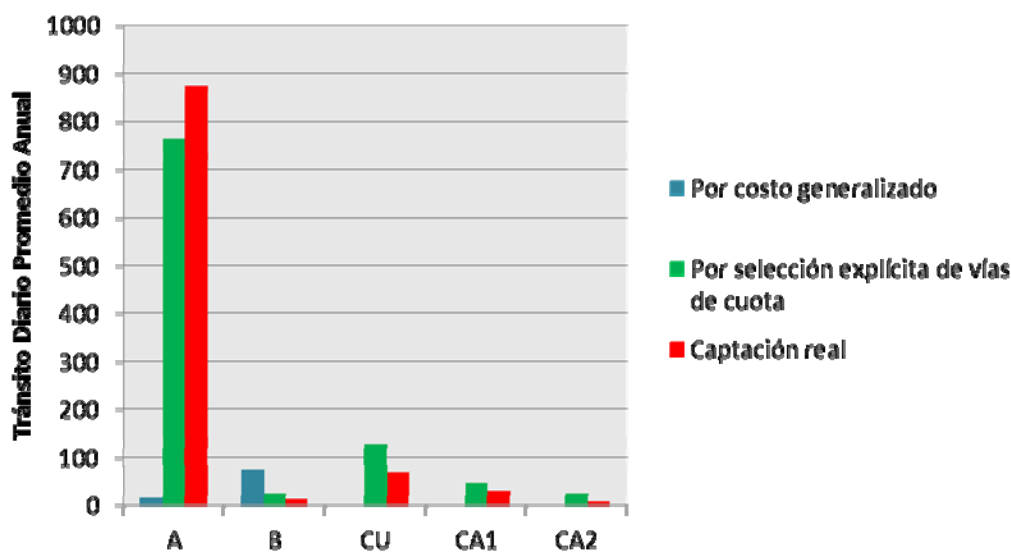
Tabla 23. Demanda Captada al año 2012

Tramo	Longitud	A	B	CU	CA1	CA2	TOT
1	5.4	1,379	14	125	49	7	1,575
2	14.6	748	12	56	27	7	850
3	9.0	775	11	52	26	7	871
<b>Tránsito Equivalente</b>	<b>29.0</b>	<b>874</b>	<b>12</b>	<b>67</b>	<b>31</b>	<b>7</b>	<b>992</b>

Fuente: Elaboración propia

La Figura 30 muestra los volúmenes asignados con cada método y su comparación con la captación real. Los datos corresponden al año 2012, que son los últimos datos disponibles.

Figura 30. Comparación entre métodos de asignación



Fuente: Elaboración propia

## 8 Conclusiones

---

Los resultados finales indican que la Asignación por Selección Explícita de Vías brinda mucho mejores resultados en cuanto al pronóstico de demanda para una nueva vía de cuota.

Las principales conclusiones de este estudio son las siguientes:

- Las metodologías de asignación basadas en el uso del costo generalizado no son apropiadas para la evaluación de vías de cuota.
- Es notorio que los usuarios de vías interurbanas no necesariamente usan la ruta más corta en términos de tiempo de viaje para realizar su recorrido; otros factores no tan fáciles de medir como la comodidad, la seguridad y la costumbre pueden ser contemplados dentro de un modelo de transporte mediante la aplicación de encuestas de preferencia declarada.
- La encuesta de preferencia declarada, que finalmente se traduce en la obtención de valores subjetivos de tiempo, es una herramienta básica para caracterizar adecuadamente la demanda usuaria de una vía de cuota.
- Por lo anterior, al realizar un modelo de transporte interurbano que implique el uso de vías de cuota, es fundamental que la encuesta tenga la calidad suficiente como para obtener valores realistas, pues este elemento del modelo es el que al final de cuentas define la captación de un proyecto carretero de cuota.
- Las pruebas de bondad de ajuste como el cálculo del factor t de cada coeficiente estimado, la observancia del tamaño del error y las pruebas LR de segmentación de la demanda son los medios a través de los cuales se corrobora la veracidad de los resultados.
- Es relevante mencionar que, en la medida de lo posible, será necesario segmentar la demanda con el mayor detalle posible. Para el caso de autos y camiones es deseable distinguir a aquellos usuarios que son empleados de empresa y que por consecuencia no toman la decisión de usar o no una vía de cuota. En la mayor parte de los casos, estos segmentos de mercado son obligados a usarlas por seguridad.
- Respecto a la codificación de la red, es fundamental constatar que el conjunto de arcos y nodos sean suficientes para representar los principales movimientos detectados en las encuestas de Origen y Destino, especial observancia merece el que todos los centroides, pero sobre todo, los próximos al proyecto en estudio permitan representar los principales patrones de viaje.
- También es necesario reflejar en el modelo cómo los usuarios pagan cada una de los tramos con peaje.

## 9 Bibliografía

---

- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2006)  
Modelación de demanda para carreteras de cuota. Manual de Modelación  
México: SCT
- Ortúzar, J. y Willumsen L. (2008). Modelos de Transporte.  
España: PubliCan.
- Heinz Spiess (1989).  
Conical Volume-Delay Functions. *Transportation Science* 24 (2), 1-14
- Fitch Ratings (2012). Autopistas de cuota en México,  
Actualización del desempeño al cierre de 2011 [en línea], Reporte especial.  
Disponible en [www.fitchratings.com](http://www.fitchratings.com)
- Schwab Klaus. (2011) Global Competitiveness Report  
Génova, Suiza: World Economic Forum
- Islas V. (2002) Estudio de la demanda de transporte  
Publicación Técnica del Instituto Mexicano del Transporte  
Safandilla, 213
- Canavos G. (1988)  
Probabilidad y Estadística, aplicaciones y métodos  
Virginia Estados Unidos: McGrawHill
- Florian M. (2006). Network equilibrium model for analysing toll highways  
Centre d'Investigation du Transport, Université de Montréal
- Dirección General de Servicios Técnicos. (2012, 2013).  
Datos Viales  
México: SCT