



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

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL DISEÑO DE ESQUEMAS  
BINOMIALES DE TARIFICACIÓN PARA AUTOPISTAS DE CUOTA BAJO EL  
ENFOQUE DE MAXIMIZACIÓN DE LA UTILIDAD.

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

PRESENTA:  
ELIASIB SALOMÓN MÉNDEZ TORRES

TUTOR PRINCIPAL  
DR. LAURENT YVES G. DARTOIS G., CONSULTOR

## **JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. José de Jesús Acosta

Secretario: M.I. Arturo Fuentes Zenón

Vocal: Dr. Laurent Yves Georges Dartois Girald

1<sup>er</sup>. Suplente: Dr. Ricardo Aceves García

2<sup>d o</sup>. Suplente: M.I. José Antonio Rivera

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Ciudad Universitaria, Facultad de Ingeniería, UNAM, Distrito Federal, México

**TUTOR DE TESIS:**

**DR. LAURENT YVES G. DARTOIS G.**

-----  
**FIRMA**

## **Agradecimientos.**

Primero a Dios, por estar conmigo día a día y nunca fallarme.

A mis padres por darme todo lo que estuvo a su alcance, agradezco infinitamente cada uno de sus esfuerzos para otorgarnos la posibilidad de superarnos académicamente.

A mis hermanos, en especial a Lalito por ser mi compañero, mejor amigo y compinche de aventuras.

A mi Pachis, por ser mí complemento, mi apoyo, mi motor.

A mis amigos y compañeros de clase que fueron indispensables cuando necesité de ellos, Ariadna, Claudia, Javier, Oscar.

Al Dr. Laurent Yves Georges Dartois Giraldo, por ser mi asesor de tesis, por sus consejos, por sus enseñanzas, por su insistencia y paciencia.

Al Dr. Ricardo Aceves García, M.I. José Antonio Rivera, Dr. José de Jesús Acosta, M.I. Arturo Fuentes Zenón por haber aportado su experiencia y comentarios atinados en esta tesis.

Al Ing. Jorge Eduardo Luna Rivera y a TRANSCONSULT por darme la oportunidad de empezar mi carrera profesional, por su confianza.

## ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	8
Introducción.....	11
Objetivos. ....	17
Problemática. ....	18
1 Antecedentes: Panorámica de los modelos de tarificación para autopistas de cuota existentes. ....	19
1.1 “Propuesta preliminar de un modelo econométrico para actualizar tarifas de cuota en autopistas mexicanas”. Salvador Flores Hernández .....	20
1.2 Un modelo de autopistas con peajes como precios de servicios. “El peaje en autopistas como precio por un servicio y como garante de sostenibilidad”. Carles Vergara y Francesc Robusté. ....	23
1.3 “An application of two-part tariff pricing to expressway: A case of Korea”. HA, Hun-Koo-KIM, Chun Kon .....	27
1.4 “Criterios para establecer la cuota óptima en una autopista de cuota”. Alfonso Rico Rodríguez. ....	31
1.5 Criterio para fijación de tarifas. SCT-CAPUFE .....	34
1.5.1 Esquema tarifario en uso (CAPUFE) .....	37
2 Propuesta metodológica.....	40
2.1 Descripción general de la metodología .....	40
2.2 Diagrama de flujo de la metodología propuesta. ....	43
2.3 Desarrollo de la metodología para el diseño de un esquema binomial de tarificación para autopistas de cuota bajo el enfoque de maximización de utilidad.....	44
2.3.1 Teoría de la utilidad y costos. ....	44
2.3.2 Conceptos básicos de costos e ingresos utilizados en el modelo.....	47
2.3.3 Ecuaciones básicas para determinar costos variables por tipo de vehículo a utilizar en el modelo tarifario binomial. ....	58
2.3.4 Ecuaciones de costo variable para cada tipo de vehículo y por tipo de terreno.....	64
2.3.5 Ecuaciones de costo fijo para el esquema tarifario. ....	67
2.3.6 Ecuaciones de costo total por categoría de vehículo y tipo de terreno. ....	68
2.3.7 Forma general de las ecuaciones de la utilidad .....	70
2.3.8 Maximización de la utilidad marginal. ....	76
2.3.9 Arbitraje entre nivel tarifario óptimo y nivel de demanda.....	78
3 Conclusiones.....	82
4 Bibliografía.....	83
Anexos.....	84

Anexo 1 Cálculo del factor equivalente de carga (LEF).....	84
Anexo 2 Cálculo del daño por tipo de vehículo .....	86
Anexo 3 Resolución a los polinomios para encontrar los puntos de optimización. ....	91

## Índice de Figuras

Figura 1 Participación modal en el transporte de carga y pasajeros en México .....	8
Figura 2 Comportamiento de la tarifa para automóviles (1991-2004) .....	14
Figura 3 Comportamiento de la tarifa para autobuses (1991-2004).....	14
Figura 4 Comportamiento de la tarifa para camiones (1991-2004).....	15
Figura 5 Criterios para establecer una tarifa binomial .....	28
Figura 6 Diagrama de la metodología .....	43
Figura 7 Curva PD.....	48
Figura 8 Curva demanda-tarifa.....	78
Figura 9 Función del arbitraje .....	80

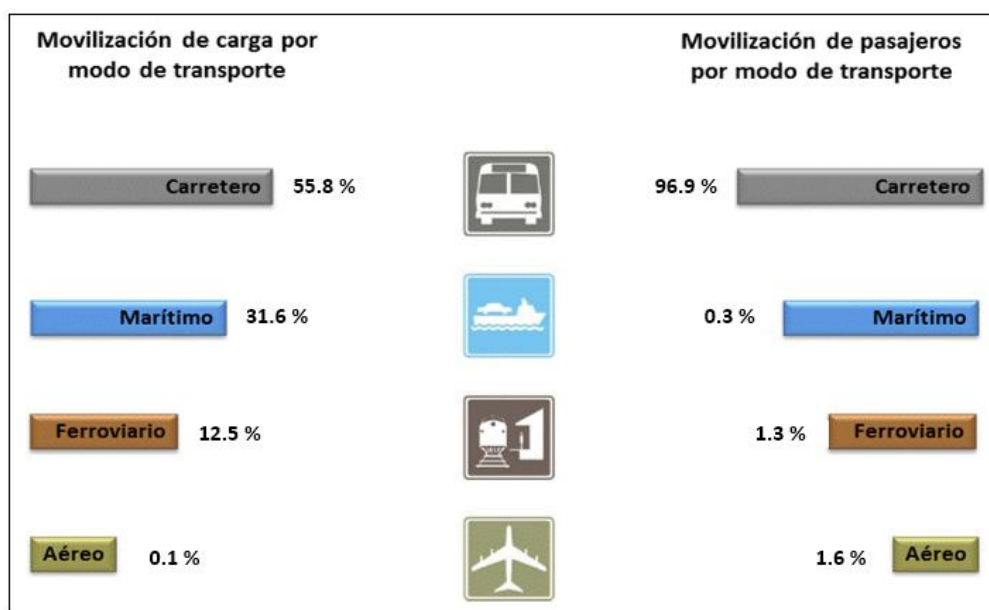
## Índice de Tablas

Tabla 1 Factor de ponderación tarifaria (HA, Hun-Koo-KIM, Chun Kon).....	29
Tabla 2 Cuotas relativas respecto al vehículo C2 (Alfonso Rico R.).....	32
Tabla 3 Categorías vehiculares para aplicación de peajes, CAPUFE .....	37
Tabla 4 Categorías vehiculares para aplicación de peajes, SCT.....	37
Tabla 5 Resumen de los modelos y esquemas tarifarios analizados.....	38
Tabla 6 Insumos para la metodología .....	49
Tabla 7 Peso bruto vehicular máximo autorizado por clase de vehículo y camino .....	49
Tabla 8 Definición de los vehículos equivalentes por categoría. ....	51
Tabla 9 Cálculo de ESALES por la configuración del vehículo.....	52
Tabla 10 Daño causado expresado por vehículo equivalente (VE).....	54
Tabla 11 Coeficientes de equivalencia según tipo de terreno.....	54
Tabla 12 Coeficientes de equivalencia según tipo de terreno.....	55
Tabla 13 Costo anual por daño a la infraestructura causado por vehículos ligeros (VE <sub>A</sub> ) .....	56
Tabla 14 Costo anual por daño a la infraestructura causado por autobuses (VE <sub>B</sub> ) .....	57
Tabla 15 Costo anual por daño a la infraestructura causado por vehículos de carga (VE <sub>C</sub> ) .....	57
Tabla 16 Definición de variables.....	58
Tabla 17 Coeficientes de equivalencia según tipo de terreno (CE <sub>i</sub> ).....	60
Tabla 18 Coeficientes de equivalencia de ocupación de espacio vial referidos a VA, CEO .....	61
Tabla 19 Flujos equivalentes.....	62
Tabla 20 Porcentajes para asignación de repartos de costos de mantenimiento por categoría vehicular .....	63
Tabla 21 Porcentajes para asignación de costos de mantenimiento(%Mi,t) .....	64
Tabla 22 Rangos de tarifas promedio en las principales autopistas de cuota del país.....	71
Tabla 23 Costo del factor de daño por vehículo de la categoría i .....	71
Tabla 24 Porcentajes para asignación de costos de mantenimiento (%Mi,t) .....	72
Tabla 25 Calculo del factor equivalente de carga .....	84
Tabla 26 Ejemplo de cálculo LEF .....	85
Tabla 27 Tránsito vehicular en los principales tramos de la red nacional de carreteras pavimentadas, 2002 y 2003.....	86

## Resumen.

En nuestro país la red carretera constituye la columna vertebral del sistema de transporte, ya que por las vías carreteras se transporta el 55.8 % de la carga nacional y el 96.9 % del movimiento de los pasajeros que se mueven en el territorio nacional. En el año 2011 por carreteras se transportaron 3, 472, 200 pasajeros, mientras que se movilizaron por este modo de transporte 893 millones de toneladas. La siguiente figura ilustra la participación modal del transporte de carga y de pasajeros en el país.

Figura 1 Participación modal en el transporte de carga y pasajeros en México



Fuente: Estadística Básica del Autotransporte Federal 2012, SCT

Dada la situación prevalecte del uso del transporte carretero como el principal modo de transporte en el territorio nacional, es necesario preservar el sistema carretero en condiciones tales que permitan su adecuado funcionamiento en términos de cobertura, calidad y operación. En el mundo las principales, y casi únicas, fuentes de recursos para financiamiento de inversiones en carreteras son las siguientes:

- El presupuesto general del Estado, aplicado en sus diferentes niveles.
- Los peajes aplicados en las autopistas de cuota.



c) El sobre precio a los combustibles que se aplica a los usuarios de automóviles en forma de impuesto Pigouviano mediante la aplicación de subsidios cruzados.

Derivado de lo enunciado anteriormente, en este trabajo se toma a la tarifa o peaje como punto de palanca para la operación y conservación del sistema de carreteras de autopistas de cuota, con el objetivo de sentar las bases de una metodología que permita el establecimiento de los niveles tarifarios en base a la maximización de la utilidad total y marginal para el concesionario y el administrador u operador de la vía.

La metodología propone el denominado “*esquema binomial*”, ya que se consideran dos tipos de costos en el análisis implicado: Los costos derivados de la operación y administración de la vía (costos fijos) que no dependen en forma directa de la distribución del aforo vehicular en la vía; y los costos por daño a la infraestructura (costos variables) los cuales dependen en forma directa de la variación y distribución del aforo vehicular.

En resumen: La metodología propuesta pretende establecer las pautas para el desarrollo de esquemas tarifarios que consideren la participación de ingresos y costos en la conformación de la utilidad bruta y marginal del operador de la autopista de cuota y que implícitamente garantice la maximización de ingresos mediante la reducción de costos.

El contenido del trabajo está organizado como sigue:

**INTRODUCCIÓN:** Se presenta un panorama general de la situación de las autopistas mexicanas enfocándonos en el histórico de los peajes en los últimos años.

**OBJETIVOS:** Se enuncian el “Objetivo General” y los “Objetivos Particulares” de la tesis desarrollada.

**ANTECEDENTES:** Panorámica de los modelos de tarificación para autopistas de cuota existentes. En este capítulo se presentan y comparan 5 metodologías desarrolladas y afines al tema; en forma resumida se presentan los tópicos más importantes de cada uno de los trabajos y el objetivo del modelo de tarificación. Al final del capítulo se presenta una tabla comparativa en la cual se identifica el modelo así como sus desventajas y ventajas respecto a nuestro enfoque, y el objetivo particular de cada modelo descrito.

**PROPUESTA METODOLÓGICA:** En este capítulo se desarrollan los nueve pasos de la metodología propuesta para establecer modelos tarifarios para autopistas de cuota con las características de interés:

- 1) Teoría de la utilidad y costos.
- 2) Conceptos básicos de costos e ingresos en una autopista de cuota.
- 3) Costo por daño a la infraestructura.
- 4) Ecuaciones básicas para determinar los costos variables.
- 5) Ecuaciones de costo fijo.
- 6) Ecuaciones de costo total.
- 7) Forma general de las ecuaciones de la utilidad.
- 8) Maximización de la utilidad marginal.
- 9) Arbitraje entre nivel tarifario óptimo y nivel de demanda.

La parte final de la tesis es donde se muestran las CONCLUSIONES del funcionamiento de la metodología, sus alcances y limitantes.

Por último se presentan los ANEXOS en donde se incluyen las memorias matemáticas empleadas para el desarrollo de la metodología.

## Introducción.

Dadas las crecientes demandas sociales de infraestructura carretera, en la mayoría de los países iberoamericanos se han tomado medidas legales y administrativas que favorezcan la inversión de capitales privados en la construcción, mantenimiento y operación de la infraestructura mediante el régimen de concesión.

Con el objetivo de recuperar la inversión y obtener un margen de utilidad, se considera la aplicación de un esquema tarifario mediante el cobro de un peaje por el uso de la infraestructura carretera.

En términos generales, se asocia el concepto de peaje a la tasa o tarifa que se cobra a un medio de transporte terrestre, fluvial o marítimo como derecho de tránsito para utilizar la infraestructura de la respectiva vía de comunicación.

Existen diferentes tipos de peaje para autopistas:

- Peaje abierto: Cuando a cada cierta distancia hay una caseta de peaje, donde se abona una cantidad.
- Peaje cerrado: Cuando al entrar en la carretera de peaje, se registra la entrada y se abona a la salida, según la longitud recorrida, sin más paradas intermedias.
- Peaje anual: En algunos países, los usuarios pagan anualmente una cantidad, que se acredita mediante una pegatina u holograma en el parabrisas, que les permite circular por todas las autopistas libremente.
- Peaje sombra: Se emplea cuando es una empresa comercial la que construye y opera la construcción de una autopista y el Estado paga el peaje de los vehículos que circulan por ella, de modo que se financia con los impuestos.

De acuerdo al análisis de los documentos presentados ante el Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamérica<sup>1</sup>, se observa que los peajes se aplican con dos propósitos diferentes:

---

<sup>1</sup> (Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamerica, 1997)

- a) En algunas carreteras se tiene por propósito remunerar inversiones, premiar riesgos y generar utilidades para empresas concesionarias que construyen, conservan, y operan tramos nuevos de la red, generalmente de mejores especificaciones que ofrecen a los usuarios ventajas de menor tiempo de recorrido, mayor seguridad y mayor comodidad a cambio de los peajes.
- b) En otras redes, los peajes se establecen con el objeto de recaudar fondos para la mejor conservación de la red carretera nacional originalmente libre.

Los esquemas tarifarios son en consecuencia diferentes; en el primer caso se busca por una parte atraer la máxima utilización de la infraestructura con tarifas aceptables para los usuarios y por la otra, obtener ingresos que garanticen la sustentabilidad económica y financiera para la seguridad de los inversionistas.

Algunos esquemas tarifarios no responden a criterios económicos si no que representan una vía adicional para la captación de impuestos. Otras tarifas resultan de niveles muy bajos porque solo tienen la finalidad de cubrir parcialmente los gastos de operación.

Los niveles tarifarios generalmente se aplican en base a la clasificación del parque vehicular. Esta clasificación se justifica bajo el criterio de que los vehículos que causan mayor daño a la infraestructura, en específico a la carpeta de rodamiento y a puentes; deben pagar peajes más altos; sin embargo con el doble propósito de simplificar la recaudación y de propiciar el abaratamiento del transporte de carga, existe la tendencia de reducir el número de tipos vehiculares de tarificación.

#### Panorama de la construcción de autopistas de cuota en México. [EM1]

Las primeras autopistas de cuota en el país fueron construidas como obra pública, para ello se creó un organismo público descentralizado: “Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos” (CAPUFE). La red de autopistas bajo este proyecto se tenía una longitud de 1000 km a principios de la década de los ochentas, dicha red conectaba la Ciudad de México con las principales ciudades aledañas. Las tarifas de cuota en esta red eran relativamente bajas, debido a que su objetivo solo era cubrir la operación y conservación de la infraestructura, no consideraba la amortización de la inversión porque fue establecida como fondo perdido.

A mediados de la década de los ochentas el gobierno enfrentó la necesidad de proporcionar mayor infraestructura, sin embargo, no se contaban con los recursos necesarios ya que los recursos públicos debían ser destinados a otras necesidades sociales así como al pago de la deuda externa e interna. Se creó así el Programa Nacional de Autopistas Concesionadas, dicho programa contemplaba la construcción de 5 000 km de autopistas de altas especificaciones, financiadas con

recursos tanto públicos como privados. El programa tuvo éxito al reactivar la industria constructora y del transporte, no obstante, presentó algunas complicaciones desde sus inicios<sup>2</sup>:

- La concesión se otorgaba a quienes ofrecían el menor plazo.
- Los Bancos no otorgaban créditos a plazos mayores de 10 años.
- Las tasas de interés eran relativamente altas.
- Los estudios de demanda eran perfectibles.
- Hubo sobrecostos en la construcción de las obras.

Las tarifas de operación de estas autopistas resultaron muy caras para la capacidad de pago del usuario, debidas en gran parte a las altas tasa de interés y los cortos plazos de concesión.

Para finales del año 1995 el gobierno acordó con los concesionarios un programa de compactación de tarifas, dicho programa comenzó su aplicación a partir de enero de 1996. El programa tuvo un éxito relativo, sin embargo, el gobierno se vio en la necesidad de implantar un programa de rescate carretero que se terminó de instrumentar en 1997, para ello se creó el Fideicomiso para el Rescate de Autopistas Concesionadas (FARAC) y se otorgó la concesión de todas las autopistas recatadas a BANOBRAS

Una vez hecho el rescate de carreteras el Gobierno Federal procedió a reducir las cuotas por peaje disminuyendo significativamente las tarifas para todos los vehículos, principalmente los vehículos de carga, ya que se tenía la certeza mediante estudios realizados que la elasticidad precio-demanda permitiría disminuir las tarifas para aumentar los ingresos. Como se esperaba en el periodo 1997-1999, el aforo en la red de carreteras rescatadas aumentó en un 12% promedio anual.

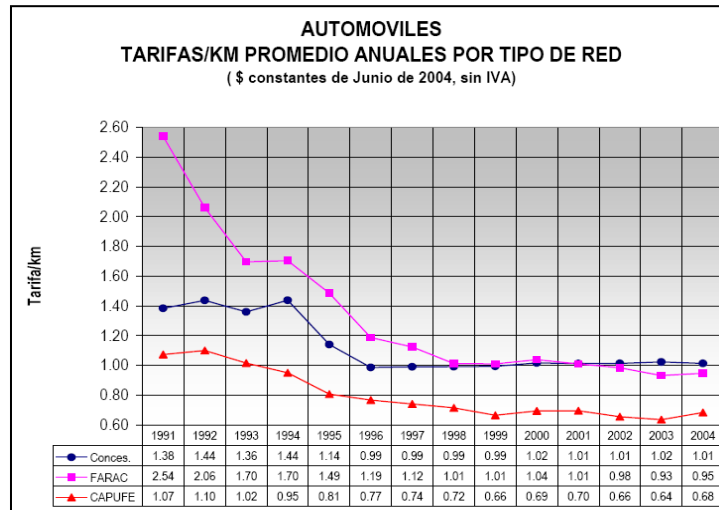
Adicionalmente se modificaron las estructuras tarifarias, pasando de un esquema basado en el número de ejes a uno basado en el tipo de vehículos. Con ello se pasó de diez a cuatro categorías establecidas: automóviles (A); autobuses y camiones ligeros (B-C4); camiones medianos (C5-C6) y camiones pesados o articulados (C7-C9).

Se presentan a continuación las gráficas por tipo de vehículo que muestran el comportamiento de las tarifas por kilómetro promedio anuales por tipo de red, en el periodo comprendido entre 1994 y 2004.

---

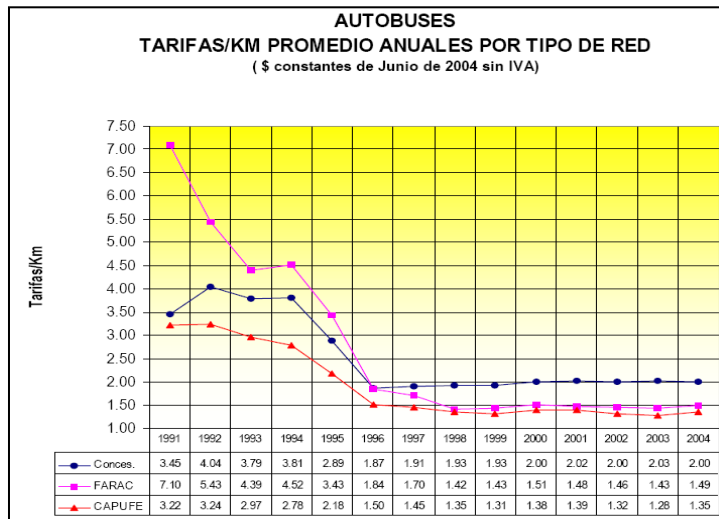
<sup>2</sup> (Rico Galindo)

**Figura 2 Comportamiento de la tarifa para automóviles (1991-2004)**



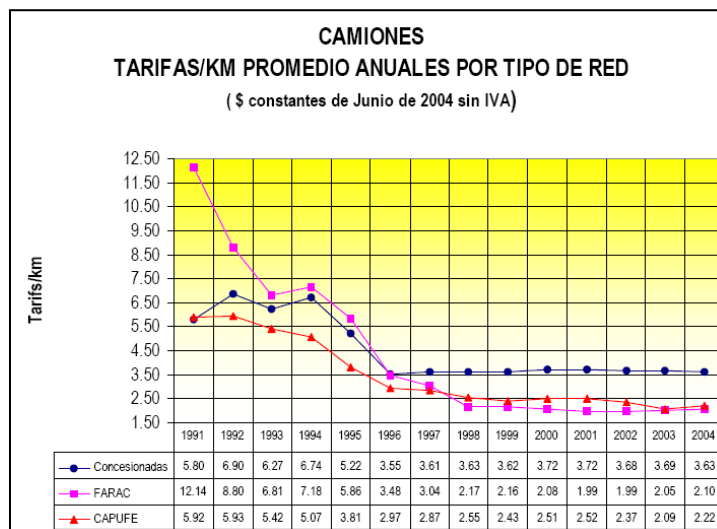
Fuente: Santiago Rico Galindo, Determinación de tarifas óptimas para la Red Mexicana de Autopistas de Cuota

**Figura 3 Comportamiento de la tarifa para autobuses (1991-2004)**



Fuente: Santiago Rico Galindo, Determinación de tarifas óptimas para la Red Mexicana de Autopistas de Cuota

**Figura 4 Comportamiento de la tarifa para camiones (1991-2004)**



Fuente: Santiago Rico Galindo, Determinación de tarifas óptimas para la Red Mexicana de Autopistas de Cuota

Nótese que a partir del rescate carretero y del último ajuste de tarifas (enero de 1996), éstas se han mantenido prácticamente constantes pero con una ligera tendencia a la baja.

En años más recientes el Gobierno Federal decidió fusionar las redes de autopistas de FARAC y de CAPUFE en una sola red. El resultado ha sido positivo ya que ha permitido tener un excedente que se puede destinar a obras de mantenimiento o construcción de nueva infraestructura. No obstante sigue siendo tema de preocupación el determinar si las tarifas aplicadas en este momento son las adecuadas.

Existen algunas propuestas para afrontar el diseño de un esquema tarifario, sin embargo la mayoría de estos modelos tiene un enfoque a la maximización de ingresos o al beneficio colectivo a través del nivel de servicio que se presta al usuario de las autopistas.

La deficiencia más importante en el esquema de tarificación actual aplicado en las carreteras mexicanas es pretender obtener ingresos máximos por la operación de una autopista de cuota mediante la disminución de tarifas y esperando como consecuencia un mayor ingreso por un esperado aumento en la demanda, sin considerar los costos por mantenimiento de la infraestructura asociados al aumento en el aforo vehicular principalmente de vehículos de carga.[EM2]

Si bien es cierto que se tiene un conocimiento empírico acerca de la distribución óptima del volumen de la demanda por tipo de vehículos en una autopista que maximicen los ingresos para el

operador, no existe un modelo matemático que permita obtener una tarifa óptima, tal que maximice la utilidad financiera del operador.

Es por lo expuesto anteriormente que se busca en este trabajo, mostrar la metodología para obtener un esquema tarifario binomial que maximice las utilidades para el operador, en función del aforo, tarifa aplicada y costos de operación y mantenimiento. Se entenderá como binomial, ya que el modelo se desarrollara en base al análisis de dos tipos de costos: costos fijos y costos variables.



## Objetivos.

### Objetivo general.

Desarrollar la metodología que permita diseñar un esquema tarifario binomial para autopistas de cuota que maximice las utilidades para el operador, en función del aforo, tarifa aplicada y costos de operación y mantenimiento.

### Objetivos particulares.

Conocer y calcular el daño a la infraestructura dada la distribución de la demanda vehicular.

Determinar y establecer las siguientes ecuaciones que permitan establecer las ecuaciones que conformen el modelo para el esquema tarifario binomial para autopistas de cuota bajo el propósito de maximización de la utilidad:

- Ecuaciones generales para determinar los costos variables por tipo de vehículo y tipo de terreno.
- Ecuaciones generales para determinar los costos fijos por tipo de vehículo y tipo de terreno.
- Determinar las ecuaciones de costo total por tipo de vehículo y tipo de terreno.
- Establecer las ecuaciones generales de utilidad total y marginal.
- Desarrollar el método en que se obtendrá la maximización de las ecuaciones de utilidad total y marginal.
- Desarrollar la propuesta del arbitraje entre el nivel óptimo de utilidad-demanda vehicular, y el nivel real o de operación.

## **Problemática.**

Modelos tarifarios basados en un enfoque preferente a maximización de ingresos y en algunos casos en la calidad brindada al usuario de autopistas de cuota, por lo que consideran la obtención de mayores ingresos a través del estimular el aumento en la demanda sin considerar la distribución por vehículo del aforo vehicular y los costos por mantenimiento asociados.

El modelo tarifario actual aplicado en las autopistas mexicanas se basa en obtener los mayores ingresos por peajes, obedeciendo a la función de la demanda la cual indica que el máximo aforo se obtiene cuando las tarifas sean menores. Aunque en teoría al minimizar las tarifas se obtienen los mayores aforos y con ello se esperarían los mayores ingresos económicos, el esquema de tarificación actual asume que los costos por operación y mantenimiento de la infraestructura son poco variables ante el cambio en el aforo; sin embargo, en la realidad a medida que aumenta la demanda por tarifas más bajas es común que el volumen de vehículos pesados atraído aumente. El aumento en la demanda de vehículos pesados provoca mayores costos de mantenimiento a la autopista, en específico a la carpeta de rodamiento, ya que son dichos vehículos los que provocan mayor daño. Como consecuencia del incremento del costo de mantenimiento se presenta una reducción en la utilidad total y marginal de vehículos pesados.

Falta de una metodología que relacione la utilidad total o marginal por tipo de vehículo con la distribución de la demanda y los costos asociados a ella por mantenimiento de la vía; como base para obtener el nivel tarifario que satisfaga la utilidad máxima.

## **1 Antecedentes: Panorámica de los modelos de tarificación para autopistas de cuota existentes.**

Los enfoques clásicos para establecer la tarifa en una autopista de cuota son esencialmente los dos mencionados a continuación:

- Desde el enfoque de una empresa concesionaria encargada de la operación y mantenimiento de la autopista, existen dos criterios que se contraponen. Por un lado se busca la tarifa más alta que provea de los máximos ingresos por recaudación de tarifas, sin embargo es determinante analizar el impacto de estas tarifas en la decisión del usuario y como afecta al aforo de vehículos esperados. Por tanto la cuota óptima bajo este enfoque será la que consiga los mayores ingresos para la administración con el mayor número de vehículos dispuestos a pagar dicha tarifa.
- Desde el punto de vista social, la cuota óptima sería aquella que logre el menor costo para el transporte y/o ofrezca el mayor servicio al usuario. Sin embargo es obvio que el ofrecer mejores condiciones en la infraestructura y sus servicios asociados, aumenten los costos de inversión, operación y mantenimiento de la vía. Entonces la cuota optima será aquella que permita las mejores prestaciones al usuario pero cuidando los costos que ello implica.

Los costos principales a considerar para la operación y mantenimiento de la vía:

- Recuperación de la inversión por construcción de la infraestructura y la tasa de rendimiento esperada.
- Amortización del crédito por financiamiento, si es que alguna parte del capital para construcción fue obtenido de tal fuente.
- Gastos de administración.
- Impuestos sobre utilidades finales.
- Costos operativos de la autopista, derivados de la organización de servicios como lo son el cobro de peaje, seguridad en casetas de cobro, etc.
- Costos de mantenimiento de la infraestructura.

En las siguientes páginas se presentan las características de algunas propuestas metodológicas existentes y su principal enfoque; los trabajos considerados son los siguientes:

1. “Propuesta preliminar de un modelo econométrico para actualizar tarifas de cuota en autopista mexicanas” por Salvador Flores Hernández.
2. “Un modelo de autopistas con peajes como precios de servicios. El peaje en autopistas como precio por un servicio y como garante de sostenibilidad” por Carles Vergara y Francesc Robusté.
3. “An Application of Two-part Tariff Pricing to Expressway: A Case of Korea” por HA, Hun-Koo-KIM y Chun Kon.
4. “Criterios para establecer la cuota optima en una autopista de cuota” por Alfonso Rico Rodríguez
5. Criterios de la SCT-CAPUFE

### **1.1 “Propuesta preliminar de un modelo econométrico para actualizar tarifas de cuota en autopistas mexicanas”. Salvador Flores Hernández**

El autor considera la necesidad de establecer una tarifa adecuada para autopista de cuota como instrumento para alcanzar los siguientes objetivos:

- Obtener la recuperación de la inversión de proyecto en el menor tiempo posible.
- Lograr un excedente de ingresos para la administración.
- Cubrir los gastos derivados de la operación y mantenimiento de la autopista.

El modelo desarrollado por Flores H. considera que la tarifa para una autopista de cuota está en función de tres variables significativas:

1. Flujo en la vía expresado en términos del Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA).
2. Ingresos para el operador de la vía, originados de la recaudación de cuotas por peaje.

3. Costos de mantenimiento, derivados de las erogaciones hechas por la administración de la autopista para conservar la misma en condiciones de servicio definidas.

Así pues, se desarrolla un modelo generalizado de carácter econométrico expresando de la siguiente manera:

$$Tarifa = \beta_0 + \beta_1 I + \beta_2 TDPA + \beta_3 CM$$

Dónde:

$\beta_i$ , son constantes obtenidas por calibración del modelo

$I$ , es el Ingreso por recaudación de peajes

$TDPA$ , Transito Diario Promedio Anual en la Autopista

$CM$ , Costo de Mantenimiento de la infraestructura

La fundamentación del modelo es la actualización de tarifas tomando como punto de partida información estadística existente de las variables explicativas involucradas. Es por ello importante aclarar, que el desarrollo de este modelo implica las siguientes suposiciones:

- Que se tiene una “autopista madura”, es decir que se encuentra actualmente en operación. Este supuesto es fundamental ya que con ello se esperaría contar con la información de las variables involucradas.
- Supone la obtención de ingresos altos con la tarifa adecuada, asumiendo que se cuenta con un aforo vehicular asegurado mediante condiciones de servicio y rentabilidad<sup>3</sup> de la autopista.

Una bondad del modelo, en términos estadísticos, es que ofrece una demostración acerca de la correlación e independencia entre las variables explicativas. Así se puede asegurar lo siguiente:

- La tarifa es dependiente de las variables explicativas enunciadas con anticipación, en un nivel de 98 % según lo estimado por el autor.
- Se tiene independencia entre variables explicativas.

Desventajas observadas de acuerdo al objetivo de la tesis en desarrollo.

---

<sup>3</sup> El autor define la rentabilidad como la relación entre los costos de mantenimiento y los ingresos.

El modelo está planteado en base a una autopista en particular, de ahí que su aplicación a otros casos pudiera no ser la mejor estrategia, aun cuando el autor especifica que los coeficientes de las ecuaciones pueden ser obtenidos de la calibración del modelo para de cada caso en particular.

Aplica esencialmente para proyectos maduros, dada la necesidad de contar con la información que alimenta el proceso estadístico para la obtención de las constantes  $\beta_i$ , las cuales se obtienen manipulando la información mediante un ejercicio estadístico de mínimos cuadrados.

Asume que la variación en la demanda no está afectada por el incremento en las tarifas, y con ello se espera obtener los máximos ingresos para la administración.

La información se maneja en forma agregada y con ello se pasa por alto la variación del aforo por tipo de vehículo y su repercusión en los costos de mantenimiento, ya que al manejar la información de TDPA y Costos de Mantenimiento en forma agregada, implícitamente se asume que todos los vehículos participan en la misma proporción de los costos de mantenimiento por daño a la infraestructura, en específico la carpeta de rodamiento, en la misma proporción.

## **1.2 Un modelo de autopistas con peajes como precios de servicios. “El peaje en autopistas como precio por un servicio y como garante de sostenibilidad”. Carles Vergara y Francesc Robusté.**

Los trabajos realizados por Vergara y Robusté proponen visualizar al peaje o tarifa como un precio asociado al pago por un servicio diferencial recibido, en contraste con el enfoque puramente financiero en donde la tarifa es concebida como un pago para sostener los gastos financieros por operación y mantenimiento de la infraestructura y la obtención de un cierto beneficio por parte de la entidad concesionaria.

Lo anterior implica obtener una tarifa en función de la diferencia del nivel de servicio respecto a la mejor alternativa razonable y considerando el flujo en entornos metropolitanos (tasas de congestión)

El servicio diferencial por el bien recibido puede evaluarse en términos de algunos criterios tales como:

- Ahorro de tiempo
- Capacidad de la vía
- Demanda libre de peaje
- Incremento en la regularidad de tiempo de viaje
- Incremento en la seguridad y confort
- Costos sociales, es decir las externalidades provocadas por el usuario
- Variación horaria de flujo, consideración de horas pico y valle.
- Alternativas de multimodalidad

Para evaluar los criterios antes mencionados, se propone comparar los servicios recibidos al usar tanto la autopista de cuota y su más cercana competencia, es por ello que se introduce el concepto de razonabilidad, el cual en teoría garantizaría comparar alternativas que al usuario le ofrecen un servicio más o menos cercano, evitando hacer la comparación entre alternativas que no implican una decisión del usuario o la probabilidad de que el usuario opte por alguna alternativa en particular.

Tomando en cuenta lo previo, la tarifa deberá ser creciente con el diferencial de prestaciones entre autopista y su mejor alternativa hasta llegar a una situación en que la alternativa ofrece prestaciones muy bajas respecto a la autopista y, después de una zona de estabilidad donde se alcanza el máximo de la tarifa, si las prestaciones diferenciales siguen aumentando, el peaje se reduce progresivamente para equilibrar flujos en el total del corredor. Esta consideración permite alcanzar situaciones muy próximas al óptimo social en cada corredor.

Los criterios anteriormente enunciados permitirían el uso del peaje como gestor a dos niveles en el entendido de que se necesitarían establecer relaciones entre administraciones competentes y empresas concesionarias:

En el primero, el peaje funcionaría como *gestor de las vías de altas prestaciones*, permitiendo aplicar compensaciones entre concesiones. Mediante ello se busca reducir el riesgo adquirido por construcción y financiamiento inicial para las concesiones nuevas, ya que se estaría en la posibilidad de recibir aportaciones de concesiones maduras que ya generen elevados beneficios.

Por otro lado el peaje puede ser empleado como gestor de la movilidad de todo el *sistema de transporte* y el valor de la tarifa regula la elección modal del usuario y permitiría conseguir un transporte sostenible mediante el pago de las externalidades que el usuario provoque y permitir la financiación del transporte público con cierta parte de la tarifa de las vías de altas prestaciones.

El cambio de enfoque propuesto para el peaje, implica tener un modelo que garantice un beneficio colectivo, según las palabras de los autores.

El equilibrio buscado se puede plantear con la siguiente expresión:

$$I(Q^0) + \sum_{j=1}^T m_j(q_j, Q^0) + \sum_{j=1}^T B_j^0 = \sum_{j=1}^T (\tau_j + \sigma_j) q_j$$

En base a las siguientes variables:

$T$ ; tiempo de operación en años

$\tau_j$  ; tasa de peaje óptima para el año  $j$  desde el punto de vista social.

$I(Q^0)$ ; inversión realizada en el año 0 y que depende de un mínimo nivel de calidad  $Q^0$

$m_j(q_j, Q^0)$ ; son los costos de operación y mantenimiento para cada año  $j$ , en función del aforo  $q_j$  y el nivel de calidad  $Q^0$ .



$B_j^0$ ; beneficios previstos por el operador en el año  $j$

$\sigma_j$ ; es la tarifa sombra con la que contribuiría la Administración si no hay excedentes o ingresos netos que permitan al operador cubrir sus obligaciones para garantizar el equilibrio financiero.

Los argumentos presentados por Vergara y Robusté se conciben como un enfoque a nivel de red, en donde son necesarias relaciones horizontales entre las distintas administraciones y operadoras, y no un enfoque de una concesión en particular.

### El peaje como precio.

Los autores formulan una función de peaje que incorpora tres situaciones:

*Peaje mínimo*  $\tau_m$ . Se trata de una tarifa aceptable, tal que cubriría los gastos de operación y mantenimiento; es decir, se trata de una tasa por uso independientemente de otras consideraciones.

*Peaje como precio por servicios diferenciales*  $\tau(\Delta\varphi)$ . Este componente tarifario deberá reflejar el equivalente monetario de los servicios diferenciales recibidos por el usuario al utilizar la carretera de alta capacidad con respecto a una alternativa “multimodal” razonable. Se podrían inicialmente considerar los siguientes cinco factores indicadores de las prestaciones:

Tiempo de viaje

Seguridad

Regularidad del tiempo de viaje

Servicios (en calidad y cantidad)

Multimodalidad (existencia de transporte público)

En una primera aproximación para una distancia de recorrido dada, la función  $\tau(\Delta\varphi)$  puede definirse a partir de una curva logística que relacione la probabilidad de elección de la autopista de peaje en función del propio peaje y las otras variables explicativas.

*Peaje como mecanismo garante de sostenibilidad*  $(\tau(q))$ . Puede verse como un impuesto pigouviano, cuyo propósito es poner precio a las externalidades causadas por el usuario de la vía. Esta tasa es no lineal con el flujo e independiente de la capacidad de la vía, ya que se aplica en situaciones de congestión independientemente si se trata de vías de baja o alta capacidad. Por tanto los precios durante las horas pico deberían ser más elevados que en hora valle.

La función  $\tau(q)$  adquiere el siguiente valor para una determinada curva de costos medios:

$$\tau(q) = \frac{\partial c_{medio}(q)}{\partial q} q$$

Donde  $\tau$  es la tarifa unitaria (\$/veh-km),  $q$  es el flujo de tráfico y  $c(q)$  son los costos unitarios medios de recorrer la distancia de referencia.

La integración de los tres conceptos, con anterioridad expuestos, permite formalizar una función de peaje a maximizar y con la siguiente estructura:

$$\tau = \max\{\tau_m, \tau(\Delta\varphi), \tau(q)\}$$

Desventajas observadas de acuerdo al objetivo de la tesis en desarrollo.

Evaluación de criterios subjetivos como lo son el Nivel de Servicio y la medición de externalidades.

El modelo generalizado es: (-) COSTOS + BENEFICIOS = INGRESOS ( $\tau_j, q_j$ ). Particularmente pienso que es una desventaja para el modelo propuesto, pretender definir una tarifa que concilie intereses comúnmente contrapuestos como lo son el nivel de servicio al usuario con los mayores ingresos para el operador bajo un mismo concepto de precio tarifario.

No hay una propuesta específica de buscar manejar la información de aforos y costos de operación y mantenimiento de forma desagregada por categorías de vehículos.

### **1.3 “An application of two-part tariff pricing to expressway: A case of Korea”. HA, Hun-Koo-KIM, Chun Kon**

En este documento, los investigadores proponen el cambio en el esquema tarifario de las tarifas para las autopistas en Corea. Se plantea un sistema tarifario binomial, o en dos partes; tal que garantice la recuperación del costo de la inversión hecha y asegure una fuente de recursos para inversiones a realizar en el futuro.

La tarifa binomial propuesta consiste en una tarifa base y una tarifa variable. La tarifa base es cobrada a todos los usuarios de la autopista independientemente de la medida en que utilizan la misma, en tanto la tarifa variable es cobrada en proporción en que utilizan la vía.

Con esta propuesta de esquema tarifario, se sugiere también a que conceptos estarían destinados cada parte de la tarifa:

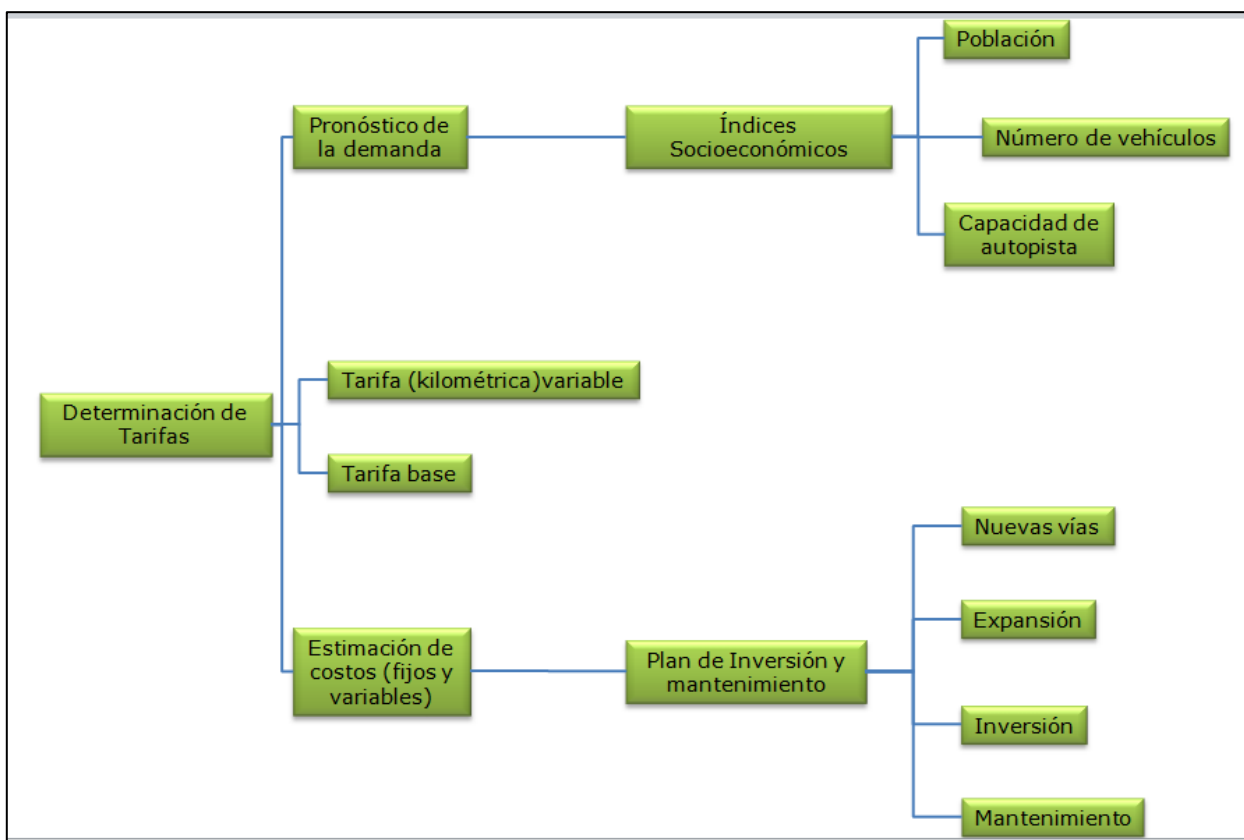
- Aspectos cubiertos por medio de la tarifa base (Costos fijos): Costo de la inversión para la construcción, incluyendo desarrollo, expansión y mejoramiento de la vía.
- Aspectos cubiertos por medio de la tarifa variable (Costos variables): Costo de operación, administración y mantenimiento, así como rendimiento esperado de la inversión.

Así mismo, se propone la diferenciación de tarifas a través de la asignación de costos por categorías de tipos de vehículo, dado que se trata de un problema de asignación de costos entre automóviles ligeros y camiones pesados.

El argumento esencial para aplicar una tarifa diferencial a los vehículos en función de la categoría a la que pertenecen, es que los vehículos pesados deben de pagar una tarifa más alta que los vehículos ligeros en función del daño causado a la vía.

La siguiente figura muestra los criterios en los que se basa el procedimiento para la determinación de la tarifa propuesta:

Figura 5 Criterios para establecer una tarifa binomial



Fuente: Elaboración Propia en base a la publicación de HA, Hun-Koo-KIM, Chun Kon

La tarifa binomial se calcula de la siguiente manera:

La tarifa base se define en función de dos variables, la cuenta pública a recuperar y el número de vehículos que usen la vía durante el periodo de recuperación, de tal forma que:

$$\text{Tarifa base} = \frac{\text{Cuenta pública a recuperar}}{\text{Numero de vehículos usando la vía durante el periodo de recuperación}}$$

La tarifa base se ajusta de acuerdo a factores de ponderación por tipo de vehículo, mostrados en la siguiente tabla, para obtener de esta forma la tarifa base para cada categoría de vehículo.

Tabla 1 Factor de ponderación tarifaria (HA, Hun-Koo-KIM, Chun Kon)

Categoría del vehículo	Vehículo	Factor de ponderación tarifaria
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sedán</li> <li>Omnibuses hasta 16 pasajeros</li> <li>Vehículos de carga hasta 2.5 M/T</li> </ul>	1.00
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Omnibuses para 17 a 32 pasajeros</li> <li>Vehículos de carga entre 2.5 a 5.5 M/T</li> </ul>	1.05
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Omnibuses para más de 33 pasajeros</li> <li>Vehículos de carga entre 5.5 a 10 M/T</li> </ul>	1.08
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vehículos de carga entre 10 a 20 M/T</li> </ul>	1.86
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vehículos de carga para 20 M/T o más</li> </ul>	1.90

Fuente: Elaboración Propia en base a la publicación de HA, Hun-Koo-KIM, Chun Kon

Nota: Para vehículos subcompactos, se aplica el 50 % de la tarifa de la categoría 1

La *tarifa variable* (o kilométrica) está expresada en términos de los costos variables anuales y el número total de kilómetros recorridos por todos los vehículos al año:

$$Tarifa\ base = \frac{Costo\ variable\ total\ anual}{Total\ de\ kilometros\ recorridos\ por\ todo\ el\ aforo\ al\ año}$$

De forma análoga a la tarifa base, la tarifa variable se ajusta de acuerdo a factores de ponderación por tipo de vehículo (Tabla 1), para obtener de esta forma la tarifa variable por kilómetro para cada categoría de vehículo.

Desventajas observadas de acuerdo al objetivo de la tesis en desarrollo.

Se desarrolla la tarifa en dos partes considerando el total del aforo. La tarifa base y variable para cada categoría de vehículo se propone obtenerse mediante factores de ponderación tarifaria, en donde ya se han considerado los efectos en los costos de mantenimiento por tipo de vehículo. Considero ello una desventaja, ya que el análisis se hace en función de información agregada, aunque en términos de facilidad de manejo del modelo es bastante conveniente si los factores de ponderación tarifaria pueden reflejar el impacto en costos por tipo de vehículo.

## 1.4 “**Criterios para establecer la cuota optima en una autopista de cuota**”. Alfonso Rico Rodríguez.

La metodología propuesta por Rico está basada en su aplicación a autopistas nuevas con demanda poco arraigada bajo el argumento de que las autopistas que cumplan dicha característica presentan una demanda mucho más elástica en comparación con una autopista con muchos años de operación. Otra característica del trabajo de Rico es que se orienta su metodología principalmente a los vehículos de carga, en especial a los más comunes en las autopistas mexicanas; con la finalidad de optimizar la captación del transporte de carga en las autopistas de cuota.

Rico propone dos enfoques:

- Tarifa que maximiza los ingresos del operador de la autopista
- Tarifa correspondiente al mínimo costo nacional del transporte

Para interés de la tesis presentada, me avocaré a la descripción de la tarifa que ofrezca los ingresos máximos al operador de la autopista.

### Tarifa que maximiza los ingresos del operador de la autopista.

Rico considera como punto de partida, la utilidad de elegir utilizar la autopista de cuota o bien escoger usar una vía libre alterna; mediante este enfoque se obtienen las probabilidades de preferencia para cada vialidad en función del costo que implica tal decisión.

Debido a que para cada tipo de vehículo, los costos de operación, daño a la infraestructura y cuota que pagan son variables; lo ideal sería proponer una ecuación para cada tipo de vehículo y sus configuraciones, sin embargo, al resultar poco practica esta propuesta el autor propone utilizar una sola ecuación en donde se incluyan los promedios de las variables explicativas del modelo para los tipos de vehículo más importantes que componen el tránsito vehicular. Cabe mencionar que en esta metodología no se contemplan los automóviles ni los autobuses, y para los vehículos de carga se consideran únicamente las siguientes configuraciones: C2, C3, T3S2, T3S3 y T3S2R4.

Para determinar la tarifa óptima se toma como referencia el vehículo C2, a partir de esta referencia se determinan las tarifas para el resto de los vehículos en base a dos aspectos diferentes:

El daño que ejerza cada tipo de vehículo a la infraestructura, relacionado con el costo de mantenimiento.

Alguna característica que permita diversificar el cobro que a cada tipo de vehículo se le haga, de acuerdo a los autores de esta metodología debe ser justa para el usuario, benéfica para el transporte nacional y compatible con los intereses del recaudador. La característica propuesta en la metodología es la capacidad de carga útil relativa de los vehículos.

En la siguiente tabla se muestra la propuesta de factores tarifarios tomando como referente al vehículo C2:

Tabla 2 Cuotas relativas respecto al vehículo C2 (Alfonso Rico R.)

Tipo de vehículo	Coefficiente de daño relativo	Coefficiente de carga relativa	Coefficiente de pago relativo propuesto
A	-	-	0.50
B2	-	-	1.00
B3	-	-	1.30
C2	1.0	1.0	1.00
C3	1.3	1.6	1.45
T3S2	1.7	2.8	2.25
T3S3	2.0	3.2	2.60
T3S2R4	1.3	4.0	2.65

Fuente: Criterios para establecer la cuota optima en una autopista de cuota. Alfonso Rico Rodríguez, IMT

Mediante la introducción de datos reales de aforo en 30 principales autopistas mexicanas de cuota y libres, se calibraron parámetros para simplificar la ecuación de probabilidad de elección de la vía de cuota. A partir de ella se determina la ecuación de flujo diario para la autopista en función del



flujo diario en el Origen-Destino considerado, así como los costos incurridos por los vehículos por las alternativas de cuota y libre, y la tarifa por la autopista de cuota.<sup>4</sup>

La ecuación a iterar es una derivada e igualada a cero para obtener la tarifa que proporcione el máximo ingreso es la siguiente:

$$[(0.03(\bar{T}_i' - \overline{Det}_i)) - 1]e^{[1.2+0.003(\bar{C}_i+\bar{T}_i'-\bar{C}_j)]}$$

Dónde:

$\overline{Det}_i$  , es el promedio ponderado del costo del deterioro causado por los diferentes tipos de vehículo que interviene en el flujo, por sus porcentajes correspondientes en el tránsito combinado.

$\bar{C}_i$  y  $\bar{C}_j$  , son los costos de operación vehicular promedio incurridos por los vehículos de carga en las alternativas de cuota y libre, respectivamente.

$\bar{T}_i'$  , es la cuota promedio ponderada que debe asignarse a los vehículos de carga, según su respectiva participación en el flujo vehicular total que hace máximo el ingreso neto.

La tarifa  $\bar{T}_i'$  servirá para determinar la cuota particular para los diferentes tipos de vehículos de carga. Para el caso de automóviles y autobuses, en vez de utilizar un enfoque de *modelación de demanda* (como se propone para el caso de vehículos de carga), su tarifa se fijará en función de los valores obtenidos en la Tabla 2. El argumento para manejar de forma diferente las tarifas para vehículos particulares y autobuses es debido a que sus patrones de preferencia entre la vía libre y la de cuota son diferentes a la de los vehículos de carga.

Con la tarifa promedio ponderada se hace un análisis<sup>5</sup> en donde se obtiene la tarifa para el vehículo de referencia, es decir el C2. Conocida la cuota correspondiente al vehículo C2, las cuotas de todos los demás tipos se obtienen con los coeficientes de relación indicados en la Tabla 2.

Finalmente con el análisis de preferencias se puede verificar el impacto de la tarifa en las preferencias de los usuarios con respecto a la alternativa libre de peaje.

---

<sup>4</sup> Para el lector interesado se ofrece un sumario de las ecuaciones propuestas por el autor del modelo propuesto en la sección de anexos.

<sup>5</sup> El desarrollo detallado se encuentra en la referencia 5.

### Desventajas observadas de acuerdo al objetivo de la tesis en desarrollo.

El modelo propuesto se basa en predicciones del aforo y usa a la tarifa como un mecanismo para comprobar el aforo una vez que se ha determinado la tarifa que maximiza los ingresos al operador.

Este modelo se enfoca exclusivamente en el análisis para vehículos de carga, proponiendo basar el análisis en un vehículo en específico (C2) y a partir de la tarifa estimada para el vehículo referencia estimar las tarifas de las categorías restantes en base a coeficientes de pago relativos.

Por último se considera la comparación de costos de operación vehicular entre la autopista de cuota y la alternativa sin peaje, volviendo demasiado complicado el modelo debido al aumento de las variables para los costos de operación de vehículo.

## **1.5 Criterio para fijación de tarifas. SCT-CAPUFE**

El criterio empleado por la Administración pública para la definición de las tarifas en las autopistas de cuota del país es el de regulación por estructura de precios debido a que el aforo y su composición son desconocidos.

Para ello se considera el análisis de los costos variables implicados en el funcionamiento de la vía, ya que los costos fijos son independientes de las tarifas aplicadas.

El análisis de costos variables está enfocado principalmente a los costos de mantenimiento derivados de la variación del aforo en la vía. Dado que inicialmente no se conocen los aforos en la autopista, es usual considerar un rango de valores para los costos variables (costos de mantenimiento) de tal forma que se tengan los costos mínimos de mantenimiento para el mínimo aforo considerado y los costos de mantenimiento máximo para el máximo aforo esperado.

Así se obtiene un rango de valores de costos de mantenimiento a partir del cual se puede proponer la tarifa que considere también los costos fijos de la operación de la vía.

Una vez que la autopista entra en operación, se pueden obtener los aforos y su composición que permita considerar una posible variación en la tarifa establecida.

Así pues se puede obtener de forma general una tarifa en definida como:

$$Tarifa = \frac{Costos\ fijos + Costos\ Variables\ de\ Autopista}{Aforo\ anual}$$

### Modelo propuesto por la SCT para determinación de tarifas óptimas (SCT).

Se integró un grupo multidisciplinario de expertos relacionados con el tema de tarifas, integrado por personal de la SHCP, SCT, BANOBRAS y CAPUFE.

Se determinó la elaboración de un modelo interactivo, con un enfoque sistémico, estructurado en módulos o subsistemas según las variables que inciden en la determinación de una tarifa y la interacción entre variables.

Los módulos contemplados son:

#### **MÓDULO ECONOMÉTRICO.**

El objetivo general de este módulo es conformar una base de datos y un conjunto de modelos de simulación que permitan establecer tarifas óptimas para cada autopista de manera que satisfagan compromiso financieros y exigencias sociales.

En base al objetivo se definió el propósito fundamental de construir modelos de regresión múltiple que permitieran cuantificar los impactos sobre el aforo y los ingresos que resultarían de las alternativas de modificación de los niveles tarifarios.

#### **MÓDULO DE MERCADO**

El objetivo general de este módulo es crear una base de datos y un conjunto de información, mediante las cuales se cuente con capacidad para avanzar en la identificación de los mercados que utilizan el corredor de transporte y permita determinar el potencial de captación de la autopista de cuota, respecto a su vía alterna libre, para cada uno de los diferentes grupos vehiculares y que contribuya al establecimiento de tarifas óptimas para cada autopista y puente de cuota.

A partir de tal objetivo se definió el propósito fundamental el cual es diseñar las encuestas de preferencia de los usuarios y analizar la información histórica disponible, tanto de datos viales en las carreteras libres, publicados por la SCT, como de los aforos de la autopista de cuota, medidos en las casetas de peaje y cuya información también se recopila y analiza en la SCT y en Capufe.

#### **MÓDULO FINANCIERO**

El objetivo general de este módulo es crear una base de datos y un modelo de simulación financiera, mediante los cuales se cuente con capacidad para identificar las variaciones que pueden sufrir los compromisos financieros de pago de deuda y amortizaciones bancarias ante las

variaciones de las tarifas y las tasas de interés, que permitan identificar los límites de las variaciones de ingresos de cada autopista de cuota, para cada uno de los diferentes escenarios macroeconómicos del país, que contribuyan al establecimiento de tarifas óptimas para cada autopista y puente de cuota y permitan lograr tanto los compromisos financieros como las exigencias sociales.

El propósito fundamental de este módulo es determinar la capacidad financiera de cada autopista de cuota ante la variación de ingresos y tarifas.

### **MÓDULO DE COSTOS**

El objetivo general de este módulo es crear una base de datos y un modelo de costos, mediante los cuales se cuente con capacidad para identificar las variaciones que puedan sufrir los gastos de operación, mantenimiento menor y mantenimiento mayor, que permitan identificar los límites permisibles en las variaciones de costos para cada autopista de cuota, que contribuyan al establecimiento de tarifas óptimas para cada autopista y puente de cuota.

El propósito fundamental de este módulo es determinar, mediante modelos de costos del tipo “Sister” o HDM4, la capacidad que tiene cada autopista de cuota para minimizar sus costos, sin afectar la calidad del servicio, ante diferentes escenarios de tarifas.

### 1.5.1 Esquema tarifario en uso (CAPUFE)

Actualmente el esquema tarifario utilizado por Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos (CAPUFE) se basa en el número de ejes por vehículo, haciendo una clasificación en 5 categorías, las cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3 Categorías vehiculares para aplicación de peajes, CAPUFE

Tarifas por ejes (CAPUFE)	
Automóvil	
Eje excedente	Ligero
Autobuses	2,3 y 4 ejes
Camiones	2 y 3 ejes
	4 y 5 ejes
	6, 7, 8 y 9 ejes
Eje excedente	Carga

Fuente: Sitio web CAPUFE, 2010

La secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), cataloga los grupos vehiculares de acuerdo al tipo de vehículo y el número de ejes de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 4 Categorías vehiculares para aplicación de peajes, SCT

Tarifas por tipo de vehículo y número de ejes (SCT)	
Automóviles/Motos	
Autobuses	2 ejes
	3 ejes
	4 ejes
Camiones	2 ejes
	3 ejes
	4 ejes
	5 ejes
	6 ejes
	7 ejes
	8 ejes
	9 ejes

Fuente: Sitio web SCT, 2010

En la siguiente tabla se presenta un resumen de los esquemas y modelos tarifarios analizados.

Tabla 5 Resumen de los modelos y esquemas tarifarios analizados.

Modelo	Ventajas	Desventajas	Objetivo
<p><i>Propuesta preliminar de un modelo econométrico para actualizar tarifas de cuota en autopista mexicanas.</i> Salvador Flores Hernández</p>	<p>Establece la tarifa en función de tres variables sencillas: Ingresos por peajes, TDPA y Costo de Mantenimiento de infraestructura.</p> <p>Ofrece una demostración de correlación e independencia entre las variables explicativas.</p>	<p>Modelo planteado en base a un caso particular.</p> <p>Modelo funcional solo para autopistas maduras, debido a la necesidad de estadísticos para calibración del modelo.</p> <p>Asume que la variación de la demanda no es afectada por la variación en niveles tarifarios.</p>	<p>Maximización de Ingresos</p>
<p><i>Un modelo de autopistas con peajes como precios de servicios. EL PEAJE EN AUTOPISTAS COMO PRECIO POR UN SERVICIO Y COMO GARANTE DE SOSTENIBILIDAD.</i> Carles Vergara y Francesc Robusté</p>	<p>Establece un equilibrio financiero: Beneficio para el operador, beneficio para el usuario y conveniencia para autoridad reguladora.</p> <p>Se pretende obtener rentabilidad aceptable de las inversiones privadas a riesgo moderado operando con tasas de peaje bajas, realizando el mantenimiento y explotación según criterios de calidad establecidos por el Estado</p>	<p>Consideración en el modelo de criterios subjetivos como Nivel de Servicio y Medición de externalidades.</p> <p>No hay una propuesta específica para manipular la información de aforos, y costos de operación y mantenimiento de forma desagregada por categorías de vehículos.</p> <p>El modelo no contempla el deterioro de la superficie de rodamiento por el tránsito vehicular.</p>	<p>Maximización de Ingresos</p> <p>Beneficio al usuario</p>

Modelo	Ventajas	Desventajas	Objetivo
<p><i>An Application of Two-part Tariff Pricing to Expressway: A Case of Korea.</i> HA, Hun-Koo-KIM y Chun Kon</p>	<p>Establece un modelo binomial conformado por dos componentes:</p> <p>Tarifa base. Usada para recuperar la inversión por costos fijos y aplicada a todos los usuarios. Aplica a costos de</p> <p>Tarifa variable. Permite recobrar la porción de costos variables (costos de mantenimiento), costos de venta, gastos de administración general y rendimiento de la inversión.</p>	<p>El análisis se hace con información agregada de todo el tránsito vehicular. Se busca reflejar el impacto de cada categoría vehicular mediante factores de ponderación tarifaria, los cuales bien calculados pueden facilitar el manejo y simplicidad del modelo.</p>	<p>Maximización de ingresos</p>
<p><i>Criterios para establecer la cuota optima en una autopista de cuota.</i> Alfonso Rico Rodríguez</p>	<p>Metodología aplicable a autopistas nuevas, es decir con demanda poco arraigada</p> <p>Considera el efecto de daño a la infraestructura según el tipo de vehículo</p>	<p>Este modelo se enfoca exclusivamente en el análisis para vehículos de carga, proponiendo basar el análisis en un vehículo en específico (C2) y a partir de la tarifa estimada para el vehículo referencia estimar las tarifas de las categorías restantes en base a coeficientes de pago relativos.</p> <p>Considera la comparación de costos de operación vehicular entre la autopista de cuota y la alternativa sin peaje, volviendo demasiado complicado el modelo debido al aumento de las variables para los costos de operación de vehículo.</p>	<p>Maximización de ingresos</p> <p>Beneficio a usuarios de carga</p>

Fuente: Elaboración Propia

## 2 Propuesta metodológica

A continuación abordaremos y describiremos la estructura de la metodología propuesta para el diseño de un esquema tarifario binomial de maximización de la utilidad.

### 2.1 Descripción general de la metodología

La metodología propuesta consiste en 9 etapas, a través de las cuales se pretende desarrollar y cumplir con el objetivo propuesto. Dichas etapas son las siguientes:

#### Teoría de la utilidad y costos.

En este apartado se presenta un panorama general de la teoría de la utilidad total y utilidad marginal y los tipos de costos considerados como base y punto de partida del desarrollo de la metodología propuesta. Así pues se menciona la importancia de considerar cada elemento de la ecuación:

$$\text{Utilidad} = \text{Ingresos} - \text{Egresos}$$

#### Conceptos básicos de costos e ingresos en una autopista de cuota.

Se desarrollan los conceptos considerados dentro de ingresos y egresos de la ecuación de utilidad y se comentan las diferencias al obtener los valores de dichas variables para una autopista en operación y una en proyecto.

#### Costo por daño a la infraestructura.

Se plantea el daño al camino de acuerdo a la distribución de la demanda vehicular. Para ello se revisa el concepto de eje equivalente y su traducción a ESAL's, así como el cálculo del costo anual por cada vehículo representativo de cada una de las tres categorías vehiculares consideradas. Finalmente se obtienen las ecuaciones para el cálculo monetario del costo del mantenimiento anual a la infraestructura tomando en cuenta las tres categorías vehiculares contempladas (A, B, C) y los tipos de terreno: plano, lomerío y montañoso.

#### Ecuaciones básicas para determinar los costos variables.

Se desarrollan las ecuaciones para determinar el costo monetario que implica la parte variable de la ecuación binomial de costos. Para ello se considera la variación en la distribución del aforo



vehicular así como el tipo de terreno. Como resultado, se obtienen 3 ecuaciones por cada categoría vehicular, dado que se considera la evaluación de tramos carreteros según el tipo de terreno prevaleciente.

#### Ecuaciones de costo fijo.

Para el desarrollo de este apartado se consideran los cinco costos fijos que mayor importancia representan en la operación de una autopista y que no dependen de la variación del aforo vehicular, no obstante para asignar un costo por unidad vehicular, es necesario repartirlo entre el aforo, esto se logra dividiendo el costo fijo total entre el número de vehículos en la demanda. Como resultado de este apartado se obtuvieron las 3 ecuaciones para cada tipo de terreno y según las 3 categorías vehiculares consideradas del costo fijo en la ecuación de utilidad.

#### Ecuaciones de costo total

Aquí se conforma la parte binomial del modelo, en específico refiriéndonos a los costos; ya que se obtienen las ecuaciones por tipo de terreno y categoría vehicular del costo total que representa al operador, poner en funcionamiento la vía de cuota. Así pues, se obtienen dichas ecuaciones atendiendo a la ecuación general:

$$\text{Costo total} = \text{Costo Fijo} + \text{Costo Variable}$$

#### Forma general de las ecuaciones de la utilidad.

- **Ecuaciones de utilidad bruta**

Siguiendo la forma de la ecuación:

$$\text{Utilidad} = \text{Ingresos} - \text{egresos}$$

Se obtiene la fórmula general de la utilidad bruta al sustituir en la ecuación anterior, las expresiones correspondientes a los ingresos y egresos.

De esta manera se obtuvieron 9 ecuaciones correspondientes a las tres categorías vehiculares y tres tipos de terreno considerados. La forma general de la ecuación de utilidad bruta es:

$$U = \alpha * TDPA - \frac{\beta}{TDPA}$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$ , son la simplificación de los términos relacionados a ingresos y egresos, excepto el aforo vehicular

- ***Ecuaciones de la utilidad marginal***

Partiendo del concepto de utilidad marginal como el cambio en la utilidad total en respuesta a la cantidad demandada, se puede expresar la utilidad marginal como la derivada de la utilidad bruta respecto a la demanda vehicular (TDPA), de ahí se tiene que la derivada de la ecuación general de utilidad bruta quedaría en la siguiente forma general:

$$U_{MARGINAL} = \alpha - \frac{\beta}{TDPA^2}$$

#### Maximización de la utilidad marginal

Analizando la forma de las ecuaciones de la utilidad total y marginal, se observó que se puede encontrar un óptimo para las mismas, al identificar y resolver matemáticamente la intersección de ambas funciones. De esta forma se encontró un polinomio de tercer grado, de donde una de las soluciones de tal polinomio corresponde a la utilidad que maximiza la utilidad total como la utilidad marginal.

La solución matemática de las raíces de dicho polinomio se expone en el anexo 3.

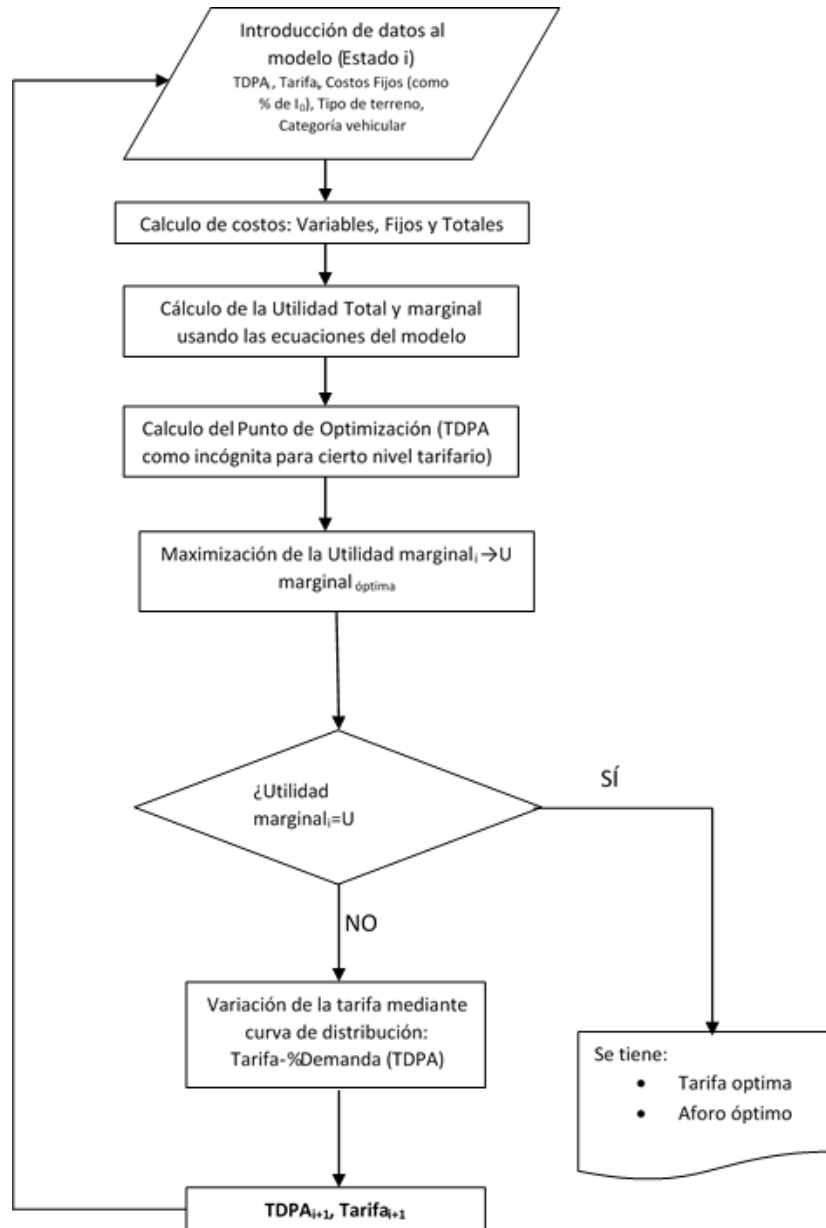
#### Arbitraje entre nivel tarifario óptimo y nivel de demanda.

En esta parte de la metodología buscamos adaptar el modelo a la situación real, dado que matemáticamente se puede obtener un óptimo teórico, sería muy venturoso encontrar el mismo nivel en una situación real. Es por eso que esta parte de la metodología busca aproximar las condiciones prevalecientes en la operación de la autopista a las condiciones del óptimo matemático en tanto sea posible. Es por ello que se propone la construcción de curvas que relacionen el nivel tarifario aplicado con la demanda vehicular asociada a dicho modelo.

## 2.2 Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

La siguiente figura ilustra el proceso en el cual se justifica el desarrollo de la metodología propuesta en este escrito.

Figura 6 Diagrama de la metodología



Fuente: Elaboración propia

## **2.3 Desarrollo de la metodología para el diseño de un esquema binomial de tarificación para autopistas de cuota bajo el enfoque de maximización de utilidad.**

Como se había mencionado con anterioridad, la metodología propuesta consiste de 9 fases o pasos, que nos han permitido llegar a los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, en seguida se presenta el desarrollo de la metodología.

### **2.3.1 Teoría de la utilidad y costos.**

#### **2.3.1.1 La utilidad**

Tradicionalmente en la teoría macroeconómica la utilidad es considerada como aquella satisfacción o beneficio que una persona obtiene a cambio del consumo de algún bien o servicio.

La utilidad total es el beneficio total que una persona obtiene a partir del consumo de bienes y servicios, en este sentido la utilidad total depende del nivel de consumo; por lo general, a mayor consumo más utilidad total.

En cuanto a la utilidad marginal, se dice que es el cambio en la utilidad total que resulta del aumento de una unidad en la cantidad consumida de un bien.

Ahora bien, obteniendo una visión de empresa la utilidad adquiere un sentido variante al concepto puro de la microeconomía, de ahí que existan varias definiciones bajo este enfoque; por ejemplo:

“La utilidad es el beneficio económico que obtiene una empresa en sus operaciones comerciales; es decir: la ganancia corporativa“

“La utilidad bruta o neta es la diferencia positiva entre los ingresos y gastos contables, expresada en alguna unidad monetaria”

Expresado lo anterior, no es extraño que la utilidad sea considerada como medida de éxito en una operación empresarial. Definiremos a la utilidad en base a lo anterior, y para efectos de congruencia con la metodología desarrollada, como sigue a continuación:

La utilidad es la resultante de dos componentes, uno de los cuales son las economías asociadas con los ingresos producidos por la actividad.

Cuando la utilidad es el factor de interés, es importante que las actividades se evalúen con respecto a su efecto sobre esa utilidad. El primer paso para hacer utilidades es garantizar un

ingreso. Pero para lograr un ingreso se necesita llevar a cabo ciertas actividades que generen costos. La utilidad es en consecuencia, la resultante de actividades que producen ingresos y que suponen desembolsos, y que se puede expresar de la siguiente manera:

$$\textit{Utilidad} = \textit{Ingresos} - \textit{Egresos}$$

Es importante considerar que cada empresa debe establecer libremente su aspiración en este tema. En la decisión del porcentaje se deben considerar ciertos factores como grado de calificación técnica de la obra, localización, plazo, magnitud, mercado, etc.

### **2.3.1.2 Costos fijos**

Los costos fijos se definen, generalmente como aquel conjunto de costos asociados con una actividad en marcha pero cuyo total permanecerá relativamente constante durante toda la actividad de la operación. Las inversiones que se ocasionan costos fijos se hacen en el presente con la esperanza de que esos costos se recuperarán con una utilidad como resultado de reducciones en los costos variables o de aumento en los ingresos.

Los costos fijos están conformados por ciertos ítems de costo tales como la depreciación, mantenimiento, impuestos, seguros, arrendamientos, intereses sobre el capital invertido, programas de publicidad, ciertos gastos de administración e investigación. Se observará que se originan en decisiones tomadas en el pasado y que, en general, no están sujetos a cambios muy rápidos.

#### *Intereses y seguros.*

- En cualquier estudio que implique una inversión de capital necesariamente hay que tener en cuenta los intereses que este capital esté en capacidad de devengar, por esto, se deben calcular los intereses de esta inversión calculados a la tasa comercial del día.

#### *Costos de administración.*

- Garantías y seguros. Garantías de seriedad de la propuesta y de cumplimiento, anticipo, estabilidad y prestaciones sociales del contrato. Seguros de vida obligatorios, accidentes y de responsabilidad civil, y seguros contra todo riesgo si se considera necesario.
- Instalaciones. Campamentos en los que se debe tomarse en cuenta la construcción de oficinas, bodegas, servicios públicos, casetas y todo tipo de instalaciones.

- Gastos varios. Depreciación de muebles y enseres de oficinas. Pago de facturas de los servicios públicos. Operación de los vehículos de administración. Subsidios de alimentación o alojamiento de personal. Mantenimiento de instalaciones. Útiles e insumos para oficinas.
- Personal. Salarios con prestaciones de personal administrativo y directivo
- Gastos de administración central. Toda empresa medianamente organizada debe tener en el lugar de su domicilio una oficina central y unas instalaciones donde despacharan los socios y directivos. Los gastos ocasionados por esta administración central dependerán del tamaño de la empresa. La enumeración de tales costos es básicamente lo mismo que los costos en obra, pero adaptados al nivel que corresponde a un sitio donde se encuentran las oficinas centrales. A esto habría que agregarle los costos de la preparación de las licitaciones no ganadas, la publicidad, las promociones, donativos y mantener un fondo de previsión para periodos de inactividad.
- Costos de primera inversión. Estos costos comprenden los gastos de los diferentes proyectos, las direcciones de obra, la compra de terrenos, las expropiaciones, la reposición de servicios, la obra civil, etc. Éstos se obtienen del proyecto o estudio previo o mediante la estimación de sus componentes y utilidades.
- Fondo de conservación y rehabilitación. La rehabilitación y conservación se puede tratar por separado o conjuntamente. Si se tratan por separado hay que indicar que la rehabilitación se hace de forma cíclica cada ocho años aproximadamente, mientras que la conservación necesita una partida anual. Generalmente, los gastos de conservación son crecientes, desde el primer año de rehabilitación o puesta en servicio, hasta duplicarse el año anterior a una rehabilitación. Después de la rehabilitación el gasto de conservación vuelve a ser similar al del primer año de puesta en servicio. Otra forma de tratar estos gastos es como un tanto por ciento anual del valor de la obra, que será del orden del 1.5% anual del valor de la misma. El primer método se adapta más a la realidad.

#### *Costos financieros.*

- Intereses del capital de trabajo y por demoras de pago.

#### *Imprevistos.*

En toda obra existen dos clases de imprevistos: los imputables a la entidad contratante y los imputables al contratista.

- Los primeros los tendrá que resarcir y compensar el contratante de otra manera el contratista podrá reclamar y aun demandar para obtener el pago de las indemnizaciones a que

haya lugar. Ejemplos típicos de esta clase de imprevistos serían las demoras en suministro de planos y diseño, modificaciones al proyecto, demoras en la adquisición y entrega de las zonas de trabajo y fuentes de material, demoras en la toma de decisiones por parte de la interventoría de funcionarios de la entidad contratante y demoras en los pagos.

- Los imprevistos imputables al contratista podrán ser las dificultades en los suministros, escasez de materiales, mano de obra o equipo, accidentes y gastos extra por extravío, robos y pérdidas.

### **2.3.1.3 Costos variables**

Se definen ordinariamente como el conjunto de costos que varían en alguna relación con el nivel de operaciones. Para nuestro caso, consideraremos como costos variables a aquellos derivados del deterioro causado por el tránsito de los vehículos en la autopista tanto a la carpeta asfáltica como a puentes y demás infraestructura en uso directo.

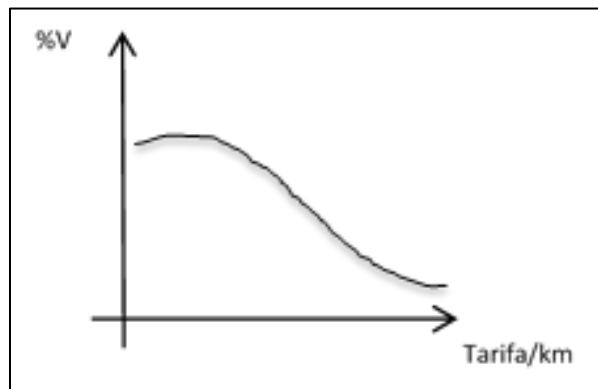
Para efectos de este trabajo se considera que el principal costo variable en la operación de una autopista es el debido al daño ocasionado principalmente a la carpeta asfáltica por el tránsito de los diferentes tipos de vehículos y la magnitud de dicho daño según la categoría vehicular considerada.

### **2.3.2 Conceptos básicos de costos e ingresos utilizados en el modelo.**

Se considerarán los siguientes conceptos básicos para referirnos a costos e ingresos, a partir de los cuales se desarrolla la metodología propuesta:

*Preferencias Declaradas*, PD, (encuestas a usuarios), a partir de las cuales se puede estimar el aforo esperado por tipo de vehículo ( $V_A, V_B, V_C$ ) en función de la variación de los niveles tarifarios, así como los itinerarios o diferentes orígenes y destinos de viajes (O-D) y en su caso el motivo de realizar el viaje. Las curvas de preferencias declaradas tienen la forma de una logística inversa como se muestra, en la cual la variación de la tarifa por el uso de una autopista tiene relación directa con el aforo de vehículos captado:

**Figura 7 Curva PD**



Fuente: Elaboración Propia

Ingresos por tipo de vehículo<sup>6</sup> ( $I_A, I_B, I_C$ ), obtenido a partir del aforo por categoría vehicular y la tarifa aplicada correspondiente.

Costos fijos por tipo de vehículo, aunque con igual valor sin importar de qué categoría de vehículo se trate. ( $CF_A, CF_B, CF_C$ )

Costos variables por tipo de vehículo en función del daño unitario provocado por la distribución del TDPA<sup>7</sup> ( $CV_A, CV_B, CV_C$ )

Considerando los 2 posibles casos del proyecto de una autopista se tendrían los siguientes insumos:

<sup>6</sup> Se considerarán tres tipos de vehículos como sigue:

A: Automóviles particulares, incluyen tipo sedán y vans o pickups

B: Autobuses de pasajeros

C: Vehículos de carga

<sup>7</sup> TDPA: Tránsito diario promedio anual es el número total de vehículos que pasan durante un periodo dado (en días completos) igual ó menor a un año y mayor que un día, dividido entre el número de días del periodo.



**Tabla 6 Insumos para la metodología**

Autopista en fase de proyecto	Autopista en operación
<p>Mediante las preferencias declaradas se estima: Volúmenes e itinerarios de viajes por tipo de vehículo.</p> <p>Así mismo, estimación de ingresos (I), costos fijos y variables (CF y CV) dada la estimación de preferencias declaradas</p>	<p>Conocimiento de:</p> <p>TDPA por tipo de vehículo</p> <p>Ingresos por tipo de vehículo</p> <p>Costos fijos y variables por tipo de vehículo</p>

Fuente: Elaboración Propia

### 2.3.2.1 Agrupación de categorías vehiculares.

Las configuraciones más comunes para los vehículos que transitan en las carreteras mexicanas se presentan en la siguiente tabla, así mismo se incluyen algunas características especificadas en la NOM<sup>8</sup> sobre pesos y dimensiones máximas de vehículos en carreteras.

**Tabla 7 Peso bruto vehicular máximo autorizado por clase de vehículo y camino**

Categoría	Vehículo o configuración vehicular	Num. Ejes	Num. Llantas	Peso bruto vehicular (t) por tipo de camino			
				ET y A	B	C	D
B	B2	2	6	17,5	16,5	14,5	13,0
	B3	3	8	21,5	19,0	17,0	16,0
	B3	3	10	24,5	23,0	20,0	18,5
	B4	4	10	27,0	25,0	22,5	21,0
C	C2	2	6	17,5	16,5	14,5	13,0

<sup>8</sup> De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2008, Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal, se tiene la siguiente clasificación atendiendo a su clase, nomenclatura, número de ejes y llantas:

Categoría	Vehículo o configuración vehicular	Num. Ejes	Num. Llantas	Peso bruto vehicular (t) por tipo de camino			
				ET y A	B	C	D
	C3	3	8	21,5	19,0	17,0	16,0
	C3	3	10	24,5	23,0	20,0	18,5
	C2-R2	4	14	37,5	35,5	NA	NA
	C3-R2	5	18	44,5	42,0	NA	NA
	C3-R3	6	22	51,5	47,5	NA	NA
	C2-R3	5	18	44,5	41,0	NA	NA
	T2-S1	3	10	27,5	26,0	22,5	NA
	T2-S2	4	14	34,5	31,5	28,0	NA
	T3-S2	5	18	41,5	38,0	33,5	NA
	T3-S3	6	22	48,0	45,5	40,0	NA
	T2-S3	5	18	41,0	39,0	34,5	NA
	T3-S1	4	14	34,5	32,5	28,0	NA
	T2-S1-R2	5	18	47,5	45,0	NA	NA
	T2-S1-R3	6	22	54,5	50,5	NA	NA
	T2-S2-R2	6	22	54,5	50,5	NA	NA
	T3-S1-R2	6	22	54,5	51,5	NA	NA
	T3-S1-R3	7	26	60,5	57,5	NA	NA
	T3-S2-R2	7	26	60,5	57,5	NA	NA
	T3-S2-R4	9	34	66,5	66,0	NA	NA




Categoría	Vehículo o configuración vehicular	Num. Ejes	Num. Llantas	Peso bruto vehicular (t) por tipo de camino			
				ET y A	B	C	D
	T3-S2-R3	8	30	63,0	62,5	NA	NA
	T3-S3-S2	8	30	60,0	60,0	NA	NA
	T2-S2-S2	6	22	51,5	46,5	NA	NA
	T3-S2-S2	7	26	58,5	53,0	NA	NA

Fuente: NOM-012-SCT-2-2008

Así mismo se considera el tipo de vehículo A, dentro del cual se encuentran los automóviles particulares, vans y pickups.

Debido a que se pretende realizar el análisis en base al aforo de la vía y no un diseño de la misma, se utilizarán los vehículos más representativos de cada categoría, denominándolos vehículos equivalentes para cada categoría de vehículo (A, B, C); siendo las siguientes configuraciones las más representativas por categoría:

**Tabla 8 Definición de los vehículos equivalentes por categoría.**

Categoría	Vehículo representativo o equivalente (VE)	
A	$VE_A = \text{Automóvil}$	
B	$VE_B = B3$	
C	$VE_C = T3-S2$	

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.2.2 Concepto de eje equivalente

Se utiliza para determinar el efecto destructivo, dependiendo de las cargas y tipo de eje de los vehículos. Para esto se ha definido como eje estándar a un eje simple de rueda doble, de carga de 8.16 toneladas.

Factor de equivalencia: transforma el daño que produciría en la estructura del pavimento, el paso de un camión con n ejes diferentes en función del daño que producen los ejes estándar.

Del experimento de la AASHO surgió el concepto de Carga Equivalente de Ejes Estándar (*Equivalent Standard Axle Load*) conocido por las siglas ESAL, como una unidad para medir el daño al camino. Esta unidad apareció ligada a la “Ley de la 4ª. Potencia” que establece que el daño estructural al pavimento provocado por un eje dado es aproximadamente proporcional a la cuarta potencia de la razón de la carga en el eje al peso de un eje estándar de referencia. Un eje estándar de referencia de uso común es el de 18,000 libras (8.16 t), de este modo, un vehículo con *k* ejes tiene un factor de daño expresado en ESALs igual a:

$$Factor\ de\ da\tilde{no} = \sum_{j=1}^k \left( \frac{Axle_j}{8.16} \right)^4 \dots \quad (1)$$

En términos operacionales, el factor de daño indica el número equivalente de pasadas de un eje estándar con el mismo efecto de desgaste en el pavimento, causado por el camión. Esta dependencia con respecto al peso del vehículo modelado como una función potencia de grado cuatro, hace que los costos de reparación del camino sean mucho muy sensibles a las prácticas de sobrepeso.<sup>9</sup>

**Tabla 9 Cálculo de ESALES por la configuración del vehículo.**

Categoría	Vehículo o configuración vehicular	# ejes	P.b.v	Peso por eje (t)	Esales/eje	Factor de daño esales/vehículo	Proporción del daño respecto al vehículo “a”
A	<b>V.P</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0.5</b>	<b>0.000014</b>	<b>0.00003</b>	<b>1.0</b>
	Pick-up	2	1.8	0.9	0.000148	0.0003	10.5
B	B2	2	17.5	8.75	1.322122	2.64	93,789.0
	B3 (8 llantas)	3	21.5	7.17	0.594988	1.78	63,311.0
	<b>B3 (10 llantas)</b>	<b>3</b>	<b>24.5</b>	<b>8.17</b>	<b>1.003272</b>	<b>3.01</b>	<b>106,756.0</b>
	B4	4	27	6.75	0.468225	1.87	66,430.0
C	C2	2	17.5	8.75	1.322122	2.64	93,789.0
	C3 (8 llantas)	3	21.5	7.17	0.594988	1.78	63,311.0
	C3 (10 llantas)	3	24.5	8.17	1.003272	3.01	106,756.0
	C2-R2	4	37.5	9.38	1.742306	6.97	247,192.0
	C3-R2	5	44.5	8.9	1.415140	7.08	250,969.0
	C3-R3	6	51.5	8.58	1.224231	7.35	260,534.0
	C2-R3	5	44.5	8.9	1.415140	7.08	250,969.0

<sup>9</sup> Publicación Técnica 250, IMT

Categoría	Vehículo o configuración vehicular	# ejes	P.b.v	Peso por eje (t)	Esales/eje	Factor de daño esales/vehículo	Proporción del daño respecto al vehículo “a”
	T2-S1	3	27.5	9.17	1.592521	4.78	169,456.0
	T2-S2	4	34.5	8.63	1.248176	4.99	177,087.0
	<b>T3-S2</b>	<b>5</b>	<b>41.5</b>	<b>8.3</b>	<b>1.070414</b>	<b>5.35</b>	<b>189,833.0</b>
	T3-S3	6	48	8	0.923845	5.54	196,608.0
	T2-S3	5	41	8.2	1.019753	5.1	180,849.0
	T3-S1	4	34.5	8.63	1.248176	4.99	177,087.0
	T2-S1-R2	5	47.5	9.5	1.837104	9.19	325,803.0
	T2-S1-R3	6	54.5	9.08	1.535396	9.21	326,755.0
	T2-S2-R2	6	54.5	9.08	1.535396	9.21	326,755.0
	T3-S1-R2	6	54.5	9.08	1.535396	9.21	326,755.0
	T3-S1-R3	7	60.5	8.64	1.258545	8.80981	312,477.0
	T3-S2-R2	7	60.5	8.64	1.258545	8.80981	312,477.0
	T3-S2-R4	9	66.5	7.39	0.672289	6.0506	214,610.0
	T3-S2-R3	8	63	7.88	0.867444	6.93955	246,140.0
	T3-S3-S2	8	60	7.5	0.713649	5.70919	202,500.0
	T2-S2-S2	6	51.5	8.58	1.224231	7.34538	260,534.0
	T3-S2-S2	7	58.5	8.36	1.100198	7.70138	273,161.0

Fuente: Elaboración propia con datos de la NOM-012-SCT-2-2008, para el cálculo de los ESALES se utiliza la formula (1)

Una vez calculados los factores de daño por categoría de vehículos, se puede conocer el costo variable asociado al daño provocado por los mismos sobre la carpeta de rodamiento de una autopista.

### 2.3.2.3 Costo por daño a la infraestructura.

El volumen de vehículos que son usuarios de una vía de cuota, contribuyen al deterioro de la misma en diferentes magnitudes, es por ello que en este apartado se realiza el cálculo del daño unitario y el costo de mantenimiento asociado según la categoría vehicular.

Considerando los vehículos equivalentes propuestos en la sección anterior y el precio de mantenimiento calculado por el IMT y actualizado al año de 2010 (0.63 \$/ESAL\*km), [EM3]se puede estimar el daño unitario para cada categoría de vehículo.

**Tabla 10 Daño causado expresado por vehículo equivalente (VE)**

Vehículo	Daño en ESALs	Costo por daño \$/VE*km
VEA	0.00003	0.0000226
VEB	3.010	2.407852754
VEC	5.352	4.281655545

Fuente: Elaboración propia

Para determinar el tránsito equivalente, la SCT propone considerar las condiciones geográficas de la zona en donde se aloje el tramo carretero, ya sea montaña, lomerío o terreno plano. La siguiente tabla extraída del Manual de Capacidad Vial proporciona la información pertinente, tomando como base el automóvil (A):

**Tabla 11 Coeficientes de equivalencia según tipo de terreno**

Vehículo	Símbolo	Plano	Lomerío	Montañoso
Auto	A	1.0	2.0	2.7
Camión	EC	1.7	4.0	8.0
Autobús	EB	1.5	3.0	5.0

Vehículo	Símbolo	Plano	Lomerío	Montañoso
Recreativo	ER	1.6	3.0	4.0

Fuente: Manual de Capacidad Vial, S.C.T

Si fuera necesario considerar como vehículos equivalentes a algunos que no aparecen en la tabla anterior, la siguiente tabla expresa los parámetros de equivalencia.

**Tabla 12 Coeficientes de equivalencia según tipo de terreno**

Vehículo	Plano	Lomerío	Montañoso
B3	1.5	3.0	5.0
B4	1.5	3.0	5.0
C2	1.7	4.0	8.0
C3	1.7	4.9	8.0
C4	2.55	6.0	12.0
C5	2.55	6.0	12.0
C6	2.55	6.0	12.0
C7	3.74	6.0	17.6

Fuente: Manual de Capacidad Vial, S.C.T

Para nuestro caso, se ocuparán los coeficientes que corresponden a los vehículos equivalentes, definidos en la Tabla 8.

### 2.3.2.4 Cálculo del costo de mantenimiento por año.

El costo anual por el daño a la infraestructura considerando los vehículos equivalentes de cada categoría está dado por:

$$D_i = du_i * TDPA_i * 365 * L * CE_i$$

Donde

$D_i$ ; es el costo anual por daño a la infraestructura causado por el vehículo equivalente (VE) por categoría  $i$ , expresado en (\$\*km)

$du_i$ ; costo por daño unitario (\$/VE\*km)

$TDPA_i$ ; es el Transito Diario Promedio Anual para el VE de la categoría  $i$  (vehículos/día)

$L$ ; es la longitud del tramo carretero según el terreno donde se encuentra asentado. (km)

$CE_i$ ; es el coeficiente de equivalencia para el VE según el terreno en donde se encuentre asentado el tramo analizado (Tabla 7 y Tabla 8).

Desarrollando las fórmulas por categoría de vehículo y según el terreno donde se ubique el tramo a evaluar, se tienen los resultados presentados en las siguientes tablas.

**Tabla 13 Costo anual por daño a la infraestructura causado por vehículos ligeros (VE<sub>A</sub>)**

<p><math>D_A</math>; Usando como vehículo equivalente al Automóvil (A)</p> <p><math>D_i = du_i * TDPA_i * 365 * L * CE_i</math> (\$*km)</p>	
Terreno plano	<p><math>D_A = 0.0000226 * TDPA_A * 365 * L * 1.0</math></p> <p><math>D_{A\ PLANO} = 0.008249 * TDPA_A * L</math></p>
Lomerío	<p><math>D_A = 0.0000226 * TDPA_A * 365 * L * 2.0</math></p> <p><math>D_{A\ LOMERÍO} = 0.016498 * TDPA_A * L</math></p>
Montañoso	<p><math>D_A = 0.0000226 * TDPA_A * 365 * L * 2.7</math></p> <p><math>D_{A\ MONTAÑOSO} = 0.0222723 * TDPA_A * L</math></p>

Fuente: Elaboración propia



**Tabla 14 Costo anual por daño a la infraestructura causado por autobuses (VE<sub>B</sub>)**

D <sub>B</sub> ; Usando como vehículo equivalente el vehículo B3 $D_i = du_i * TDPA_i * 365 * L * CE_i$ (\$*km)	
Terreno plano	$D_B = 2.407 * TDPA_B * 365 * L * 1.5$ $D_{B\ PLANO} = 1317.8325 * TDPA_B * L$
Lomerío	$D_B = 2.407 * TDPA_B * 365 * L * 3.0$ $D_{B\ LOMERIO} = 2635.665 * TDPA_B * L$
Montañoso	$D_B = 2.407 * TDPA_B * 365 * L * 3.5$ $D_{B\ MONTAÑOSO} = 3074.9425 * TDPA_B * L$

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 15 Costo anual por daño a la infraestructura causado por vehículos de carga (VE<sub>C</sub>)**

D <sub>C</sub> ; Usando como vehículo equivalente el vehículo C5 (T3-S2) $D_i = du_i * TDPA_i * 365 * L * CE_i$ (\$*km)	
Terreno plano	$D_C = 4.282 * TDPA_C * 365 * L * 2.55$ $D_{C\ PLANO} = 3985.4715 * TDPA_C * L$
Lomerío	$D_C = 4.282 * TDPA_C * 365 * L * 6.0$ $D_{C\ LOMERIO} = 9377.58 * TDPA_C * L$
Montañoso	$D_C = 4.282 * TDPA_C * 365 * L * 12$ $D_{C\ MONTAÑOSO} = 18755.16 * TDPA_C * L$

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.3 Ecuaciones básicas para determinar costos variables por tipo de vehículo a utilizar en el modelo tarifario binomial.

En esta parte del documento se desarrollan las ecuaciones base que nos permitirán obtener los costos variables a utilizar en la metodología, cabe recordar que dichos costos son función directa del aforo vehicular y en forma particular a la distribución del mismo en las categorías de vehículos equivalentes. En la tabla mostrada a continuación se especifican las variables utilizadas en las ecuaciones, su nomenclatura o abreviación y significado dentro de las expresiones.

**Tabla 16 Definición de variables**

Variable	Significado
$V_i$	Vehículo según categoría $i$
$VE_i$	Vehículo equivalente para la categoría $i$
A	Categoría de vehículo ligero
B	Categoría de vehículo de pasajeros (autobuses)
C	Categoría de vehículo de carga
$W_{eje j}$	Peso por eje $j$ en el vehículo analizado
$W_{eje st}$	Peso del eje estandarizado (8.16 tons)
FD	Factor de daño
$C_{FD}$	Costo monetario del factor de daño por vehículo
$c_{fd}$	Costo unitario de daño (ESAL/km)
$A_{FD}$	Costo anual del factor de daño asociado al vehículo equivalente de cada categoría y según el tipo de terreno.
$TDPA_i$	Transito diario promedio anual para la categoría $i$
$L$	Longitud del tramo analizado

Variable	Significado
$CE_i$	Coefficiente de equivalencia para vehículos equivalentes por categoría según el tipo de terreno donde se encuentra ubicado el tramo de análisis
$D_j$	Costo anual del factor de daño según el tipo de terreno y referidas a $VE_A$
$D_{TOTAL j}$	Daño total para cada tipo de terreno, por tipo de vehículo y referido a $VE_A$
$C_{EO}$	Coefficientes de equivalencia de ocupación de espacio vial referidos a $V_A$
F	Aforo vehicular por categoría

Fuente: Elaboración propia

En las siguientes páginas se muestra el desarrollo para obtener las ecuaciones de costos variables, en base a lo presentado previamente en los apartados de conceptos básicos.

El primer concepto que se necesita es el factor de daño por tipo de vehículo a la vía carretera, para justificar este término se emplea la siguiente expresión:

$$FD = \sum_{j=1}^k \left( \frac{W_{eje j}}{W_{eje st}} \right)^4$$

La expresión anterior, nos permite evaluar el factor de daño (FD) a la vía mediante una relación directa entre el peso por eje de una categoría  $j$  y el peso del eje estandarizado (8.16 tons).

Sustituyendo el peso del eje estandarizado:

$$FD = \sum_{j=1}^k \left( \frac{W_{eje j}}{8.16 \text{ tons}} \right)^4 \quad (1)$$

$j = 1,2,3, \dots, k$  ; representa el número de ejes para el vehículo  $i$ .

Consecutivamente se calcula el costo del factor de daño por vehículo (\$/ veh\*km)

$$C_{FD} = FD * c_{fd} \quad (2)$$

De la expresión anterior, se puede generalizar a un costo anual, definido como Costo anual del factor de daño ( $A_{FD i}$ ), asociado al vehículo equivalente de cada categoría y según el tipo de terreno (\$\*km), calculado como sigue:

$$A_{FDi} = C_{FD} * TDPA_i * 365 * L * CE_i \quad (3)$$

Para el cálculo anterior, se emplea el concepto de la formula (2) complementado con el TDPA por categoría vehicular, la longitud del tramo en estudio L y el coeficiente de equivalencia  $CE_i$  que considera el tipo de terreno. Los coeficientes de equivalencia por tipo de terreno y categoría vehicular se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 17 Coeficientes de equivalencia según tipo de terreno ( $CE_i$ )**

Categoría	Plano	Lomerío	Montañoso
A	1.0	2.0	2.7
B	1.5	3.0	5.0
C	2.55	6.0	12.0

Fuente: Manual de Capacidad Vial, S.C.T

Se obtienen en seguida las ecuaciones de costo anual del factor de daño según el tipo de terreno y referidas a  $VE_A$

$$D_j = L * (A_{FDAj} + A_{FDBj} + A_{FDCj})$$

En general:

$$D_j = L * (\sum A_{FDij}) \quad (4)$$

$i = A, B, C$  ; Según la categoría del vehículo

$j = plano, lomerío, montañoso$ ; Según el tipo de terreno en el tramo analizado

En resumen se calcula el daño total para cada tipo de terreno, por tipo de vehículo y referido a  $VE_A$  como el producto de la sumatoria de los daños por categoría vehicular afectado por su coeficiente de ocupación vial y evaluada en la longitud, L, del tramo.

$$D_{TOTALj} = L * (\sum A_{FDij} * C_{EO}) \quad (5)$$

**Tabla 18 Coeficientes de equivalencia de ocupación de espacio vial referidos a VA,  $C_{EO}$**

Terreno	VE por categoría	$C_{EO}$
Plano	VE <sub>A</sub>	1
	VE <sub>B</sub>	1.55
	VE <sub>C</sub>	2.5
Lomerío	VE <sub>A</sub>	1
	VE <sub>B</sub>	3
	VE <sub>C</sub>	6
Montañoso	VE <sub>A</sub>	1
	VE <sub>B</sub>	5
	VE <sub>C</sub>	12

Fuente: Manual de Capacidad Vial, S.C.T

El concepto que se requiere para adjudicar los costos de daño producidos por cada categoría vehicular, se ha denominado “Reparto de costos de mantenimiento por daño total”.

Para calcular el reparto de daños de costos de mantenimiento, es necesario considerar la distribución por categorías vehiculares del aforo del tramo en estudio, para ello se utilizan dos fuentes de información según sea el caso de análisis:

a) Para autopistas en operación se tienen datos de los vehículos que utilizan la vía, comúnmente aforos automáticos o mediante información de puntos de cobro de peaje.

b) Para vías en fase de proyecto, la información requerida será una estimación de la demanda proyectada en el estudio de mercado.

En ambos casos se puede establecer la distribución de la demanda representada por la demanda de cada grupo vehicular establecido y que en suma dan la demanda total de la vía, expresada como sigue:

$$TDPA = TDPA_A + TDPA_B + TDPA_C \dots \dots \dots (7)$$

Además considerando que:

$$TDPA_A = \%TDPA = F_A = 1 - (F_B + F_C)$$

Donde:

$$TDPA_B = \%TDPA = F_B$$

$$TDPA_C = \%TDPA = F_C$$

Es posible calcular el aforo en VE para cada categoría, utilizando los coeficientes de equivalencia de la Tabla 17, las expresiones obtenidas se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 19 Flujos equivalentes**

Aforo o flujo equivalente	Tipo de Terreno		
	Plano	Lomerío	Montañoso
$F_A'$	$1 - (F_B + F_C)$	$1 - (F_B + F_C)$	$1 - (F_B + F_C)$
$F_B'$	$1.55 * F_B$	$3.00 * F_B$	$5.00 * F_B$
$F_C'$	$2.55 * F_C$	$6.00 * F_C$	$12.00 * F_C$

Fuente: Elaboración propia

Dado que la suma de los flujos en cada categoría de vehículos, constituye el aforo total en la vía, ecuación (7); se tienen los siguientes flujos equivalentes por tipo de terreno:

$$F'_{plano} = 1 + 0.55F_B + 1.55F_C$$

$$F'_{lomerío} = 1 + 2.00F_B + 5.00F_C$$

$$F'_{montañoso} = 1 + 4.00F_B + 11.00F_C$$

La clave del reparto de costos de mantenimiento en cada categoría (Reparto de costos variables), se determina obteniendo los porcentajes para asignación de repartos de costos de mantenimiento por categoría vehicular. En la siguiente tabla se presentan las ecuaciones obtenidas de los conceptos previos.

**Tabla 20 Porcentajes para asignación de repartos de costos de mantenimiento por categoría vehicular**

Categoría vehicular	Plano	Lomerío	Montañoso
A	$\%MA=1 - (F_B' + F_C')$	$\%MA=1 - (F_B' + F_C')$	$\%MA=1 - (F_B' + F_C')$
B	$\%MB=1.55 \cdot F_B / (1 + 0.55F_B + 1.55F_C)$	$\%MB=3.00 \cdot F_B / (1 + 2.00F_B + 5.00F_C)$	$\%MB=5.00 \cdot F_B / (1 + 4.00F_B + 11.00F_C)$
C	$\%MC=2.55 \cdot F_C / (1 + 0.55F_B + 1.55F_C)$	$\%MC=6.00 \cdot F_C / (1 + 2.00F_B + 5.00F_C)$	$\%MC=12.00 \cdot F_C / (1 + 4.00F_B + 11.00F_C)$

Fuente: Elaboración propia

De donde:

$$CMant_A = \%MA \cdot D_{TOTAL A}$$

$$CMant_B = \%MB \cdot D_{TOTAL B}$$

$$CMant_C = \%MC \cdot D_{TOTAL C}$$

### 2.3.4 Ecuaciones de costo variable para cada tipo de vehículo y por tipo de terreno.

En la siguiente tabla se presentan las expresiones que permiten determinar los porcentajes para asignación de costos de mantenimiento (%Mi,t).

**Tabla 21 Porcentajes para asignación de costos de mantenimiento(%Mi,t)**

Categoría de vehículo (i)	TIPO DE TERRENO (t)		
	Plano	Lomerío	Montaña
A	$\frac{a}{a + 1.5b + 2.55c}$	$\frac{a}{a + 3b + 6c}$	$\frac{a}{a + 5b + 12c}$
B	$\frac{1.5b}{a + 1.5b + 2.55c}$	$\frac{3b}{a + 3b + 6c}$	$\frac{5b}{a + 5b + 12c}$
C	$\frac{2.55c}{a + 1.5b + 2.55c}$	$\frac{6c}{a + 3b + 6c}$	$\frac{12c}{a + 5b + 12c}$

Fuente: Elaboración propia

Donde a, b, c; es el porcentaje del TDPA correspondiente a las categorías A, B, C respectivamente y recordando que el costo de mantenimiento se representa en la siguiente expresión.

$$C_{mant_i} = \%M_{i,t} * D$$

En las páginas a continuación se presentan las ecuaciones para evaluar el costo de mantenimiento por cada categoría vehicular, en estas ecuaciones se integran todos los conceptos desarrollados anteriormente con sus simplificaciones pertinentes.

#### Ecuaciones de costo de mantenimiento para vehículos particulares (Categoría A)

Terreno plano

$$C_{mant_{A,plano}} = 0.0000226 * c_{fd} * a * TDPA * 365 * L * \frac{a}{a+1.5b+2.55c}, \text{ simplificando;}$$

$$C_{mant_{A,plano}} = 0.00949 * c_{fd} * TDPA * L * \frac{a^2}{a + 1.5b + 2.55c}$$

Terreno lomerío



$$Cmant_{A,lomerio} = 0.0000226 * c_{fd} * a * TDPA * 365 * L * \frac{a}{a+3b+6c}, \text{ simplificando;}$$

$$Cmant_{A,lomerio} = 0.00949 * c_{fd} * TDPA * L * \frac{a^2}{a + 3b + 6c}$$

Terreno montañoso

$$Cmant_{A,montañoso} = 0.0000226 * c_{fd} * a * TDPA * 365 * L * \frac{a}{a+5b+12c}, \text{ simplificando;}$$

$$Cmant_{A,montañoso} = 0.00949 * c_{fd} * TDPA * L * \frac{a^2}{a + 5b + 12c}$$

### Ecuaciones de costo de mantenimiento para autobuses (Categoría B)

Terreno plano

$$Cmant_{B,plano} = 2.4078 * c_{fd} * b * TDPA * 365 * L * \frac{1.5b}{a+1.5b+2.55c}, \text{ simplificando;}$$

$$Cmant_{B,plano} = 1318.2705 * c_{fd} * TDPA * L * \frac{b^2}{a + 1.5b + 2.55c}$$

Terreno lomerío

$$Cmant_{B,lomerio} = 2.4078 * c_{fd} * b * TDPA * 365 * L * \frac{3b}{a+3b+6c}, \text{ simplificando;}$$

$$Cmant_{B,lomerio} = 2636.541 * c_{fd} * TDPA * L * \frac{b^2}{a + 3b + 6c}$$

Terreno montañoso

$$Cmant_{B,montañoso} = 2.4078 * c_{fd} * b * TDPA * 365 * L * \frac{5b}{a+5b+12c}, \text{ simplificando;}$$

$$Cmant_{B,montañoso} = 4394.235 * c_{fd} * TDPA * L * \frac{b^2}{a + 5b + 12c}$$

Ecuaciones de costo de mantenimiento para vehículos de carga (Categoría C)

Terreno plano

$$C_{mant_{C,plano}} = 4.2816 * c_{fd} * b * TDPA * 365 * L * \frac{2.55c}{a+1.5b+2.55c}, \text{ simplificando;}$$

$$C_{mant_{C,plano}} = 3985.0992 * c_{fd} * TDPA * L * \frac{c^2}{a + 1.5b + 2.55c}$$

Terreno lomerío

$$C_{mant_{C,lomerio}} = 4.2816 * c_{fd} * b * TDPA * 365 * L * \frac{6c}{a+3b+6c}, \text{ simplificando;}$$

$$C_{mant_{C,lomerio}} = 9376.704 * c_{fd} * TDPA * L * \frac{c^2}{a + 3b + 6c}$$

Terreno montañoso

$$C_{mant_{C,montañoso}} = 4.2816 * c_{fd} * b * TDPA * 365 * L * \frac{12c}{a+5b+12c}, \text{ simplificando;}$$

$$C_{mant_{C,montañoso}} = 18753.408 * c_{fd} * TDPA * L * \frac{c^2}{a + 5b + 12c}$$

### 2.3.5 Ecuaciones de costo fijo para el esquema tarifario.

Se consideraron los siguientes tópicos para el planteamiento de la ecuación de costos fijos en el modelo tarifario:

Costos de administración y cobranza

Seguros y fianzas

Contraprestaciones

Apalancamiento del proyecto

Factor de anualidad del crédito.

Tales costos integraran el término fijo en la ecuación de costo total para una autopista de cuota; se denomina término fijo y a diferencia del término variable son independientes del aforo esperado u observado (TDPA); sin embargo el nivel de la inversión  $I_0$  dependerá tanto de las especificaciones de la autopista como del tipo de terreno donde se localice.

Considerando lo anterior se plantea la siguiente ecuación para el costo fijo

$$CF = I_0 * (\alpha + \beta + \gamma + \delta + f_A)$$

Dónde:

$I_0$ ; Es la inversión inicial del proyecto.

$\alpha$ , Porcentaje de  $I_0$  correspondiente a gastos por administración y cobranza de tarifas.

$\beta$ ; Porcentaje de  $I_0$  correspondiente a gastos por seguros y fianzas.

$\gamma$ ; Porcentaje de  $I_0$  correspondiente a gastos por contraprestaciones.

$\delta$ ; Porcentaje de  $I_0$  correspondiente al apalancamiento del proyecto.

$f_A$ ; Factor de anualidad del crédito calculado de acuerdo a:

$$f_A = I_0 * \frac{i * (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}$$

$n$ ; periodo de inversión

$i$ ; tasa de interés real

De manera que se puede expresar como un factor  $k$ , expresado como sigue:

$$k = \frac{\alpha + \beta + \gamma + \delta + f_A}{365}$$

Sin embargo, para obtener el costo fijo por vehículo, es necesario asignar el costo fijo total a cada unidad de vehículo de la manera siguiente:

$$CF = \frac{I_0 * k}{TDPA}$$

### 2.3.6 Ecuaciones de costo total por categoría de vehículo y tipo de terreno.

Sabiendo que el costo total para el operador de la autopista es la suma de costos fijos más costos variables, se tiene las siguientes ecuaciones para conocer el costo total de acuerdo al tipo de vehículo y terreno.

#### CATEGORÍA A.

Terreno plano

$$CT_{A,plano} = 0.00949 * c_{fd} * TDPA * L * \frac{a^2}{a+1.5b+2.55c} + \frac{I_0 * k}{TDPA}$$

Terreno lomerío

$$CT_{A,lomerío} = 0.00949 * c_{fd} * TDPA * L * \frac{a^2}{a + 3b + 6c} + \frac{I_0 * k}{TDPA}$$

Terreno montañoso

$$CT_{A,montañoso} = 0.00949 * c_{fd} * TDPA * L * \frac{a^2}{a + 5b + 12c} + \frac{I_0 * k}{TDPA}$$

#### CATEGORÍA B.

Terreno plano

$$CT_{B,plano} = 1318.2705 * c_{fd} * TDPA * L * \frac{b^2}{a + 1.5b + 2.55c} + \frac{I_0 * k}{TDPA}$$

Terreno lomerío

$$CT_{B,lomerío} = 2636.541 * c_{fd} * TDPA * L * \frac{b^2}{a + 3b + 6c} + \frac{I_0 * k}{TDPA}$$

Terreno montañoso

$$CT_{B,montañoso} = 4394.235 * c_{fd} * TDPA * L * \frac{b^2}{a + 5b + 12c} + \frac{I_0 * k}{TDPA}$$

### CATEGORÍA C.

Terreno plano

$$CT_{C,plano} = 3985.0992 * c_{fd} * TDPA * L * \frac{c^2}{a + 1.5b + 2.55c} + \frac{I_0 * k}{TDPA}$$

Terreno lomerío

$$CT_{C,lomerío} = 9376.704 * c_{fd} * TDPA * L * \frac{c^2}{a + 3b + 6c} + \frac{I_0 * k}{TDPA}$$

Terreno montañoso

$$CT_{C,montañoso} = 18753.408 * c_{fd} * TDPA * L * \frac{c^2}{a + 5b + 12c} + \frac{I_0 * k}{TDPA}$$

### 2.3.7 Forma general de las ecuaciones de la utilidad

Para evaluar la utilidad que desea el operador de la vía se consideran dos conceptos: utilidad bruta y utilidad marginal, en las siguientes páginas se muestra el desarrollo considerado para evaluar estos dos conceptos dentro de la metodología presentada.

#### 2.3.7.1 Forma general de la ecuación de utilidad bruta

$$U = p * TDPA * 365 * L * [T_i - C_{FD} * \%M_i] - \frac{I_0 * k * L}{TDPA}$$

Dónde:

$p$  = porcentaje del TDPA correspondiente a la categoría  $i$

$TDPA$  = Transito Diario Promedio Anual

$L$  = Longitud del tramo

$T_i$  = Tarifa aplicada a la categoría  $i$

$C_{FD_i}$  = Costo del factor de daño por vehículo de la categoría  $i$

$\%M_i$  = Porcentaje del costo total de mantenimiento correspondiente a la categoría  $i$

$I_0$  = Inversión inicial del proyecto

$k$ , es una constante que agrupa los diferentes porcentajes respecto a  $I_0$  y que corresponden a los diferentes aspectos que integran el costo fijo y que se obtiene de:

$$k = \frac{\alpha + \beta + \gamma + \delta + f_A}{365}$$

Para cada categoría de vehículo y tipo de terreno se sugiere considerar las siguientes expresiones y/o valores para las variables.

a) Tarifas. Se sugiere tomar los rangos en los que fluctúan las tarifas en las principales autopistas de cuota del país y de acuerdo a la categoría vehicular. Estos rangos definidos en la situación actual, servirán para realizar una primera iteración y evaluar la conveniencia o desventaja de la tarifa evaluada, de ser una tarifa no óptima se podrá implementar la metodología para obtener la tarifa óptima.

**Tabla 22 Rangos de tarifas promedio en las principales autopistas de cuota del país**

Categoría de vehículo	Rango tarifario (\$/km)
A	1-2
B	2-4
C	3-6

Fuente: Elaboración propia con datos de SCT.

- b) Costo del factor de daño por vehículo de la categoría  $i$  ( $C_{FD_i}$ ), conforme a lo presentado en el apartado 2.3.2.3

**Tabla 23 Costo del factor de daño por vehículo de la categoría  $i$**

Vehículo	Costo por Daño \$/ve*km
VEA	0.0000226
VEB	2.407852754
VEC	4.281655545

Fuente: Elaboración propia

- c) Porcentaje del costo total de mantenimiento correspondiente a la categoría  $i$ , ( $\%M_i$ ), que como se expuso en el apartado 2.3.4 sirve como pauta para determinar los costos por categoría vehicular.

**Tabla 24 Porcentajes para asignación de costos de mantenimiento (%Mi,t)**

Categoría de vehículo (i)	Tipo de terreno (t)		
	Plano	Lomerío	Montaña
A	$\frac{a}{a + 1.5b + 2.55c}$	$\frac{a}{a + 3b + 6c}$	$\frac{a}{a + 5b + 12c}$
B	$\frac{1.5b}{a + 1.5b + 2.55c}$	$\frac{3b}{a + 3b + 6c}$	$\frac{5b}{a + 5b + 12c}$
C	$\frac{2.55c}{a + 1.5b + 2.55c}$	$\frac{6c}{a + 3b + 6c}$	$\frac{12c}{a + 5b + 12c}$

Fuente: Elaboración propia

Así pues se integran los conceptos antes expuestos para obtener las ecuaciones de utilidad bruta por categoría de vehículo.

### **CATEGORÍA A.**

Terreno plano

$$U = a * TDPA * 365 * L * \left[ T_A - 0.0000226 * \frac{a}{a + 1.5b + 2.55c} \right] - \frac{I_0 * k * L}{TDPA}$$

Terreno lomerío

$$U = a * TDPA * 365 * L * \left[ T_A - 0.0000226 * \frac{a}{a + 3b + 6c} \right] - \frac{I_0 * k * L}{TDPA}$$

Terreno montañoso

$$U = a * TDPA * 365 * L * \left[ T_A - 0.0000226 * \frac{a}{a + 5b + 12c} \right] - \frac{I_0 * k * L}{TDPA}$$

### **CATEGORÍA B.**



Terreno plano

$$U = b * TDPA * 365 * L * \left[ T_B - 2.4078 * \frac{1.5b}{a + 1.5b + 2.55c} \right] - \frac{I_0 * k * L}{TDPA}$$

Terreno lomerío

$$U = b * TDPA * 365 * L * \left[ T_B - 2.4078 * \frac{3b}{a + 3b + 6c} \right] - \frac{I_0 * k * L}{TDPA}$$

Terreno montañoso

$$U = b * TDPA * 365 * L * \left[ T_B - 2.4078 * \frac{5b}{a + 5b + 12c} \right] - \frac{I_0 * k * L}{TDPA}$$

### **CATEGORÍA C.**

Terreno plano

$$U = c * TDPA * 365 * L * \left[ T_c - 4.286 * \frac{2.55c}{a + 1.5b + 2.55c} \right] - \frac{I_0 * k * L}{TDPA}$$

Terreno lomerío

$$U = c * TDPA * 365 * L * \left[ T_c - 4.286 * \frac{6c}{a + 3b + 6c} \right] - \frac{I_0 * k * L}{TDPA}$$

Terreno montañoso

$$U = c * TDPA * 365 * L * \left[ T_c - 4.286 * \frac{12c}{a + 5b + 12c} \right] - \frac{I_0 * k * L}{TDPA}$$

### 2.3.7.2 Forma general de la ecuación de da utilidad marginal

Se ha defino a la utilidad marginal de acuerdo a la siguiente expresión:

$$U_{MARGINAL} = \alpha - \frac{\beta}{TDPA^2}$$

Donde;

$$\alpha = p * 365 * L * [T_i - C_{FD} * \%M_i]$$

y

$$\beta = I_0 * k * L$$

Empleando la expresión anterior y los conceptos expuestos en apartados anteriores se determinan las ecuaciones para determinar la utilidad marginal por categoría de vehículo y tipo de terreno.

#### **CATEGORÍA A**

Terreno plano:

$$U_{MARGINAL_{A,PLANO}} = a * 365 * L * \left[ T_A - 0.0000226 * \frac{a}{a + 1.5b + 2.55c} \right] - \frac{I_0 * k * L}{TDPA^2}$$

Terreno lomerío:

$$U_{MARGINAL_{A,LOMERIO}} = a * 365 * L * \left[ T_A - 0.0000226 * \frac{a}{a + 3b + 6c} \right] - \frac{I_0 * k * L}{TDPA^2}$$

Terreno montañoso:

$$U_{MARGINAL_{A,MONTAÑOSO}} = a * 365 * L * \left[ T_A - 0.0000226 * \frac{a}{a + 5b + 12c} \right] - \frac{I_0 * k * L}{TDPA^2}$$

#### **CATEGORÍA B**

Terreno plano:

$$U_{MARGINAL_{B,PLANO}} = b * 365 * L * \left[ T_B - 2.4078 * \frac{1.5b}{a + 1.5b + 2.55c} \right] - \frac{I_0 * k * L}{TDPA^2}$$

Terreno lomerío:

$$U_{MARGINAL_{B,LOMERIO}} = b * 365 * L * \left[ T_B - 2.4078 * \frac{3b}{a + 3b + 6c} \right] - \frac{I_0 * k * L}{TDPA^2}$$

Terreno montañoso:

$$U_{MARGINAL_{B,MONTAÑOSO}} = b * 365 * L * \left[ T_B - 2.4078 * \frac{5b}{a + 5b + 12c} \right] - \frac{I_0 * k * L}{TDPA^2}$$

### **CATEGORÍA C**

Terreno plano:

$$U_{MARGINAL_{C,PLANO}} = c * 365 * L * \left[ T_c - 4.286 * \frac{2.55c}{a + 1.5b + 2.55c} \right] - \frac{I_0 * k * L}{TDPA^2}$$

Terreno lomerío:

$$U_{MARGINAL_{C,LOMERIO}} = c * 365 * L * \left[ T_c - 4.286 * \frac{6c}{a + 3b + 6c} \right] - \frac{I_0 * k * L}{TDPA^2}$$

Terreno montañoso:

$$U_{MARGINAL_{C,MONTAÑOSO}} = c * 365 * L * \left[ T_c - 4.286 * \frac{12c}{a + 5b + 12c} \right] - \frac{I_0 * k * L}{TDPA^2}$$

### 2.3.8 Maximización de la utilidad marginal.

Dada la naturaleza de las funciones de utilidad total y utilidad bruta el punto de optimización de ambas utilidades se localiza en la intersección de las dos curvas, es decir cuándo:

$$U_{MARGINAL} = U$$

Los puntos de optimización se obtendrán de resolver un polinomio de la siguiente forma:

$$\propto TDPA^3 - TDPA^2 - TDPA + \beta = 0$$

Cumpliendo con lo anterior, se tiene las siguientes ecuaciones de maximización de la utilidad marginal

#### **CATEGORÍA A**

Terreno plano:

$$a * 365 * L * \left[ T_A - 0.0000226 * \frac{a}{a + 1.5b + 2.55c} \right] TDPA^3 - TDPA^2 - TDPA + [I_0 * k * L] = 0$$

Terreno lomerío:

$$a * 365 * L * \left[ T_A - 0.0000226 * \frac{a}{a + 3b + 6c} \right] TDPA^3 - TDPA^2 - TDPA + [I_0 * k * L] = 0$$

Terreno montañoso:

$$a * 365 * L * \left[ T_A - 0.0000226 * \frac{a}{a + 5b + 12c} \right] TDPA^3 - TDPA^2 - TDPA + [I_0 * k * L] = 0$$

#### **CATEGORÍA B**

Terreno plano:

$$b * 365 * L * \left[ T_B - 2.4078 * \frac{1.5b}{a + 1.5b + 2.55c} \right] TDPA^3 - TDPA^2 - TDPA + [I_0 * k * L] = 0$$

Terreno lomerío:

$$b * 365 * L * \left[ T_B - 2.4078 * \frac{3b}{a + 3b + 6c} \right] TDPA^3 - TDPA^2 - TDPA + [I_0 * k * L] = 0$$

Terreno montañoso:

$$b * 365 * L * \left[ T_B - 2.4078 * \frac{5b}{a + 5b + 12c} \right] TDPA^3 - TDPA^2 - TDPA + [I_0 * k * L] = 0$$

### **CATEGORÍA C**

Terreno plano:

$$c * 365 * L * \left[ T_c - 4.286 * \frac{2.55c}{a + 1.5b + 2.55c} \right] TDPA^3 - TDPA^2 - TDPA + [I_0 * k * L] = 0$$

Terreno lomerío:

$$c * 365 * L * \left[ T_c - 4.286 * \frac{6c}{a + 3b + 6c} \right] TDPA^3 - TDPA^2 - TDPA + [I_0 * k * L] = 0$$

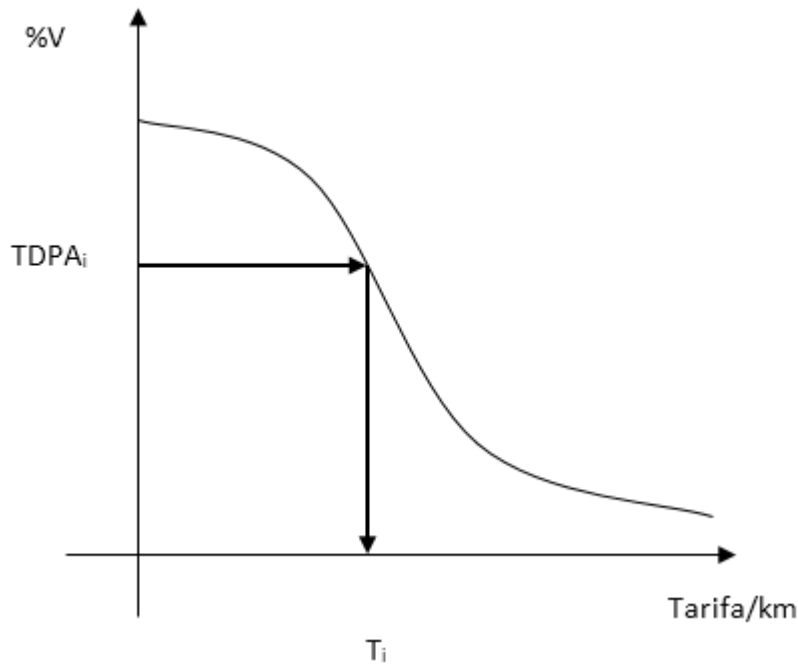
Terreno montañoso:

$$c * 365 * L * \left[ T_c - 4.286 * \frac{12c}{a + 5b + 12c} \right] TDPA^3 - TDPA^2 - TDPA + [I_0 * k * L] = 0$$

### 2.3.9 Arbitraje entre nivel tarifario óptimo y nivel de demanda.

Al resolver los polinomios, se obtendrán los aforos (TDPA) que correspondan a la utilidad marginal máxima y que nos permiten determinar la tarifa óptima mediante el uso de las curvas de demanda en donde se relaciona el volumen de aforo y su tarifa correspondiente.

Figura 8 Curva demanda-tarifa



Fuente: Elaboración propia

Es necesario considerar la opción del arbitraje para la regulación de los aforos, debido a que la probabilidad de que estemos justo en el óptimo no necesariamente es certera bien no es una tarifa que pueda ser aplicada según los intereses de los operadores de la vía.

Para ello se propone construir una función que relacione el porcentaje de la demanda (%V) con la tarifa aplicada, cuyo desempeño se asemeje en lo posible a la curva de preferencias declaradas de los usuarios de la autopista. La función propuesta sería de la siguiente forma:

$$F(x) = \frac{1}{\alpha + \beta e^{-(\theta x + \mu)}} + k$$

Donde  $\alpha, \beta, \phi, \mu$  y  $k$  son parámetros de la función; los cuales serían diferentes para cada caso analizado, así como sensibles a la categoría vehicular y terreno según sea el caso.

Mediante esta función se trata de asemejar la curva logística muy parecida a la distribución de Weibull, la cual es una función que complementa a la distribución normal y exponencial. De manera que una curva de estas características es usada para el análisis de eventos que implican un fallo posible. En nuestro caso se pretende modelar la sensibilidad de la demanda de usuarios a la variación de la tarifas en la autopista.

### **2.3.9.1 Propósito del arbitraje.**

Inicialmente se cuenta con los datos por categoría vehicular de TDPA y tarifa aplicada, según sea el caso de la autopista analizada:

Proyecto de autopista: Se utilizará la información de preferencias declaradas, así como una tarifa inicial propuesta.

Autopistas en operación: Se utilizará la información de TDPA obtenida mediante aforos a disposición del operador y la tarifa aplicada en curso.

Utilizando la metodología propuesta se ha de calcular:

Costos fijos y variables, costo total y utilidad bruta por tipo de vehículo y terreno.

Utilidad marginal (UM) por tipo de terreno y categoría vehicular en base a datos de entrada.

Utilidad marginal óptima aplicando la metodología de maximización, es decir resolución del polinomio de la curva de utilidad marginal.

En caso de que la UM para los datos de entrada sea igual a la  $UM_{\text{óptima}}$ , se considerará la aplicación del nivel tarifario de entrada en espera de obtener los aforos considerados. Se tendrán los siguientes casos:

Cuando  $UM_{\text{óptima}} > UM$  de entrada, en este caso el ajuste será incrementado el costo del peaje hasta alcanzar la  $UM_{\text{óptima}}$ . Para ello se utilizarán las curvas de distribución Tarifa-%Aforo, ya que se tendrá el Aforo óptimo y se requiere conocer el nivel tarifario óptimo para dicho aforo.

Cuando  $UM_{\text{óptima}} < UM$  de entrada, cuando se tenga esta situación el ajuste se realizará disminuyendo las tarifas hasta alcanzar el nivel óptimo de acuerdo a las curvas Tarifa-%Aforo mediante las cuales se ha de conocer el nivel tarifario adecuado.

### 2.3.9.2 Aplicaciones del arbitraje

El arbitraje está pensado para usarse tanto en autopistas en operación como en autopistas en fase de proyecto, teniendo diferentes objetivos los cuales se describen a continuación.

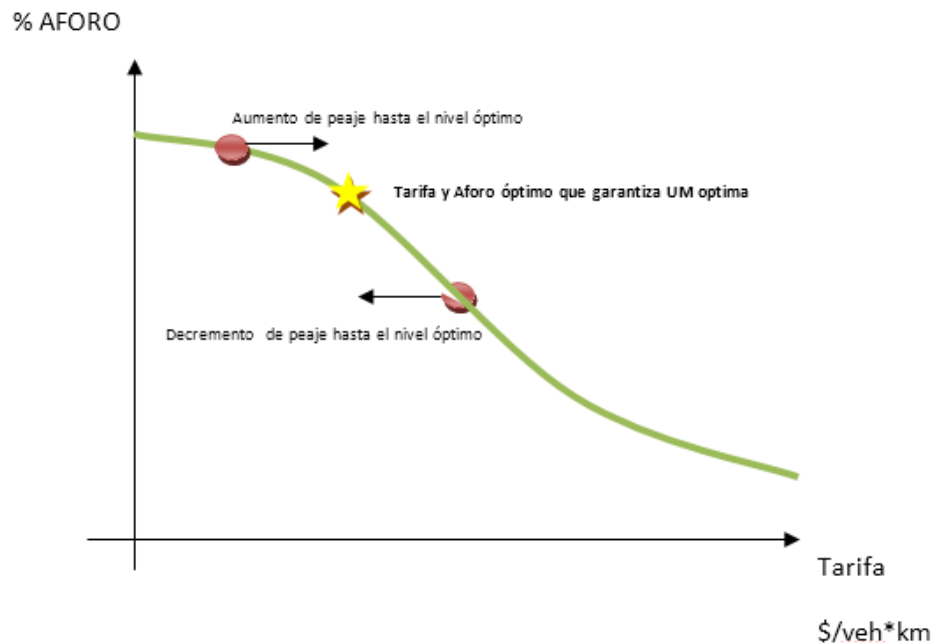
#### Autopista Existente y en operación.

El objetivo del arbitraje a este caso particular es ser una herramienta en la gestión de los esquemas tarifarios aplicados en la vía.

Dado que se trata de una autopista en operación se cuenta con datos de aforos vehiculares en los tramos de la autopista y sus correspondientes tarifas. Asumiendo lo anterior se puede en principio conocer la tarifa óptima que maximice la utilidad y tomando los datos disponibles se puede hacer una comparación entre la utilidad óptima y la utilidad actual. Así pues se puede hacer un análisis de la variación de la demanda de los usuarios en función de la variación de la tarifa y decidir (gestionar) las tarifa más conveniente para la autopista.

Esta situación se puede ejemplificar en el siguiente esquema:

**Figura 9 Función del arbitraje**



Fuente: Elaboración propia



En donde la curva de utilidad nos permitirá conocer con certeza la variación necesaria en la tarifa con la finalidad de acercarse tanto como se pueda a la tarifa óptima, cuidando desde luego la variación en el aforo o demanda vehicular.

#### Autopista en fase de Proyecto.

##### b.1) Evaluación de un proyecto

El objetivo del arbitraje en este caso es establecer la conveniencia del proyecto en base a la comparación de la autopista entre las preferencias declaradas y el estado óptimo.

Se cuenta con las curvas de preferencias declaradas, las cuales proporcionan información acerca de la disposición de la disposición a pagar cierto nivel tarifario por parte de los usuarios de la autopista y su correspondiente pronóstico de demanda.

Así pues se obtendría la tarifa óptima que maximizaría la utilidad en el proyecto y se justificaría una evaluación contra los pronósticos encontrados en la encuestas para determinar la conveniencia de aplicar las tarifas aceptadas por los usuarios y en su caso en que forma impactaría a la demanda la modificación de los niveles tarifarios empleando la curva la función %Aforo-Tarifa.

Se determinaría así el costo de oportunidad por mantener un aforo que no sea el óptimo pero que permita acercarnos a la situación óptima.

##### b.2) Ingeniería Financiera

Objetivo de la aplicación este caso es el análisis de sensibilidad a la tarifa.

El cálculo de las tarifas iniciales con el método tradicional de una autopista es en base al máximo ingreso deseado por la operadora, al comparar contra las preferencias declaradas se varía la tarifa conllevando una variación en la demanda pero sin llevar a cabo ningún proceso de optimización, ya que se busca tan solo la maximización de ingresos.

Usando el arbitraje propuesto se propone calcular la tarifa de máximo ingreso que puede ser usada como una tarifa de referencia o tope. Al calcular la tarifa óptima se establece la tarifa que maximice la utilidad y su correspondiente aforo.

Lo que interesa a la empresa operadora es tener una herramienta para realizar un análisis de sensibilidad sobre la curva de preferencias declaradas que permita establecer la tarifa que convenga a la empresa y que se acerque al óptimo en lo posible, así como la distribución del aforo vehicular.

### 3 Conclusiones.

En el trabajo de investigación presentado se ha conseguido desarrollar la metodología que permita evaluar los niveles tarifarios propuestos en un proyecto o autopista en operación, comparados contra los que se pueden obtener mediante la metodología de maximización de la utilidad.

La metodología está desarrollada en forma desagregada, es decir según el tipo de vehículo y tipo de terreno en donde se desea evaluar la autopista.

Se logró establecer lo siguiente:

Ecuaciones de costo total por operación y mantenimiento, que resultan de la adición de las ecuaciones de costos fijos y costos variables.

Ecuaciones de utilidad bruta, que es el resultado de considerar tanto los ingresos por un cierto nivel tarifario aplicado o propuesto y los costos totales del punto anterior.

Ecuaciones de utilidad marginal, resultado del análisis matemático de la ecuación de utilidad bruta.

Metodología propuesta para obtener el punto de optimización que maximice al mismo tiempo la utilidad bruta y la utilidad marginal.

Función polinómica que permite determinar la distribución del aforo vehicular en condiciones óptimas de utilidades máximas.

Planteamiento del arbitraje para comparar un esquema tarifario en operación o propuesto contra el óptimo.

La metodología está desarrollada de manera tal que se necesite el menor número de variables de entrada y con ello se facilite la operación de un modelo computacional que se base en la metodología propuesta.

Flexibilidad de la metodología, en el sentido de que puede ser aplicada para evaluación de un estado actual de niveles tarifarios para autopistas en operación; o bien para la obtención de tarifas óptimas en autopistas en fase proyecto según la demanda esperada.

## 4 Bibliografía

- Bonifaz, J. L., Urrunaga, R., & Wakeham, J. (2001). *Financiamiento privado e impuestos: El caso de las redes viales en el Perú*. Universidad del Pacífico. Lima: Consorcio de Investigación Económica y Social.
- Camacho, P. M. (2008). *Construcción y conservación de vías*. Bogotá, Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamérica. (1997). *Financiación de Carreteras. Documentación de Sistemas Existentes de Tarificación y Recaudación*.
- Flores Hernández, S. (Octubre-Diciembre de 2007). Propuesta preliminar de un modelo econométrico para actualizar tarifas de cuota en autopistas mexicanas. *Ingeniería, Investigación y TECNOLOGÍA*, VIII(004), 213-225.
- Hun, K., & Chun, K. (2001). An Application of Two-part Tariff Pricing to Expressways: A Case of Korea. *9th World Conference on Transport Research (WCTR)*. Seoul.
- Oglesby Clarkson, H. (1982). *Highway engineering*. New York : J. Wiley.
- Orden, H. G. (2004). *LOS ACONDICIONAMIENTOS DE CARRETERAS EN LOS SISTEMAS DE GESTIÓN. Una metodología para su análisis e integración dentro de estos sistemas*. Burgos, España: Universidad de Burgos.
- Parkin, M. (2006). *Microeconomía* (7ma ed.). Pearson Education.
- Rico Galindo, S. (s.f.). *Determinación de tarifas óptimas para la Red Mexicana de Autopistas de Cuota*. S.C.T.
- Rico-Rodríguez, A. (1995). *CRITERIOS PARA ESTABLECER LA CUOTA ÓPTIMA EN UNA AUTOPISTA DE CUOTA. (LOGRO DEL MÁXIMO INGRESO DEL RECAUDADOR Y DEL MÍNIMO COSTO NACIONAL DEL TRANSPORTE)*. Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2010). Recuperado el 4 de junio de 2010, de [www.sct.gob.mx](http://www.sct.gob.mx)
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (s.f.). Capítulo II .-VOLÚMENES DE TRÁNSITO REGISTRADOS EN LAS ESTACIONES PERMANENTES DE CONTEO DE VEHÍCULOS. *Datos viales 2010*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (s.f.). <http://dc.cst.gob.mx>. (S. d. Infraestructura, Ed.) Recuperado el Agosto de 2011, de <http://dc.cst.gob.mx>
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2011). *Estadística Básica del Autotransporte Federal*. Subsecretaría de Transporte, Dirección General de Autotransporte Federal.
- Sitio web CAPUFE*. (2010). Recuperado el 04 de junio de 2009, de [www.capufe.gob.mx](http://www.capufe.gob.mx)
- Thuesen, H., Fabricky, W., & Thuesen, G. (1986). *Ingeniería Económica*. Prentice Hall.
- Vergara Alert, C., & Robusté Antón, F. (2002). *Un modelo de autopistas con peajes como precios de servicios*. Centro de Innovación del Transporte. Universidad Politécnica de Cataluña.

## Anexos

### Anexo 1 Cálculo del factor equivalente de carga (LEF)

**Tabla 25** Calculo del factor equivalente de carga

Tipo de Vehículo	Clasificación	Ejes	Num de llantas	Peso total (ton)	Peso por eje (ton)	LEF
AUTOMOVIL	A2	2	4	2	1.000	0.000225
AUTOBUS	B2	2	6	15.2	7.600	0.750760
	B3	3	10	20	6.667	0.444510
	B4	4	10	27	6.750	0.467156
CARGA	C2	2	6	15.5	7.750	0.811809
	C3	3	10	23.5	7.833	0.847292
	C4	4	14	28	7.000	0.540305
	T3-S2	5	18	41.5	8.300	1.067971
	T3-S3	6	22	50.5	8.417	1.129295
	T3-S2-R2	7	26	61.5	8.786	1.340773
	T3-S2-R3	8	30	69.5	8.688	1.281817
	T3-S2-R4	9	34	77.5	8.611	1.237325


8  
 VEHICULO TIPO: 18000 Lb/eje = 8164.66 Kg/eje = 8.16 Tons/eje  
 1lb= 0.4535924 Kg

Fuente: Elaboración propia con datos de Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2008, Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal

Ejemplo de cálculo:

Para vehículo B4

**Tabla 26 Ejemplo de cálculo LEF**

Autobus ( b )			
Nomenclatura	Numero de ejes	Numero de llantas	Configuracion del vehiculo
B2	2	6	

Fuente: Elaboración propia

$$LEF = \left( \frac{W_{B2}/eje}{W_N} \right)^4 = \left( \frac{\frac{15.2 \text{ tons}}{2 \text{ ejes}}}{8.16 \frac{\text{tons}}{\text{eje}}} \right)^4 = 0.751$$

## Anexo 2 Cálculo del daño por tipo de vehículo

**Tabla 27 Tránsito vehicular en los principales tramos de la red nacional de carreteras pavimentadas, 2002 y 2003**

Tramo de carretera	Longitud del tramo (km)	No. De carriles	2002				2003				Ubicación de la estación de aforo (1)	Tcma tdpa 2002-2003
			TDPA	% A	%B	%C	TDPA	% A	%B	%C		
<b>MÉXICO-PUEBLA (CUOTA)</b>	125	4	46715	70	11	19	49186	70	11	19	STA.BARBARA-IZUCAR DE MATAMOROS	5.3%
<b>MÉXICO-QUERÉTARO (CUOTA)</b>	212	4	37171	70	10	20	38161	69	10	21	TEPEJI DEL RIO	2.7%
MÉXICO-TOLUCA	66	6	34938	80	5	15	37564	78	6	16	HUIXQUILUCAN	7.5%
<b>MÉXICO-CUERNAVACA (CUOTA) (2)</b>	80	4	27600	79	5	16	29113	82	5	13	T. IZQ. CUAUTLA	5.5%
COATZACOALCOS-ACAYUCAN	60	2	19120	80	3	17	20637	83	4	13	T. IZQ. REFINERIA	7.9%
QUERÉTARO-SAN LUIS POTOSÍ (2)	204	2 y 4	14825	59	9	32	14786	68	10	22	SAN DIEGO DE LA UNION	-0.3%
<b>PUEBLA-CÓRDOBA (CUOTA)</b>	175	2 y 4	13733	66	6	28	14665	70	4	26	CD.MENDOZA	6.8%
PUEBLA-TLAXCALA	33	2	14485	82	5	13	14597	82	5	13	PANZACOLA	0.8%
GUADALAJARA-IRAPUATO	246	2	14375	68	8	24	14510	71	8	21	T.M.DOBLADO	0.9%

Tramo de carretera	Longitud del tramo (km)	No. De carriles	2002				2003				Ubicación de la estación de aforo (1)	Tcma tdpa 2002-2003
			TDPA	% A	%B	%C	TDPA	% A	%B	%C		
MÉXICO-PACHUCA (LIBRE)	90	2	14293	79	5	16	14465	76	5	19	T. IZQ. ZUMPANGO	1.2%
<b>QUERÉTARO-IRAPUATO (CUOTA)</b>	105	2 y 4	14057	69	9	22	14150	73	8	19	CELAYA-SAN M.ALLENDE	0.7%
GUADALAJARA-TEPIC	225	2	10391	74	4	22	10305	74	4	22	IXTLAN DEL RIO	-0.8%
MONTERREY-REYNOSA	225	2	7319	73	5	22	7454	69	6	25	GRAL.BRAVO	1.8%
MONTERREY-CD. VICTORIA	287	2	6839	79	7	14	7146	75	6	19	LINARES	4.5%
MONTERREY-NUEVO LAREDO (2)	228	2	6310	80	7	13	6414	79	9	12	SABINAS HGO.	1.6%
MAZATLÁN-CULIACÁN (2)	216	2	4945	72	8	20	5060	73	7	20	ELOTA	2.3%
ACAYUCAN-SALINA CRUZ	243	2	4708	67	10	23	4797	71	8	21	TUXTEPEC	1.9%
MAZATLÁN-TEPIC	292	2	3785	73	7	20	3900	68	7	25	ESCUINAPA DE HGO.	3.0%
COATZACOALCOS-VILLAHERMOSA	171	2 y 4	3738	65	12	23	3842	67	9	24	CAMPO MAGALLANES	2.8%

PROMEDIOS	74	7	19
-----------	----	---	----

NOTAS: (1) Los datos de este cuadro fueron obtenidos de los aforos en estaciones cercanas a la mitad del tramo y son considerados como representativos del tránsito con origen y destino en los centros de población señalados.

(2) Para 2002, no se disponía de la composición vehicular, se optó por conservar la del año anterior.

TDPA Tránsito Diario Promedio Anual (en los dos sentidos).

A Automóviles.

B Autobuses.

C Camiones de carga.

n.d. No disponible

Fuente: Manual Estadístico del Sector Transporte 2009, SCT



Ejemplo para la autopista de cuota México-Puebla:

Tipo de vehiculo	TDPA	Eq ESAL	\$ (equivalente ESALs)	\$ (equivalente ESALs)*dist	% por tipo de vehículo
A	70%	0.000225	0.000140761	0.017595184	0.002%
B	11%	1.662427	1.039870816	129.983852	16.760%
C	19%	8.256587	5.164608965	645.5761207	83.238%

775.5775679
-------------

TDPA	49,186
------	--------

A	605.8057016	0.009%
B	703272.432	10.439%
C	6033128.343	89.552%

COSTO MTO ANUAL	\$ 6 ,737 ,006.581
-----------------	--------------------

Columna 2: Datos obtenidos de Tabla 2.

Columna 3: En base a cálculos de la Tabla 1 se agruparon los LEF para obtener el equivalente ESAL

$$Eq\ ESAL_A = 0.000225$$

$$Eq\ ESAL_B = LEF_{B2} + LEF_{B3} + LEF_{B4} = 0.750760 + 0.444510 + 0.467156 = 1.039$$

$$\begin{aligned}
 Eq\ ESAL_C &= LEF_{C2} + LEF_{C3} + LEF_{C4} + LEF_{T3-S2} + LEF_{T3-S3} + LEF_{T3-S2-R2} + LEF_{T3-S2-R3} \\
 &\quad + LEF_{T3-S2-R4} \\
 &= 0.811809 + 0.847292 + 0.540305 + 1.067971 + 1.129295 + 1.340773 + 1.281817 \\
 &\quad + 1.237325 = 5.164
 \end{aligned}$$

Columna 4: Usando el dato actualizado en el año 2009 para costo de mantenimiento por ESAL-KM igual a \$ 0.626, se calcula el costo por Eq ESAL-KM.

Columna 5: Se multiplica el costo anterior por la longitud de la autopista

Columna 6: se obtiene el porcentaje por tipo de vehículo del costo por ESAL en la longitud total de la autopista.

## Anexo 3 Resolución a los polinomios para encontrar los puntos de optimización.

Es necesario encontrar la solución del polinomio de la forma:

$$\propto TDPA^3 - TDPA^2 - TDPA + \beta = 0$$

Para cada categoría y tipo de vehículo.

Utilizando software para resolver el polinomio, se llega a que las tres soluciones a dicho polinomio son las siguientes:

Solución 1.

$$x = \sqrt[3]{\sqrt{\left(-\frac{\beta}{2\alpha} + \frac{1}{6\alpha^2} + \frac{1}{27\alpha^3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3\alpha} - \frac{1}{9\alpha^2}\right)^3} - \frac{\beta}{2\alpha} + \frac{1}{6\alpha^2} + \frac{1}{27\alpha^3}} + \sqrt[3]{-\sqrt{\left(-\frac{\beta}{2\alpha} + \frac{1}{6\alpha^2} + \frac{1}{27\alpha^3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3\alpha} - \frac{1}{9\alpha^2}\right)^3} - \frac{\beta}{2\alpha} + \frac{1}{6\alpha^2} + \frac{1}{27\alpha^3} + \frac{1}{3\alpha}}$$

Solución 2

$$x = \frac{\sqrt[3]{\sqrt{\left(-\frac{\beta}{2\alpha} + \frac{1}{6\alpha^2} + \frac{1}{27\alpha^3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3\alpha} - \frac{1}{9\alpha^2}\right)^3} - \frac{\beta}{2\alpha} + \frac{1}{6\alpha^2} + \frac{1}{27\alpha^3}}}{2} - \frac{\sqrt[3]{\sqrt{\left(-\frac{\beta}{2\alpha} + \frac{1}{6\alpha^2} + \frac{1}{27\alpha^3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3\alpha} - \frac{1}{9\alpha^2}\right)^3} - \frac{\beta}{2\alpha} + \frac{1}{6\alpha^2} + \frac{1}{27\alpha^3}}}{2} + \frac{\sqrt[3]{\sqrt{\left(-\frac{\beta}{2\alpha} + \frac{1}{6\alpha^2} + \frac{1}{27\alpha^3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3\alpha} - \frac{1}{9\alpha^2}\right)^3} - \frac{\beta}{2\alpha} + \frac{1}{6\alpha^2} + \frac{1}{27\alpha^3}}}{2} + \frac{1}{3\alpha}$$

Solución 3

$$x = -\frac{\sqrt[3]{\sqrt{\left(-\frac{\beta}{2\alpha} + \frac{1}{6\alpha^2} + \frac{1}{27\alpha^3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3\alpha} - \frac{1}{9\alpha^2}\right)^3} - \frac{\beta}{2\alpha} + \frac{1}{6\alpha^2} + \frac{1}{27\alpha^3}}}{2} + \frac{\sqrt[3]{\sqrt{\left(-\frac{\beta}{2\alpha} + \frac{1}{6\alpha^2} + \frac{1}{27\alpha^3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3\alpha} - \frac{1}{9\alpha^2}\right)^3} - \frac{\beta}{2\alpha} + \frac{1}{6\alpha^2} + \frac{1}{27\alpha^3}}}{2} - \frac{\sqrt[3]{\sqrt{\left(-\frac{\beta}{2\alpha} + \frac{1}{6\alpha^2} + \frac{1}{27\alpha^3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3\alpha} - \frac{1}{9\alpha^2}\right)^3} - \frac{\beta}{2\alpha} + \frac{1}{6\alpha^2} + \frac{1}{27\alpha^3}}}{2} + \frac{1}{3\alpha}$$

Debido a que las soluciones 2 y 3 resultan en raíces imaginarias, utilizaremos únicamente la solución 1.

Dónde:

$$\alpha = p * 365 * L * [T_i - C_{FD} * \%M_i]$$

y

$$\beta = I_0 * k * L$$

Según cada categoría y tipo de terreno.