



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

ESTIMACIÓN DEL VALOR SUBJETIVO DEL TIEMPO DE LOS USUARIOS DE
CARRETERAS DE COBRO DE CUOTA

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

PRESENTA:
JOSÉ LUIS OLMEDO LÓPEZ

TUTOR PRINCIPAL
DR. RICARDO ACEVES GARCÍA

MÉXICO, D. F. Mayo del 2013

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Acosta Flores José Jesús

Secretario: M.C. Del Moral Dávila Manuel

Vocal: Dr. Aceves García Ricardo

1^{er.} Suplente: M.I. Rivera Colmenero José Antonio

2^{do.} Suplente: M.C. Murillo Bagundo Alejandro

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: MÉXICO, D.F.

TUTOR DE TESIS:

DR. RICARDO ACEVES GARCÍA

NOMBRE

FIRMA

A la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

A la Facultad de Ingeniería

A mí Director de Tesis Dr. Ricardo Aceves Mejía

A mí esposa Yaneli

A mis padres Concepción y Luis

A mis hermanos Alberto y Moisés

A mis cuñadas Guadalupe y Miriam

A mis sobrinos Ana Paula y Luis

A mis suegros Alicia y Rodolfo

A mis cuñados Jonathan y Edith

A mis amigos y compañeros de maestría Silverio y Francisco

A mis compadres y ahijada Oscar, Guadalupe y Abril

A mis amigos Moisés, Agustín y Alejandro

A mis amigos y compañeros de profesión Ing. Ricardo Alejandro Romero
Pezo e Ing. José Luis Castro Rondón

A la Ing. Diana Patricia Galindo Gómez

RESUMEN

En este trabajo se analiza la importancia que tiene estimar el valor subjetivo del tiempo de cada uno de los usuarios que forman parte de la demanda de una nueva infraestructura de carretera de cobro de cuota.

En un área de interés o región, al usuario se le presentan varias alternativas de ruta para realizar su viaje. La selección del usuario dependerá de sus características socioeconómicas y de los atributos de cada alternativa. Por lo que, para medir cada beneficio de cada alternativa surge el concepto de utilidad.

Cada usuario tiene una diferente disposición a pagar una cuota por ahorrar tiempo en su viaje. De tal forma que, ¿Cuánto estaría dispuesto a pagar un usuario por ahorrar un minuto de su viaje?

La utilidad de cada alternativa está en función de variables cuantitativas como el tiempo y costo, y cualitativas como comodidad, seguridad, etc. Todas estas variables definen la función de utilidad.

Y todas ellas, importantes en la selección del usuario. Por lo que, para estimar la probabilidad de que seleccione una alternativa sobre otra, se analiza resolver esta decisión dicotómica con un modelo de selección discreta, como es el modelo LOGIT BINOMIAL.

ABSTRACT

This paper analyses the importance of estimating the subjective value of time for each one of the users that are part of the demand for new road infrastructure fee payment.

In an area of interest or region, the user is presented with several alternatives for your trip route. The user selection will depend on their socioeconomic characteristics and attributes of each alternative. So, to measure each benefit of each alternative arises the concept of utility.

Each user has a different willingness to pay a fee to save time on your trip. So that, how much would be willing to pay a user to save a minute of your trip?

The utility of each alternative is based on quantitative variables such as time and cost and qualitative as comfort, safety, etc. All these variables define the utility function.

And all of them are important in the selection on the user. So, to estimate the probability that selects an alternative over another, this decision is analyzed dichotomous solve a discrete choice model, such as LOGIT MODEL BINOMIAL.

INTRODUCCIÓN

En los últimos seis años en México se realizó una fuerte inversión dentro del sector carretero, en la construcción de autopistas regionales y urbanas, así como de puentes internacionales y libramientos viales. Y para cada proyecto de este tipo de infraestructura, como parte de su análisis de viabilidad y factibilidad, se realizaron estudios de transporte.

Para estos casos, el objetivo principal del estudio de transporte es la estimación de la demanda e ingresos que tendrá la nueva vialidad dentro de un área de interés. De tal forma, que para estimar la demanda, se recurre a metodologías, como al modelo clásico de transporte de cuatro etapas.

Sin embargo, este modelo se ha venido variando conforme al tiempo, debido al desarrollo de herramientas computacionales y/o a la aplicación de otras metodologías que complementan al modelo clásico y lo hacen más eficaz para ciertos casos de estudio.

Dentro de una de las etapas o sub-modelos del modelo clásico de transporte, se encuentra el modelo de asignación de ruta. Existen diversos modelos de asignación de ruta, como equilibrio de usuario, todo o nada, y los modelos de selección discreta, que dentro de sus múltiples aplicaciones al transporte, también se utilizan para la fase de selección modal.

A partir del desarrollo de infraestructura carretera con cobro de cuota, se ha venido desarrollando el uso de modelos de selección discreta para la estimación de su demanda, y por resultado, los ingresos que generara.

Parte importante entorno al desarrollo de un modelo de selección, son las diversas metodologías que han venido aplicando en campo para conocer las preferencias o selecciones de ruta que realizan los usuarios, así como sus características socioeconómicas.

Y para conocer sus selecciones y características socioeconómicas de los usuarios, se puede hacer a través de una encuesta de preferencia declarada aplicada dentro del área de interés. El objetivo es conocer la elección de los usuarios cuando se les presenta un escenario hipotético, que consiste en presentar alternativas de ruta con sus diferentes atributos, y elija la que le proporcione mayores beneficios.

Los beneficios que proporciona cada alternativa al usuario, se miden a partir del concepto de utilidad. Y la función de utilidad está compuesta por sus atributos

cualitativos, como el tiempo y costo del viaje, y cualitativos como la seguridad y comodidad de la ruta o carretera. Atributos que son considerados en medida de las características socioeconómicas del usuario. Sin embargo, hay que considerar que todos tienen una diferente disposición a pagar una cuota por ahorrar tiempo de su viaje, al utilizar una nueva autopista. Por lo que, ¿Cuánto estaría dispuesto a pagar el usuario por ahorrar un minuto de su viaje?, y ¿Cuál es la probabilidad de que elija la nueva autopista?

En torno a estas preguntas se ha desarrollado metodologías teóricas y prácticas para resolverlas, y en los últimos años creció su importancia dentro del sector transporte, en específico en proyectos carreteros de inversión, debido al desarrollo de la infraestructura carretera en el país. De tal forma, que a partir de este interés y la inquietud de detallar los factores que intervienen en la estimación del valor subjetivo del tiempo de los usuarios de una nueva carretera, surge este trabajo de tesis, que busca desarrollar un proceso para la estimación del valor subjetivo del tiempo, a partir del uso del modelo Logit. Por lo que, se desarrollaron cuatro capítulos, que ubican su importancia en el desarrollo de estudios de la estimación de la demanda de autopistas, su marco teórico, definición y formulación del modelo LOGIT, y un estudio de caso que pone en práctica la metodología que se ha propuesto en los 3 capítulos anteriores. De tal forma, que en cada capítulo se aborda lo siguiente.

En el capítulo 1, se describe la importancia que tiene el valor subjetivo del tiempo dentro del desarrollo de los estudios de estimación de la demanda de nuevas carreteras con cobro de cuota, esto a partir del creciente sector carretero sobre otros sectores en los últimos años. Y su ubicación dentro de la planeación del transporte, en específico dentro del modelo clásico de las 4 etapas.

En el capítulo 2, a partir de la dicotomía que presenta el usuario al seleccionar una vía de cuota sobre una vía libre, se desarrolla el marco teórico de los modelos de selección discreta. Se describen las variantes e implicaciones de los modelos Logit y Probit. Así, como la información que se requiere para el modelo, y que se recaba a partir de la aplicación de encuestas de preferencia declarada.

En el capítulo 3, se define los conceptos de utilidad a partir de los beneficios que proporciona cada alternativa de ruta al usuario, a partir de sus atributos, así como sus características socioeconómicas que son importantes en su selección. A partir de esto, se define el concepto del valor subjetivo del tiempo del usuario, y los diferentes atributos como tiempo y costo, que son importantes en la decisión del usuario. Con lo que, se construye y define el modelo Logit Binomial, así como se menciona la importancia que tiene la calibración del modelo, ya su objetivo es que

replique el comportamiento del usuario que mostro en campo, reflejo de la información recabada en campo.

En el capítulo 4, a partir de un estudio de caso, con información real de un proyecto de una nueva autopista. Se desarrolla y se analiza la información tomando como base lo visto en los capítulos anteriores, con la finalidad de estimar el valor subjetivo del tiempo, y a su vez la estimación de la demanda del proyecto.

A través de esta tesis, se mezcla de cierta forma la teoría de soporte de la planeación del transporte, y lo realizado dentro de la práctica, a partir de la experiencia de varias empresas particulares, institutos, y dependencias gubernamentales del sector transporte.

Contenido

1	Importancia de la estimación de la demanda en proyectos de carreteras de cuota	15
1.1	Introducción	15
1.2	Movilidad de carga y pasajeros en México	15
1.3	Desarrollo del sector carretero en México	17
1.4	Características del sistema carretero en México	19
1.5	Características socioeconómicas de México	25
1.6	Oferta y demanda de un proyecto de infraestructura carretera	29
1.7	Modelo de transporte	31
2	Modelos de selección discreta	42
2.1	Objetivo de la estimación de la demanda de transporte	42
2.2	Enfoque de las elecciones de los usuarios: Preferencias reveladas y declaradas	42
2.3	Encuestas de preferencia declarada	45
2.4	Enfoque de la elección discreta	49
2.5	El concepto de utilidad	51
2.6	Modelación de elecciones discretas: Enfoque determinístico y probabilístico	54
2.7	Modelos de selección discreta	57
3	Valor subjetivo del tiempo	69
3.1	Modelo Logit Binario	69
3.2	Parámetros del modelo Logit Binomial	71
3.3	Función de utilidad de un nuevo proyecto carretero	72
3.4	Tiempo del usuario	74
3.5	Costo del viaje	76
3.6	Valor subjetivo del tiempo	77
3.7	Calibración del modelo Logit Binomial	84
4	Estimación del valor subjetivo del tiempo: Caso de estudio	93
4.1	Descripción del estudio de caso	93
4.2	Zonificación del área de interés	97
4.3	Características operativas y físicas de la red vial actual y del proyecto	99
4.4	Demanda actual del área de interés	106
4.5	Análisis estadístico de las encuestas de preferencia declarada	120

4.6	Definición del modelo LOGIT BINARIO.....	130
4.7	Calibración del modelo LOGIT	135
4.8	Estadística del ajuste del modelo LOGIT	141
4.9	Segmentación de la demanda.....	142
4.10	Estimación de la demanda.....	143
5	Conclusiones	145
6	Bibliografía	148
7	Paginas webs	151

Índice de figuras

Figura 1 Movimiento de carga en México	16
Figura 2 Movimiento de pasajeros en México	16
Figura 3 Estado físico de las carreteras en México	18
Figura 4 Inversión en infraestructura carretera	19
Figura 5 Extensión en kilómetros por tipo de carretera	20
Figura 6 Superficie de rodamiento del sector carretero	21
Figura 7 Número de carriles de la red federal	22
Figura 8 Sistema carretero Nacional	23
Figura 9 Análisis de la oferta de un sistema de transporte	24
Figura 10 División regional de INEGI	26
Figura 11 PEA de las regiones socioeconómicas de México	27
Figura 12 Análisis de la demanda de un sistema de transporte	29
Figura 13 Zonificación e infraestructura vial componentes de un modelo de transporte ...	30
Figura 14 Estructura del análisis de la oferta y demanda para modelo de transporte de una carretera	31
Figura 15 Estructura para la estimación de la demanda de un proyecto carretero	32
Figura 16 Modelo de transporte de 4 etapas	33
Figura 17 Segmentación de los viajes	36
Figura 18 Matriz de distribución de viajes	37
Figura 19 Rutas alternas para realizar un viaje	38
Figura. 20 Componentes de la red vial del modelo de transporte carretero	39
Figura 21 Diseño de tarjeta para selección de ruta	47
Figura 22 Aplicación de la encuesta PD en campo	49
Figura 23 Modelo Logit (HL)	65
Figura 24 Curva S de probabilidades del modelo LOGIT	70
Figura 25 Desagregación del tiempo de viaje	74
Figura 26 Tiempo de punta a punta	75
Figura 27 Tiempo de punta a punta: comparación de alternativas	75
Figura 28 Características operativas de las alternativas	76
Figura 29 Ubicación de las poblaciones de San Blas y Tepic	94
Figura 30 Alternativas de rutas para realizar el viaje de San Blas - Tepic	95
Figura 31 Alternativas de rutas y proyecto para realizar el viaje de San Blas - Tepic	96
Figura 32 Zonificación del área de interés	98
Figura 33 Líneas de deseo de los principales viajes de los usuarios	98
Figura 34 Red vial del área de interés	100
Figura 35 Velocidades de operación de la red vial	101
Figura 36 Número de carriles de la red vial	102
Figura 37 Estado del pavimento del red vial	103

Figura 38 Tipo del terreno de la red vial	104
Figura 39 Características operativas de las alternativas de viaje de Tepic – San Blas ...	105
Figura 40 Ubicación de estaciones de aforo de la SCT	108
Figura 41 TDPA Histórico de las principales carreteras del área de interés	108
Figura 42 Ubicación de las estaciones para trabajos de campo	112
Figura 43 Principales motivos de viaje de la región en análisis.....	113
Figura 44 Rango de ingresos de los usuarios de la región.....	114
Figura 45 Viajes potenciales captados en cada estación.....	119
Figura 46 Tarjeta de diseño: Comparación de alternativas de rutas de viaje.....	121
Figura 47 Estratificación de la demanda de los usuarios de automóviles	130
Figura 48 Estratificación de la demanda de los usuarios de camiones	132
Figura 49 Ubicación de las vías cuota de la región	134
Figura 50 Base de datos codificada de la encuesta de preferencia declarada.....	136
Figura 51 Programación del modelo LOGIT BINARIO con software BIOGEME	137
Figura 52 Interface del software BIOGEME para cargar base de datos.....	138
Figura 53 Interface de los resultados arrojados por el software BIOGEME	138
Figura 54 Estimación del valor λ	141

Índice de tablas

Tabla 1 Diseño de arreglos de costos y tiempos de las alternativas de ruta.....	46
Tabla 2 Ejemplo de segmentación de la demanda para estimar su VST	81
Tabla 3 Ejemplo del VST para cada segmento de la demanda de un área de interés	85
Tabla 4 Rutas alternativas para realizar el viaje Tepic – San Blas.....	95
Tabla 5 Nivel de zonificación para proyecto autopista San Blas - Tepic	97
Tabla 6 Tipo de vialidades de la red vial del área de interés	99
Tabla 7 Características operativas de las rutas alternas y la autopista Tepic – San Blas	104
Tabla 8 Ahorros de tiempo de la autopista Tepic - San Blas con las diferentes alternativas.....	105
Tabla 9 Datos histórico del TDPA de la red vial del área de interes	107
Tabla 10 Tasas de crecimiento medio anual de la red vial del área de interés.....	109
Tabla 11 Composición vehicular de la red vial del área de interés	109
Tabla 12 Clasificación vehicular	110
Tabla 13 Encuestas de cada estación	111
Tabla 14 Motivo de viaje de los usuarios.....	112
Tabla 15 Motivo de viaje agregados de los usuarios.....	113
Tabla 16 Nivel del ingresos de los usuarios	114
Tabla 17 Frecuencia de viaje de los usuarios de automóvil.....	115
Tabla 18 Frecuencia de viaje agrupadas de los usuarios de automóvil	115
Tabla 19 Frecuencia de viaje de los usuarios de camiones.....	116
Tabla 20 Tipo de carga transportada por camiones unitarios de cada estación.....	117
Tabla 21 Tipo de carga transportada por camiones articulados de cada estación.....	117
Tabla 22 Viajes potenciales por periodo y por tipo de vehículo de cada estación.....	118
Tabla 23 Viajes potenciales totales por tipo de vehículo de cada estación.....	119
Tabla 24 Tipo de información que se preguntó a los usuarios de automóviles con la encuesta de preferencia declarada	120
Tabla 25 Tipo de información que se preguntó a los usuarios de camiones con la encuesta de preferencia declarada	120
Tabla 26 Número de encuestas PD recabadas por periodo y por estación	122
Tabla 27 Número total de registros de la EPD a partir del número de respuesta de cada usuario.....	122
Tabla 28 Motivo de viaje por periodo y estación de los usuarios de automóviles (EPD).	123
Tabla 29 Motivo de viaje agregados por periodo y estación de los usuarios de automóviles (EPD).....	123
Tabla 30 Nivel de ingresos por periodo y estación de los usuarios de automóviles (EPD)	124
Tabla 31 Frecuencia de viaje por periodo y estación de los usuarios de automóviles (EPD).....	125

Tabla 32 Frecuencia de viaje agrupados por periodo y estación de los usuarios de automóviles (EPD).....	125
Tabla 33 Frecuencia de viaje agrupados por periodo y estación de los usuarios de camiones unitarios (EPD).....	126
Tabla 34 Frecuencia de viaje agrupados por periodo y estación de los usuarios de camiones articulados (EPD).....	126
Tabla 35 Resultados de las selecciones realizadas por los usuarios de automóvil (EPD)	127
Tabla 36 Resultados de las selecciones realizadas por los usuarios de camiones unitarios (EPD).....	128
Tabla 37 Resultados de las selecciones realizadas por los usuarios de camiones articulados (EPD).....	129
Tabla 38 Claves para la codificación de las variables de la encuesta de preferencia declarada	136
Tabla 39 Valor subjetivo del tiempo de los usuarios de automóviles.....	139
Tabla 40 Valor subjetivo del tiempo de los usuarios de camiones.....	139
Tabla 41 Valores del parámetro de dispersión λ	140
Tabla 42 Índices estadísticos de ajuste del modelo LOGIT	142
Tabla 43 Segmentación de la demanda del proyecto autopista Tepic – San Blas.....	143
Tabla 44 Volumen captado por la nueva autopista Tepic - San Blas en su año base	143
Tabla 45 Porcentaje de captación de la autopista Villa Unión vs federal libre	144

1 Importancia de la estimación de la demanda en proyectos de carreteras de cuota

1.1 Introducción

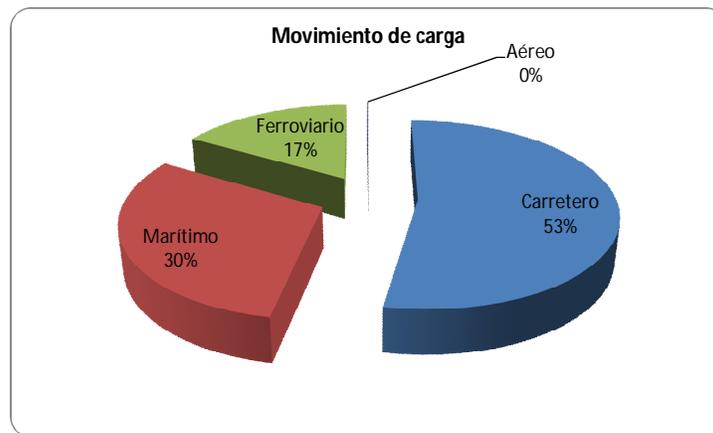
El principal objetivo de la infraestructura carretera de un país es, integrar las distintas regiones que lo conforman, para mejorar la conectividad de manera segura, reducir costos de operación, y contribuir al crecimiento socioeconómico de la población. La rehabilitación, construcción y operación de una carretera, requiere de grandes inversiones, por lo que se han creado esquemas financieros donde se incluye al sector público y privado. De tal forma, que todo proyecto de infraestructura carretera requiere de la certidumbre exigida por entidades crediticias, calificadoras, y gubernamentales, para el financiamiento de su implementación, la cual conlleva a realizar estudios de oferta y demanda de transporte, con el sustento teórico y técnico necesario para tener la certidumbre exigida por dichas entidades, a través de la aplicación de metodologías y técnicas de planeación del transporte, con el objetivo de reducir errores en el pronóstico de la demanda.

1.2 Movilidad de carga y pasajeros en México

Para resolver la falta de infraestructura de transporte que facilite la movilidad de carga y pasajeros a nivel urbano, suburbano y regional es indispensable dar una solución integral. Dicha solución, debe involucrar los diferentes modos de transporte, con una capacidad suficiente para dar un nivel de servicio adecuado a la creciente población, generado de las diversas actividades socioeconómicas. Por lo que, integrar un análisis del comportamiento de la movilidad de carga y pasajeros en los diferentes modos de transporte, dará un mejor pronóstico de la estimación de la demanda de un proyecto de transporte dentro de una región.

En México, la mayor movilidad de carga y pasajeros se realiza sobre la red carretera nacional, por las carreteras se desplaza el 53% de la carga nacional y el 98% de los pasajeros. Por autotransporte se movilizan cerca de 479 millones de toneladas y 3,170 millones de pasajeros cada año. La siguiente tabla muestra la movilidad de carga en México por modo.

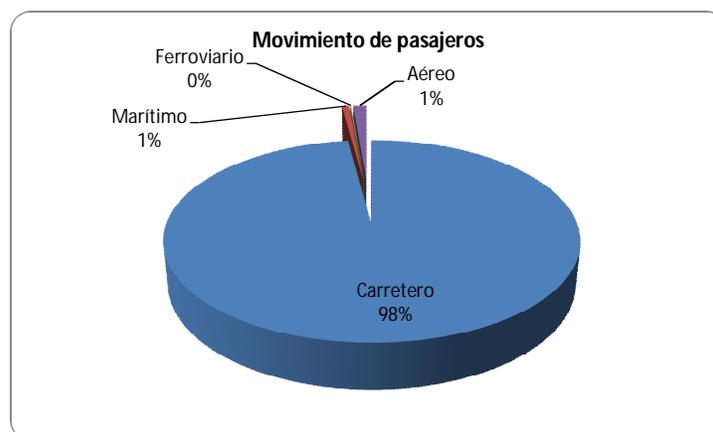
Figura 1 Movimiento de carga en México



Fuente: Elaboración propia con información de la SCT del año 2009

Como se puede observar, la movilidad de carga en avión es muy pequeña, es de 0.1%, contrastando con el 83% que suman por carretera y ferrocarril. Estos valores difieren de la movilidad de pasajeros, ya que las personas realizan sus viajes mayormente por carretera, ya sea por transporte público o privado. La siguiente figura muestra la movilidad de pasajeros por modo de transporte.

Figura 2 Movimiento de pasajeros en México



Fuente: Elaboración propia con información de la SCT del año 2009

Analizar la movilidad de todo el país, no es parámetro para diferir que puede ser reflejo de una región, por lo que integrar análisis de movilidad de carga y pasajeros en la estimación de la demanda de un proyecto de infraestructura de transporte incrementara la certidumbre del pronóstico.

1.3 Desarrollo del sector carretero en México

La información estadística apunta que el sector carretero en México se considera como la columna vertebral de transporte, ya que la mayoría de los desplazamientos de carga y pasajeros se realizan por carretera. Sin embargo, no significa que no se realice inversión en otros sectores de transporte, pero 75% de la inversión en infraestructura son para desarrollo de las carreteras¹.

En la actualidad, los países en el mundo están dando alta prioridad a la modernización de su infraestructura, que les permita lograr una mayor participación en la economía global. En 2007 México se ubicaba en el lugar 49 con respecto a su competitividad de infraestructura carretera² de acuerdo con el Foro Económico Mundial, para 2012 se ubica en el lugar 55³ de 142 países, dentro del reporte de competitividad global 2011-2012.

Dentro del crecimiento nacional, lo que se estableció en el Programa Nacional de Infraestructura 2007-2012, para el año 2011 solo se había cumplido un avance físico de 41.6 % de infraestructura en el sector carretero, de acuerdo al Centro de Estudios de las Finanzas Públicas (CEFP)⁴, por lo que el sector tendería a rezagarse, aun cuando se habrían aumentado el número de concesiones de carretas urbanas y suburbanas de cuota⁵. Sin embargo, no ha sido suficiente para mejorar la conectividad entre las regiones del país, para contribuir al crecimiento económico y social, pues de acuerdo con información de la Secretaría de Comunicación y Transporte (SCT), del total de 18 mil 274 km. construidos o modernizados de carreteras durante el sexenio (2006-2012), sólo 5 mil 654 km. corresponden a corredores troncales, carreteras fuera de corredores y obras complementarias, esto es el 30.9 por ciento, mientras que el restante 69.1 por ciento corresponde a caminos rurales y carreteras alimentadoras, infiriendo que no se están construyendo o modernizando, sino que la mayoría de los casos sólo consisten en mantenimiento de las mismas, implicando con esto, que no se desarrollen y elaboren proyectos de ingeniería de nueva infraestructura carretera, lo que también impacta en la realización de estudios de demanda de tránsito.

En 2010, la red carretera libre de peaje reporto el 19.5 por ciento de las carreteras en estado físico deficiente, de las estatales el 20.5% y rurales 26.6% también en estado deficiente, por lo que en el país no se ha podido cumplir con el estándar internacional de calidad, que ha establecido el Banco Mundial, el cuál establece

¹ Principales Estadísticas del Sector Comunicaciones y Transporte 2009, SCT.

² Programa Nacional de Infraestructura 2007-2012

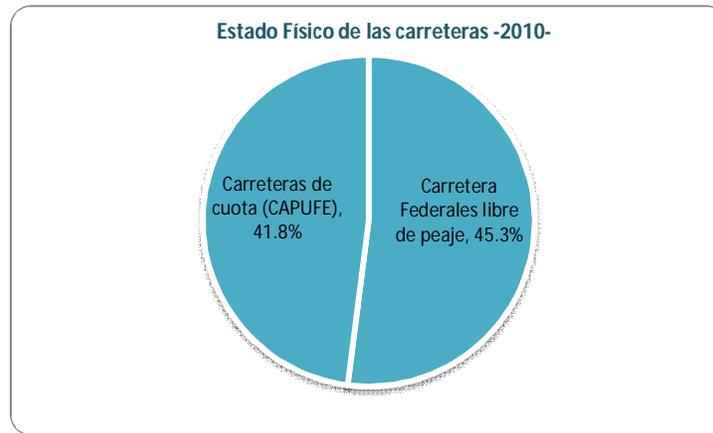
³ The Global Competitiveness Report 2011-2012, World Economic Forum, pag.259

⁴ Nota informativa, notacefp /042/2012

⁵ Manual de modelación de demanda para carreteras de cuota, Transconsult, Steer Davies Gleave & SCT, 2006

que los países deben mantener 50 por ciento de sus carreteras en buenas condiciones y 50 por ciento en aceptables⁶. En la siguiente figura se muestra el porcentaje de carreteras que se encuentran en buen estado físico.

Figura 3 Estado físico de las carreteras en México



Fuente: Elaboración propia con información de la Auditoría Superior de la Federación (ASF)

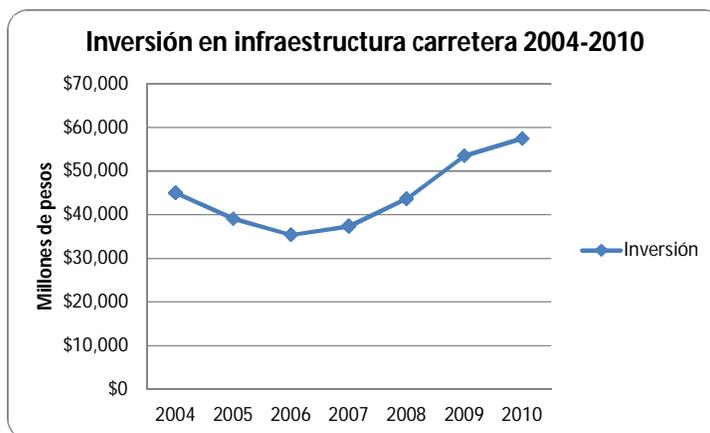
Tanto carreteras de cuota y libre, no cumplen con 50% en buenas condiciones. Y las federales libres tienen 35.2% de su estado físico aceptable.

Parte importante del rezago del desarrollo de la infraestructura carretera es la falta de consolidación de los procesos de planeación y programación de inversiones. Por lo que, para mantener objetivos y metas que contribuyan al desarrollo en la infraestructura de carreteras, se formalizó el Programa Nacional de Infraestructura 2007-2012. Con lo que se espera que la inversión siga creciendo, ya que en los últimos años ha ido en aumento, esto de acuerdo a la SCT⁷, la siguiente figura muestra la inversión a la infraestructura carretera.

⁶ Informe del Resultado de la Fiscalización Superior de la Cuenta Pública 2010, Pag. 112.

⁷ Estadística de Bolsillo 2011, Secretaría de Comunicación y Transportes.

Figura 4 Inversión en infraestructura carretera



Fuente: Elaboración propia con información de la Estadística de Bolsillo 2011, de la SCT

Sin embargo, para que México tenga una mayor participación en la economía global, es necesario elevar la cobertura, calidad y competitividad de su infraestructura, dada su ventaja competitiva geográfica y tratados internacionales⁸. Y de igual forma, es importante que cuenten con el sustento teórico y técnico necesario para generar la certidumbre exigida por entidades relacionadas, de manera directa o indirecta, con el financiamiento de su implementación, aportando una mejora en los estudios de oferta y demanda de transporte, haciéndolos más sustentados.

1.4 Características del sistema carretero en México

Los diferentes tipos de carreteras y sus características afectan la estructura de la planeación de los estudios de oferta y demanda. Independientemente de su tipo y características, su objetivo principal de las carreteras es facilitar la movilidad de pasajeros y carga de manera segura con beneficios a los usuarios. Sin embargo, la diferencia de una carretera sobre otra, radica en el tipo de problema de transporte de una región, es cierto, el problema puede ser el mismo, pero las condiciones ambientales, geográficas y socioeconómicas puede hacer más complejo un problema sobre otro, por lo que hace dispensable conocer los tipos y características para ampliar el análisis de la oferta. Con lo que se espera, generar mayores parámetros de comparación entre las carreteras del sistema vial de un proyecto que implique la estimación de la demanda.

⁸ El Sector Carretero 2009, SCT, Red Nacional de Carreteras.

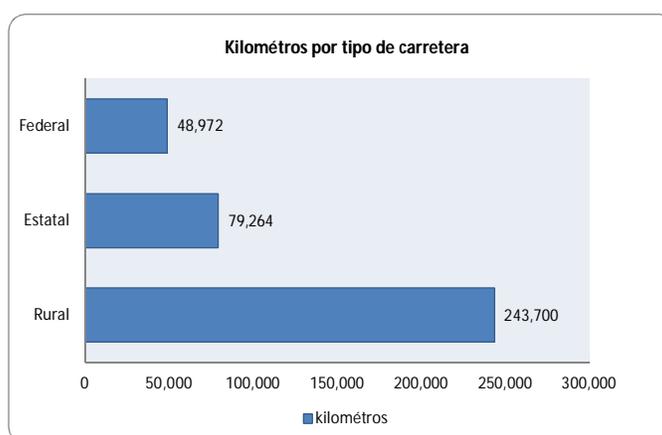
México cuenta con un importante sistema vial que se clasifica de la siguiente manera:

- Red federal
- Red alimentadora y
- Red rural

Características físicas del sistema carretero

La red carretera nacional tiene una extensión de 371,396 kilómetros, compuestos en su mayoría por caminos rurales con el 66%, 21% estatal y 13% federal. En la siguiente tabla se muestra la composición por kilómetros del sistema carretero, con datos del INEGI⁹.

Figura 5 Extensión en kilómetros por tipo de carretera



Fuente: Elaboración propia con información de INEGI 2011

La red federal está compuesta por las carreteras de cuota y libre, 17% y 83% respectivamente. Toda la red se encuentra pavimentada, y dentro de un estudio de oferta y demanda, son las vías de competencia directa contra una nueva carretera, ya que presentan mejores condiciones físicas y de operación sobre carreteras rurales y estatales de una región.

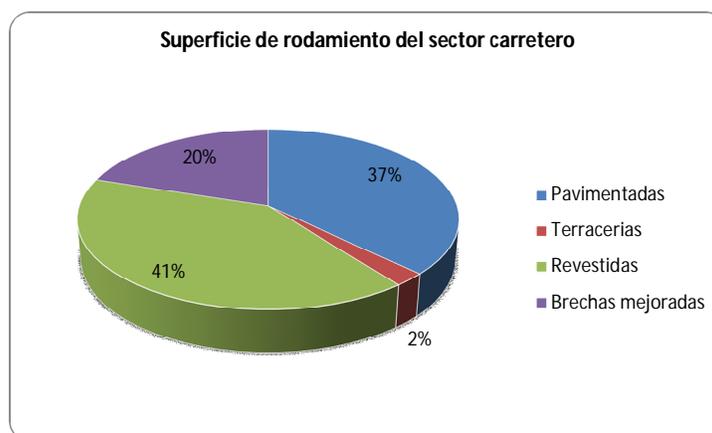
La red alimentadora está compuesta por carreteras estatales, de las cuales 93% se encuentran pavimentadas, 1% son de terracería y 7% son revestidas. Son de importancia para la conexión entre municipios y localidades con las principales zonas urbanas.

⁹ Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos 2011, INEGI.

Y la red rural, 7% esta pavimentada, 3% revestida, 31% son terracerías y 31% son brechas mejoradas. Sirven de conexión entre localidades, donde el número de habitantes es pequeño (2,500 habitantes¹⁰), y para dar accesibilidad a carreteras estatales y federales.

La superficie de rodamiento del sistema carretero del país, se encuentra 37% pavimentado, 35% pertenece a la red federal, 53% red estatal y 12% a la red rural. La siguiente figura muestra el porcentaje de superficie de rodamiento del sector carretero.

Figura 6 Superficie de rodamiento del sector carretero



Fuente: Elaboración propia con información de INEGI 2011

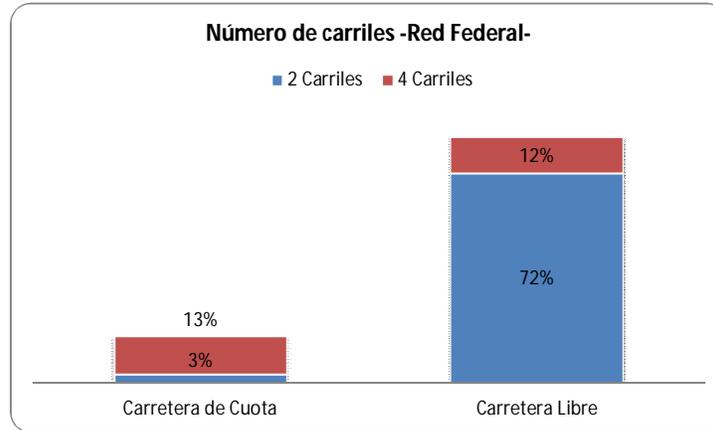
El 41 % de las carreteras son revestidas, y se pueden contar como no pavimentadas, a pesar de que dan servicio cualquier época del año, y las brechas mejoradas son caminos con escaso trabajo técnico. Lo que resulta, que 63% de los caminos se puedan encontrar en no buenas condiciones de prestar un buen servicio. Sin embargo, refuerzan la comunicación regional y enlazan zonas de producción agrícola y ganadera; así mismo, aseguran la integración en áreas. Y dentro de los estudios, en ocasiones no se considera esa aportación, lo que no permite tener los extremos del análisis de la oferta.

Otra característica del sistema carretero, son el número de carriles con los que opera. La mayoría son carreteras de 2 carriles, considerando que 87% son rurales y estatales. Las federales, está compuesta por carreteras de 2 y 4 carriles. La

¹⁰ Cuéntame, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

siguiente figura muestra la proporción del número de carriles de las carreteras federales, considerando su pago de peaje, información del IMT¹¹.

Figura 7 Número de carriles de la red federal



Fuente: Elaboración propia con información IMT

El 75% de las carreteras federales son de 2 carriles, y del 25% de 4 carriles, 83% son de las carreteras de cuota, y 17% de las carreteras libre de cuota. El 94% de la red carretera de cuota se encuentra dentro de la red de los Corredores Troncales Nacionales, la siguiente figura muestra los principales corredores del Sistema Carretero Nacional.

¹¹ Definición de Indicadores de Seguridad Vial en la Red Carretera Federal, Instituto Mexicano del Transporte (IMT), 2011.

Figura 8 Sistema carretero Nacional



Fuente: El sector carretero en México, SCT 2009

El 51% de las carreteras de cuota se encuentra dentro de los Corredores Troncales Nacionales, y la mayoría del sistema son carreteras de 4 carriles, ya que 63% de las carreteras son de cuota.

Características operativas del sistema carretero

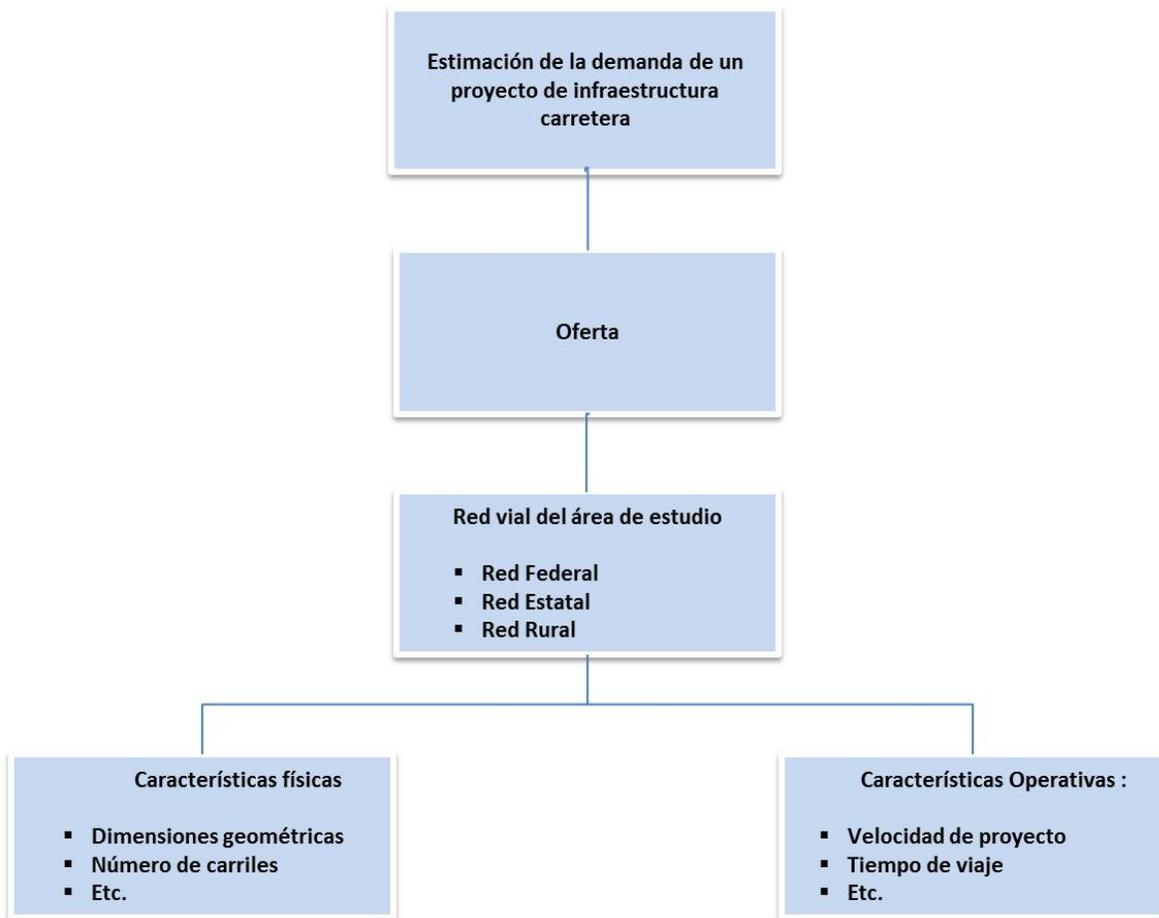
La velocidad es una variable dentro de los estudios de oferta y demanda que ayuda a la estimación de los beneficios que proporciona una carretera a las personas de una región. De tal forma, que contribuye a su movilidad y accesibilidad a otras regiones para crecimiento del desarrollo socioeconómico, al disminuir los tiempos de viaje de una región a otra.

La estimación de la velocidad con la que actualmente circula un vehículo por una carretera, se recolecta en campo o documental, con el objetivo de conocer la calidad del servicio que presta o sus variaciones a lo largo de la vía. La velocidad y tiempo de viaje, los usuarios la perciben directamente, y puede ser evaluada en términos monetarios.

La Secretaria de Comunicación y Transporte asigna la velocidad de proyecto de acuerdo al tipo de carretera, que se define de acuerdo al Tránsito Promedio Diario Anual (TDPA), y por las condiciones topográficas donde se ubica la carretera.

El análisis de la oferta de un sistema de transporte, consiste en obtener las características físicas y operativas de la red vial, es decir, describir la red que satisface las necesidades de movimientos de los viajeros de una región, o área de estudio. La red de transporte representa la oferta del sistema de transporte dentro de un estudio de estimación de la demanda en un proyecto de infraestructura carretera. Por lo tanto, se deben de incluir todas las carreteras o autopistas con las cuales se pretende competir. La siguiente figura muestra la composición de la oferta de un sistema de transporte.

Figura 9 Análisis de la oferta de un sistema de transporte



Fuente: Elaboración propia

1.5 Características socioeconómicas de México

En un estudio de la estimación de la demanda de un proyecto de infraestructura carretera debe contener una clara descripción de las características físicas y operativas de circulación, y una comparación con las carreteras alternativas (red vial de influencia). Y a su vez, debe describir la economía de la región o área de influencia del proyecto carretero, a través de las características socioeconómicas de los usuarios, ya que serán en medida, usuarios de la nueva carretera, con lo que se genera una redistribución de la demanda sobre la red vial de interés.

La distribución de la población y de las actividades económicas dentro de un área geográfica, es importante para estructurar la demanda sobre la red vial de una región. Ya que, los usuarios por circular por una carretera específica, obtienen beneficios cuantitativos y cualitativos sobre otras, siendo los más relevantes el tiempo y costo del viaje. A partir de estas variables, y otras que se generan del viaje, se puede realizar la comparación y estimación del uso de una carretera sobre otra. Generando, una relación entre la población, la actividad económica y las redes de transporte.

La información de las características socioeconómicas de una población de una región, a la que servirá una nueva carretera, deberá describir e identificar las principales fuentes de trabajo y producción, ubicación de residencias, centros educativos, comerciales y recreativos de la región, en función del sistema de transporte actual, y apoyada en estadísticas del desarrollo del volumen vehicular. Cabe señalar, que hay actividades más predominantes dentro de una región, pero lo común será encontrar una combinación de actividades socioeconómicas

Para definir y segmentar una región, se requiere de información de las características socioeconómicas de la población, y estas pueden ser algunas de las siguientes:

- Población.
- Empleo.
- Ingresos.
- Población Económicamente Activa (PEA).
- Número de habitantes en una vivienda.
- Parque vehicular.
- Etc.

Estas variables pueden cambiar dependiendo de la disponibilidad de la información que se tenga de la región. En México, la información se obtiene de una fuente oficial como el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI)¹². La información se presenta en diferentes niveles, Estatal, Municipal, y AGEBS (Área Geoestadística Básica). Es importante señalar que, el estudio de la estimación de oferta y demanda de un proyecto de infraestructura requiere de manejar un nivel, el cual se llama zonificación¹³. La cuál consiste en dividir la región de estudio de acuerdo a la accesibilidad de la red vial a los diferentes orígenes y destinos de los viajes, y a las características socioeconómicas de los mismos.

La división regional mostrada por INEGI, se realizó con la finalidad de que las zonas sean homogéneas de acuerdo a un conjunto de variables relacionadas con el bienestar observado¹⁴. Se crearon 7 regiones, con el objetivo de que sea útil para muestreos. La siguiente imagen muestra la estratificación por región de la población de México.

Figura 10 División regional de INEGI



Fuente: Elaboración propia con información de INEGI

La mayor concentración de la población es la región 4, que son los estados de Colima, Estado de México, Morelos, Nayarit, Querétaro de Arteaga, Quintana Roo,

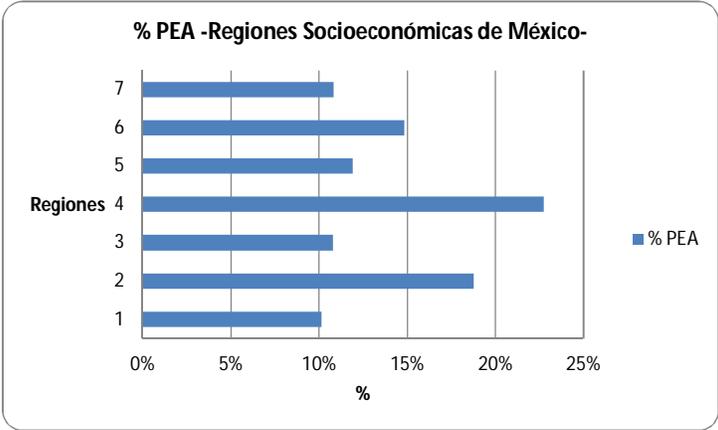
¹² INEGI, www.inegi.org.mx

¹³ El concepto de zonificación se aborda más en el punto de Modelo de Transporte

¹⁴ INEGI, Guía del sistema de regiones de México, <http://sc.inegi.gob.mx/niveles/manualnb.htm>.

Sinaloa y Yucatán, de igual forma se puede realizar una división regional para otras variables que defina las características socioeconómicas de una región, que incida en la generación de viajes por carreteras. Como por ejemplo, la población económicamente activa (PEA) entre 20 y 49 años de las 7 regiones, esto se muestra en la siguiente figura.

Figura 11 PEA de las regiones socioeconómicas de México



Fuente: Elaboración propia con información de INEGI

La región con mayor número de población económicamente activa es la 4, con 23% de la población en México. Como se puede observar tiene relación que la población y PEA coincide con la región, por lo que agregar estados, municipios y/o localidades con ciertas características socioeconómicas sirve para optimizar la identificación, búsqueda y acotamiento de poblaciones que inducen en sectores de interés, como puede ser la infraestructura de transporte.

Sin embargo, en ocasiones esta agrupación no pudiera ser la óptima para el estudio de la estimación de la demanda de un proyecto carretero, por condiciones geográficas. Por lo que, se genera una agrupación de estados, municipios y localidades que considere su conectividad y variables socioeconómicas del área de interés. Recayendo en recabar información más específica que la proporcionada a nivel regional.

La información requerida para un estudio de proyecto carretero, además de obtenerse de fuentes oficiales, se recolecta de campo a través de encuestas y/o aforos vehiculares dentro de la zona de estudio. Debido a que entidades financieras y calificadoras de riesgo, prefieren que se realicen observaciones directas de la demanda actual sobre la red vial o área de interés. Y una forma de realizar las observaciones, es aplicando encuestas a los usuarios del sistema vial actual, que describa su perfil socioeconómico.

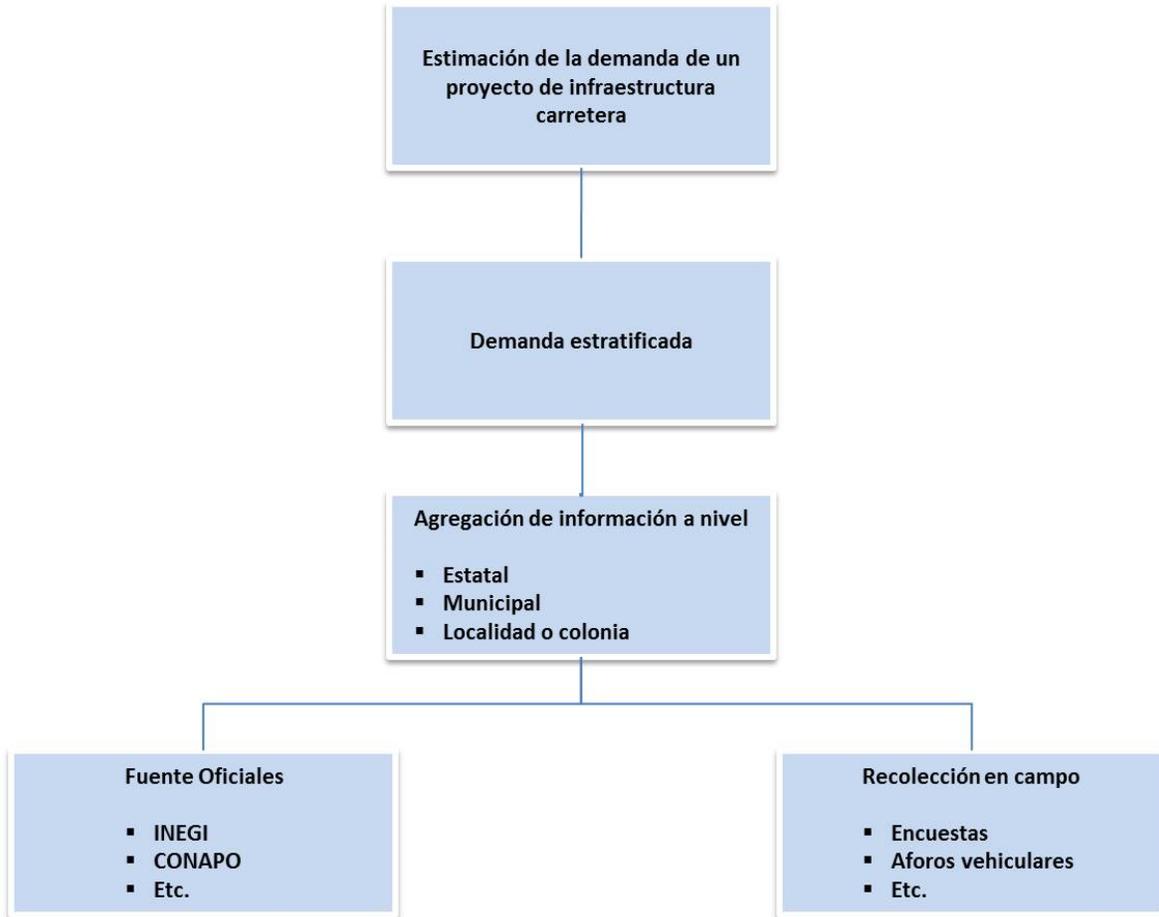
Los datos socioeconómicos que se recaba en campo a través de una encuesta origen – destino puede ser la siguiente:

▪ Origen del viaje.
▪ Destino del viaje.
▪ Tipo de vehículo.
▪ Hora de viaje.
▪ Tiempo de viaje.
▪ Nivel de ingresos.
▪ Frecuencia de viaje.
▪ Motivo de viaje.
▪ Tipo de carga.
▪ Pago de cuota.
▪ Etc.

La información puede cambiar de acuerdo a las necesidades requeridas por el proyecto. En ocasiones, se requiere de obtener información con mayor precisión por parte del usuario, debido a que se requiere evaluar y/o estimar un factor o variable importante dentro de la estimación de la demanda. Como por ejemplo, en tema de seguridad pública, una pregunta que requiere tener una ponderación por parte del usuario, sería: ¿Por la vía que circula actualmente la considera segura?

La generación y atracción de viajes por carreteras son diferidas de las actividades socioeconómicas de las personas. A partir de estas actividades, se define una estratificación de la demanda, de las diferentes zonas producto de la división del área de interés de un estudio de oferta y demanda de un proyecto carretero. La siguiente figura ejemplifica lo anterior.

Figura 12 Análisis de la demanda de un sistema de transporte



Fuente: Elaboración propia

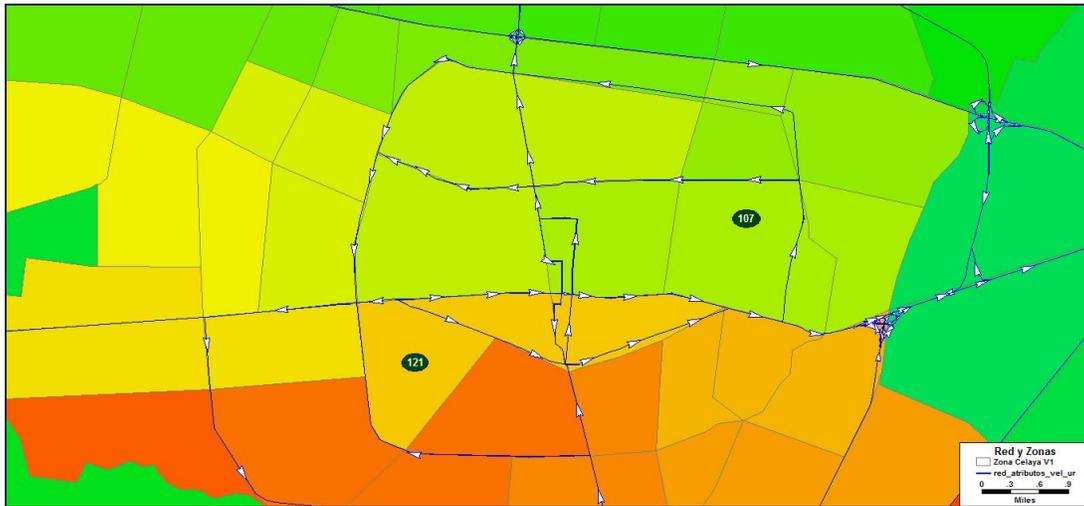
1.6 Oferta y demanda de un proyecto de infraestructura carretera

La planeación de un proyecto carretero tiene una referencia espacial, un área de influencia que contiene los dos elementos básicos: la oferta, que es la red vial con todas sus características físicas y operativas, y la demanda, definida por sus características socioeconómicas que hacen uso de la infraestructura.

Toda la información de la oferta y demanda se encuentran dentro de un área delimitada, llamada zonificación del proyecto¹⁵. Además de estos dos componentes, se incluye la organización político-administrativa del territorio. La siguiente figura muestra la zonificación e infraestructura vial de una región dividida en varias zonas.

¹⁵ Desarrollo de una metodología para la elaboración de estudios de demanda y asignación de tránsito en proyectos de infraestructura carretera, Cal y Mayor y Secretaría de Comunicación y Transportes, Noviembre 2004.

Figura 13 Zonificación e infraestructura vial componentes de un modelo de transporte

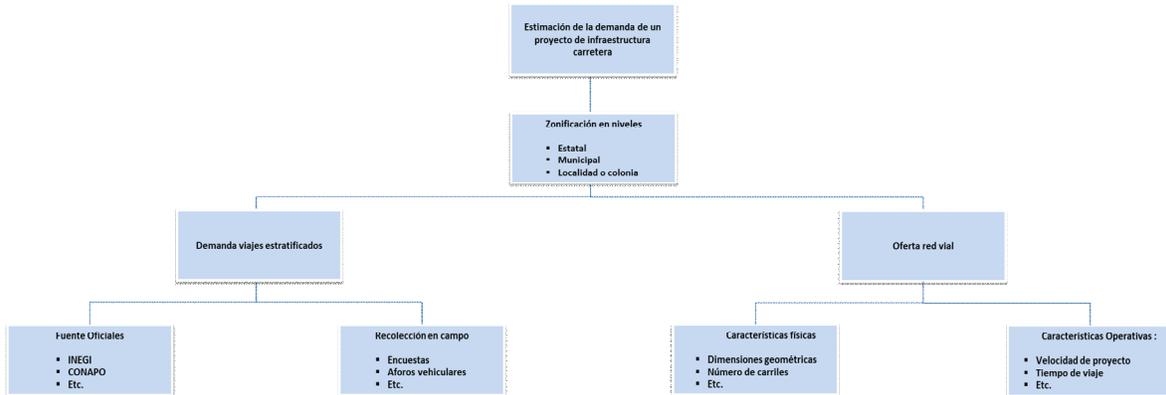


Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, una región (Estado, Municipio y/o Localidad) se dividió en zonas que agrega personas, hogares, empleos u otras variables, que generan un determinado número de viajes a partir de sus actividades económicas, y para desplazarse a otra zona de la región, lo realizan a través de la red vial del área de influencia que está definida por sus características físicas y operativas de tránsito.

En el desarrollo de un estudio de un proyecto carretero está integrado por un análisis de la oferta y demanda del área de interés o influencia. Por lo tanto, la red vial en análisis, representa la oferta, sus atributos, características físicas y operativas, mediante el cual el usuario del sistema vial viaja de un origen a un destino. Y los viajes generados de las zonas que definen el área de influencia, realizados por usuarios definidos por sus características socioeconómicas, se denomina la demanda. La siguiente figura muestra el proceso para la estimación de la demanda de un proyecto de carretero.

Figura 14 Estructura del análisis de la oferta y demanda para modelo de transporte de una carretera



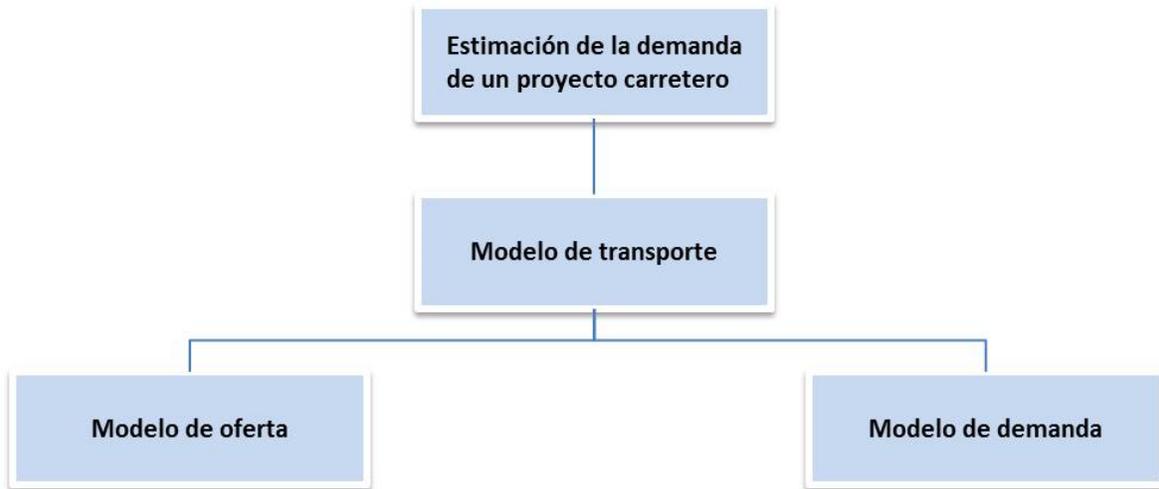
Fuente: Elaboración propia

Este proceso forma parte de una etapa de la solución al problema de estimar y asignar la demanda para proyectos de nueva infraestructura carretera. Define la información documental y campo, que se requiere para realizar la modelación de flujos vehiculares que actualmente circulan por la red actual, y estimar la demanda del nuevo proyecto carretero. La confianza de los resultados de la demanda de un proyecto carretero, reside en realizar una adecuada modelación del comportamiento actual y futuro de los viajeros, por lo que hace necesario plantear el modelo de transporte adecuado.

1.7 Modelo de transporte

La demanda y oferta son los modelos básicos que integran al modelo de transporte. Por un lado, la demanda de viajes dependerá del ingreso del viajero, y tomara la decisión de usar una carretera sobre otras del sistema vial, y por otro, la oferta ofrecerá un servicio que maximice los beneficios de los usuarios. De tal forma, que el modelo de transporte intenta integrar oferta y demanda, para replicar las decisiones que los viajeros toman para realizar su viaje de un origen a un destino de forma de tener equilibrio entre ambos modelos. De lo anterior, se deduce que la función de demanda de transporte expresa la cantidad de viajes demandados durante un determinado periodo en términos de un conjunto de variables explicativas, como son el costo y tiempo de viaje realizado por cierta carretera. La siguiente imagen muestra la relación de la oferta y demanda con el modelo de transporte.

Figura 15 Estructura para la estimación de la demanda de un proyecto carretero



Fuente: Elaboración propia

Los estudios realizados para la estimación y asignación de la demanda de proyectos carreteros, ha partido del modelo de los cuatro pasos, donde ha variado debido al desarrollo de herramientas computacionales, y/o al uso de metodologías como complemento al modelo clásico de transporte.

En algunos casos, existen sus variantes a no aplicar tal cual el modelo clásico de los 4 pasos, debido a que es una herramienta estratégicamente gruesa que no distingue que es importante y qué no lo es, y su implementación total es sumamente cara en tiempo, recursos y recolección de información y encuestas, y es un modelo de gran tamaño aparece a menudo como una “caja negra” que da poca confianza¹⁶. Sin embargo, en estos casos y en otros, de todas formas se toma de base el modelo clásico de transporte de los 4 pasos, y se realizan las variantes del modelo de transporte que se requiera para cada estudio de caso diferente. Ya que en ocasiones, lo que varía son diferentes herramientas computacionales, y metodologías de recolección de datos o ajuste de la calibración del modelo, etc.

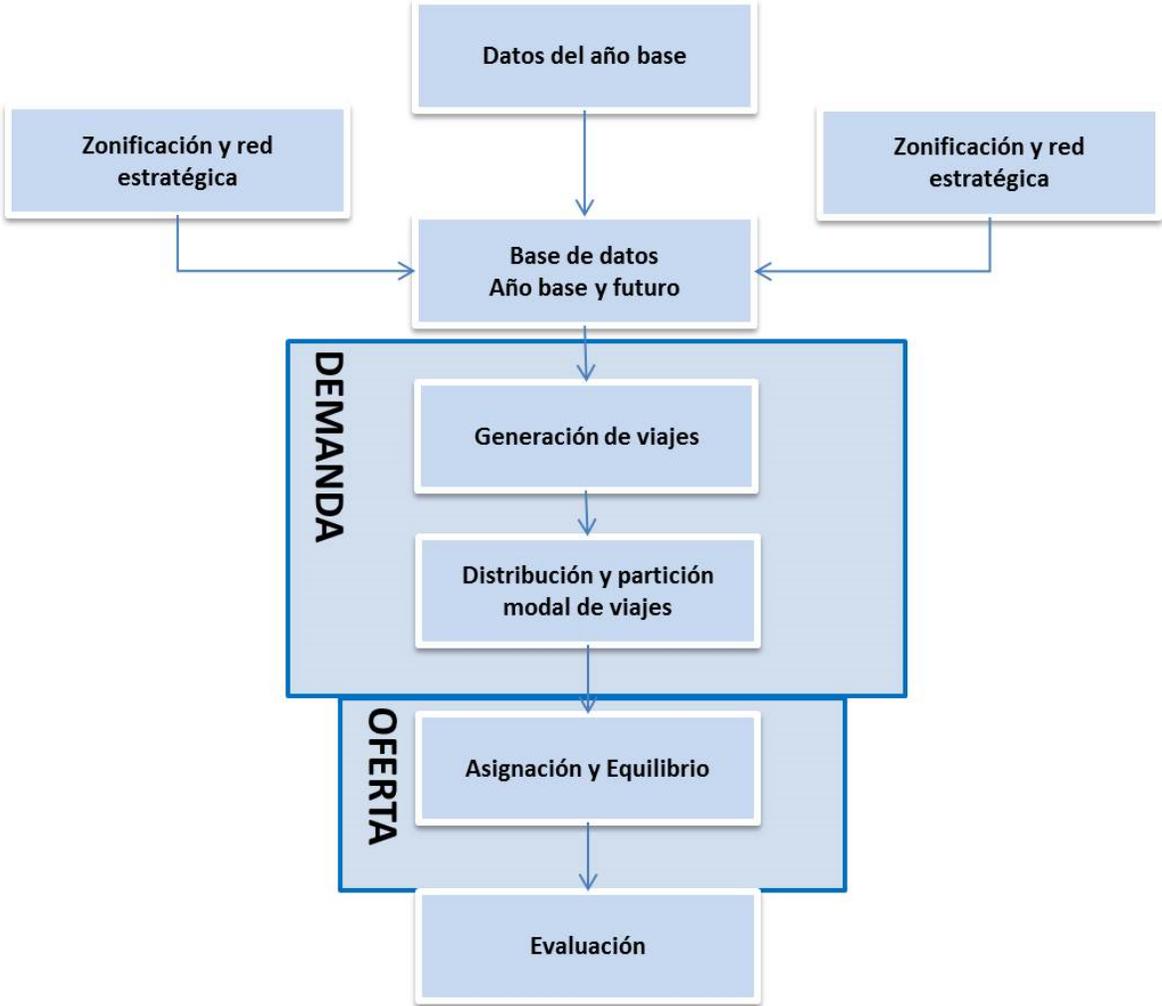
El modelo de planeación de transporte que replique el comportamiento actual y futuro de un usuario ante una nueva alternativa de infraestructura carretera se puede hacer con los modelos de las 4 fases o pasos, esto es, los modelos de generación, distribución, partición modal y asignación¹⁷, con el fin de garantizar

¹⁶ Modelación de demanda para carreteras de cuota, Manual de modelación, Steer Davies Gleave y Transconsult, 2006.

¹⁷ Modelos de demanda de transporte, pag. 93 a 96, Juan de Dios Ortuzar S. Ediciones Universidad Católica de Chile, 1994.

una solución única al complejo problema de equilibrio entre oferta y demanda. La estructura del modelo se ha mantenido aparentemente inalterada, esto se muestra en la siguiente figura.

Figura 16 Modelo de transporte de 4 etapas



Fuente: Elaboración propia con información de Modelos de demanda de transporte, Ortuzar

Muchas de las similitudes de abordar el problema de transporte actualmente por el sector privado, parte de resolverlo con la estructura del modelo clásico, ya que, considera una red multimodal de transporte, una zonificación apropiada del área de estudio, y la recolección y codificación de datos tanto para la calibración y validación de los modelos como para su uso en modalidad predictiva.

Para modelar la generación de viajes se utiliza información socio-económica de cada zona definida a partir del área de estudio, aplicando algoritmos como

regresión lineal múltiple o mixtas, o también se puede obtener los viajes a partir de encuestas origen – destino (EOD). La distribución de los viajes generados por cada zona a sus posibles zonas de destino, tiene por objetivo de generar matrices de viajes, con diferentes motivos de viaje, diferentes periodos de tiempo y diferentes características socioeconómicas de los usuarios, se emplean modelos como el modelo gravitacional, pero también se puede obtener la distribución a partir de encuestas origen – destino. La selección modal, es el modelo con mayor avance en los últimos años, ya que para la estimación se ha hecho uso de técnicas de elección discreta conducentes a los populares modelos desagregados de demanda. Y el modelo de asignación se encarga de distribuir los viajes por cada elemento de la infraestructura vial dentro del área de estudio, considerando el principio de Wardrop¹⁸, que se le conoce como equilibrio de usuario.

Los modelos de generación, distribución y selección modal, componen la parte de la modelación de la demanda, y culminan con una predicción del número de viajes entre cada par de zonas por cada carretera o vía disponible, dados los costos de viaje. Esto es muy importante, ya que, conseguir una consistencia interna entre flujos y costos de transporte (cuota, en el caso de nueva infraestructura carretera), en todas las etapas del modelo, es uno de los problemas que tiene el enfoque clásico. Y El modelo de asignación de viajes considera los aspectos de la oferta. El supuesto que sustenta la división del viaje en esas cuatro etapas consiste en considerar que existen cuatro decisiones, que pueden ser simuladas independientemente mediante modelos secuenciales. Sin embargo, no siempre se sigue la secuencia que se mencionó, ya que existen diferentes formas de ubicación del modelo de selección modal dentro de la anterior secuencia. Además, realizar la secuencia u orden de los modelos, no tiene garantía de converger, es decir, no se logre obtener un resultado único y consistente de la modelación¹⁹.

Generación de viajes

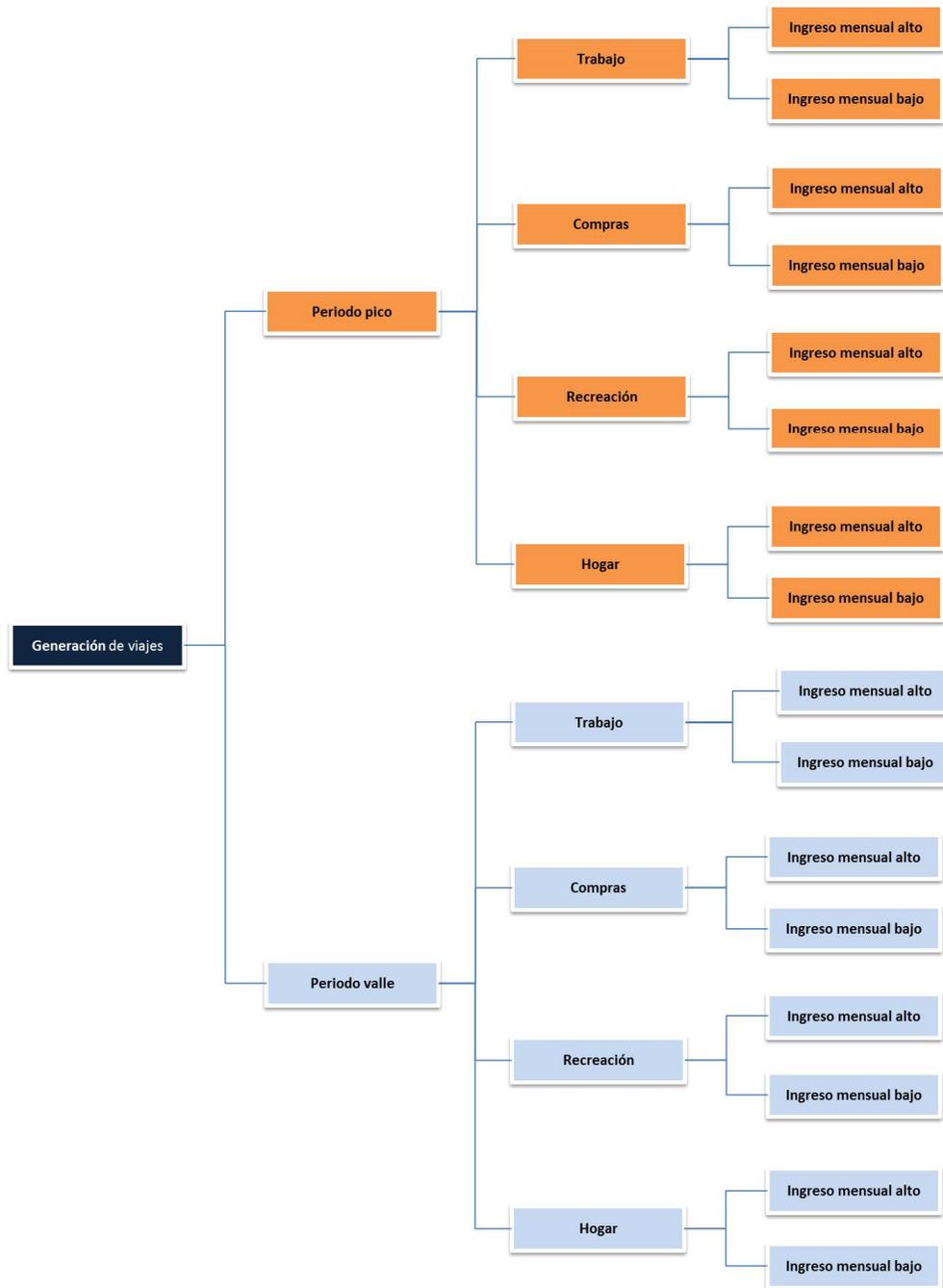
El objetivo del modelo, es replicar el comportamiento de los usuarios en relación a la decisión de realizar un viaje. Se trata, de identificar los factores que motivan a los usuarios de la red vial a salir de una zona teniendo como destino cualquiera otra de las zonas (producción de viajes) o, arribar a una zona en particular teniendo como origen cualquiera de las zonas (atracción de viajes), dentro del área de estudio.

¹⁸ Todos los usuarios tienen la alternativa de usar los caminos disponibles, por lo que si se elige un camino, no significa que no se pueda tomar el otro, y esto sucede con el problema de congestión. Se elige un camino que de mayores beneficios, pero si está rebasada su capacidad del camino, se tendrá que realizar el viaje por otro, que en principio no se eligió.

¹⁹ Modelos de demanda de transporte, Ortuzar.

Se obtienen mejores modelos de generación si se distinguen y separan los viajes con distintos propósitos o motivos de viaje por las características socioeconómicas de los usuarios, ya que, en general, el comportamiento de los individuos está sujeto a sus actividades cotidianas, y a un periodo de tiempo. La siguiente figura muestra la clasificación de un viaje generado.

Figura 17 Segmentación de los viajes



Fuente: Fuente elaboración propia

Se han propuesto varias técnicas para estimar modelos de generación, pero en todos, lo que se procura es estimar el número de viajes producidos y atraídos por cada zona, sobre la base de datos recolectados en campo (EOD), y/o variables

socioeconómicas del área de estudio. Lo anterior, da lugar al uso de dos modelos de generación de viajes: de producción y atracción, y para su construcción parte de dos enfoques de acuerdo al tipo de información a utilizar, los agregados y desagregados. Los primeros tienen como unidad de trabajo la zona; los segundos, el hogar.

Los agregados tratan de relacionar el total de viajes generados en cada zona con las variables de la zona (población total, parque vehicular, población económicamente activa, producto interno bruto, etc.). Y los modelos desagregados tratan de encontrar la relación entre los viajes generados en los domicilios con las características de los mismos (cantidad de personas en el domicilio, cantidad de vehículos en el domicilio, etc.).

Modelo de distribución de viajes

El modelo de generación, estima los viajes totales que produce y atrae cada una de las zonas del área de estudio, pero no el patrón de interacción de viajes entre zonas, es decir, el patrón de movimientos interzonales. De tal forma, para encontrar ese patrón, se tienen modelos de distribución que estimen el intercambio de viajes entre cada una de las zonas, construyendo la matriz de viajes entre diversos orígenes y destinos, en la que se considera n zonas, y cada elemento V_{ij} representa los viajes generados en la zona i que tienen como destino la zona de atracción j. La siguiente figura muestra una matriz de viajes con orígenes y destinos.

Figura 18 Matriz de distribución de viajes

$$\left[MV \right] = \begin{pmatrix} V_{11} & V_{12} & \dots & V_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_{n1} & \dots & \dots & V_{nm} \end{pmatrix}$$

Fuente: Elaboración propia con información de Ingeniería del transporte, Francisco Aparicio

La resolución del problema de reparto zonal requiere, en primer lugar, determinar los valores de los elementos de la matriz de viajes, y en segundo lugar, establecer, en función de las condiciones reales de cada caso de estudio, hipótesis y herramientas de análisis que permitan reducir el número de variables, de modo que pueda alcanzarse una solución única. Un criterio que reduce la solución del problema, es considerar los viajes intrazonales con valor cero, ya que, $V_{ij} = 0$, si $i=j$.

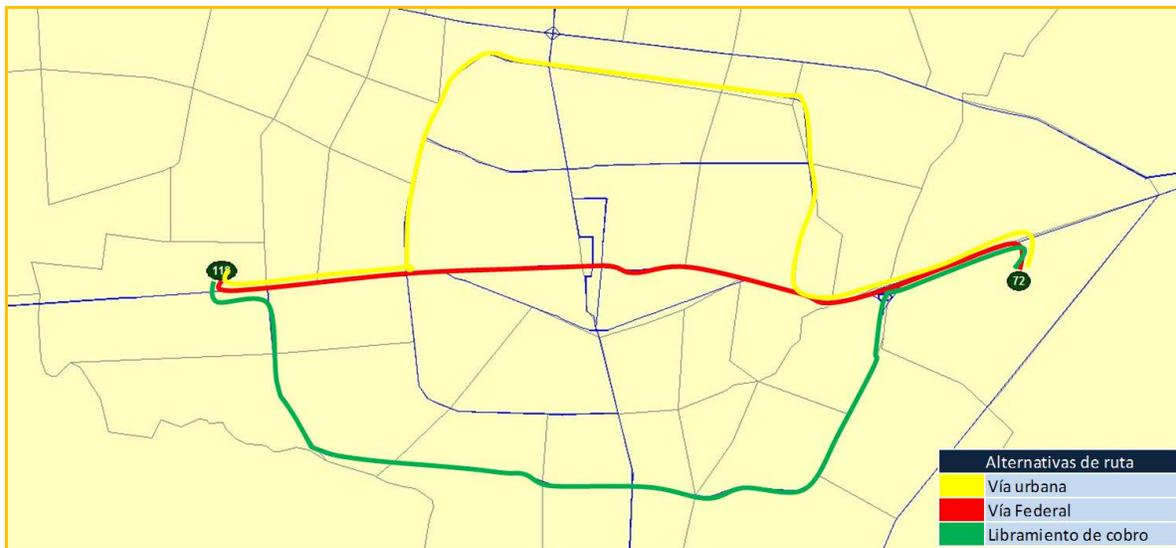
Para la solución de la distribución de los viajes, se hizo con la analogía a la teoría de la gravitación universal, con lo que dio origen a los modelos de gravedad. Una ventaja principal del método, es la facilidad de obtención de datos para su aplicación (poblaciones y distancias), y una debilidad es no considerar otros factores, como, las áreas comerciales, hospitales, instalaciones de producción, etc. No obstante, en casos concretos pueden realizarse variables sustitutivas que permitan corregir esta carencia.

Modelo de asignación de viajes

El modelo es conocido también como modelo de selección de rutas, asignación de rutas, etc. Consiste en identificar las rutas óptimas de los viajes, esto es, la mejor forma en que las personas recorrerán las redes viales o de transporte para ir de sus orígenes a sus destinos.

Entre cualquier par de zonas, existe normalmente cierta cantidad de rutas diferentes factibles de ser usadas. Cada una involucra cierta cantidad de tiempo, costo, comodidad, etc., que los usuarios de las redes de transporte consideran para hacer su elección. Este fenómeno, es el que se replica dentro del modelo de asignación. La siguiente figura muestra las rutas posibles de una zona a otra.

Figura 19 Rutas alternas para realizar un viaje



Fuente: Elaboración propia

La figura anterior hace referencia a las alternativas existentes de caminos que una persona puede seleccionar para realizar su viaje, cada camino tiene sus características operativas y físicas que las hace atractiva a los usuarios.

Cabe señalar, que se debe construir la red vial del área de estudio por las que se simulará el recorrido de los viajes. Por lo que, se deberá definir las vialidades con una clasificación de acuerdo a sus características operativas, y los centroides que representan las zonas, y su conexión a la red vial a través de un conector con el objetivo de dar accesibilidad. La siguiente figura muestra los componentes de la red vial de un modelo de transporte de un sistema carretero.

Figura. 20 Componentes de la red vial del modelo de transporte carretero



Fuente: Elaboración propia con información de Google Earth

Es necesario definir un árbol de caminos mínimos entre los pares de zonas más importantes dentro de un proyecto de infraestructura carretero antes de la asignación, y ello suele hacerse con software especializado, normalmente basados en el algoritmo de Moore.

Un modelo simple de asignación es el denominado método de “todo o nada”, que asume que de un origen a un destino no existe congestión vehicular en ninguna de las alternativas de caminos mínimos. Otro método de asignación de viajes está basado en el concepto de equilibrio del tráfico de Wardrop, por el cuál ningún usuario de la red puede, en una situación de equilibrio, mejorar su costo del viaje por una decisión unilateral. Existen dos vertientes a partir de este concepto: el equilibrio del usuario y el de equilibrio del sistema. El primero se utilizó para explicar el comportamiento de los usuarios de la red a través de una función de

costos del viaje y el segundo para obtener situaciones de tráfico ideal, basado en la minimización del costo total del transporte de todos los usuarios de la red o toda la sociedad.

En algunos casos también se han aplicado modelos Logit para la elección de un camino, como es la elección de un viaje entre una autopista y una carretera libre. La elección de la carretera de cuota puede reducir el tiempo de viaje, por lo que puede resultar interesante una estimación del valor del tiempo a través del modelo y validarlo con datos provenientes de entrevistas sobre la percepción de ahorro de tiempo a los usuarios o por medidas obtenidas mediante la instrumentación de vehículos.

Modelos de reparto modal

El modelo debido al concepto teórico con el que está formulado, tiene gran aplicación aún fuera del grupo de modelos de las cuatro etapas. Sin embargo, es el que ha tenido menos uso en la planeación del transporte²⁰.

Los modelos de reparto modal permiten realizar la distribución entre modos de transporte. Existen una considerable cantidad de modelos propuestos y aplicados en áreas concretas, que han tratado de predecir la distribución de la demanda entre transporte público y privado, o en este caso de estudio, una carretera de cuota y carretera libre de cuota.

Los modelos más simples consisten en suponer que el reparto modal actual dentro del sistema se mantiene inalterable en el tiempo y, por tanto, si se aplican estos porcentajes a los viajes interzonales, se obtienen los viajes por cada modo. Este planteamiento deja fuera cualquier característica del nivel de servicio de cada uno de los modos de transporte del área de estudio, lo cual modificaría la conducta del usuario al momento de decidir usar uno sobre otro. Por ello, se han desarrollado modelos que tienen un planteamiento más general, y que representan el fenómeno mediante la valoración que los usuarios atribuyen al servicio, y que es el tema central de esta tesis, estimar el valor que le da un usuario a su tiempo por ahorrar tiempo de viaje al usar una nueva carretera que le implica un costo. Es mediante esta línea de modelos en la que se puede modelar la incidencia de cambios en la oferta de transporte en relaciones concretas; como, por ejemplo, el impacto que los trenes de alta velocidad tienen sobre el transporte aéreo o el privado por carretera.

Los modelos matemáticos que se han propuesto para la selección modal, el más importante es el conocido como “Multinomial Logit”, que se basa en el ajuste de

²⁰ Estudio de la demanda de transporte, pag. 119, IMT, 2002

datos que se comportan de acuerdo con una curva logística. Y consiste, en estimar la desutilidad de cada modo de transporte o la utilidad de las carreteras que dan servicio a los usuarios de un área de estudio. Algunas de sus limitantes, es en base a su uso, y se recomienda utilizarlos para comparar las opciones para viajes en un solo modo de transporte, y no a viajes con más de un modo de transporte.

Los modelos de reparto modal más actuales tienen su fundamento en las elecciones observadas de viajeros individuales, por lo que se han llamado modelos de selección discreta o desagregados.

2 Modelos de selección discreta

Como hemos observado, para estimar la demanda de una nueva carretera de cuota, se requiere de un análisis de la oferta y demanda dentro del área de estudio, y de estructurar un modelo de transporte que responda al comportamiento de los usuarios de acuerdo a sus características socioeconómicas y preferencias de viaje. Y la solución a esta interrogante es a través de la planeación del transporte, con el uso del modelo clásico de transporte con algunas variantes dentro de sus etapas; en específico, en la etapa de asignación.

Dentro de los modelos de asignación que sirven para estimar la elección del camino por parte de un usuario, son los modelos de elección discreta, que utilizan información individual de una muestra de una población, que represente sus características socioeconómicas y preferencias de viaje.

2.1 Objetivo de la estimación de la demanda de transporte

La planeación del transporte se interesa en el modo en que los usuarios eligen las alternativas, tanto para estimar el impacto de sus decisiones como para influir en ellas y así racionalizar el uso de recursos.

La idea básica en cualquier metodología para la estimación de la demanda de transporte es averiguar los factores que influyen en las decisiones de los usuarios y obtener datos adecuados para así anticipar en cierta medida las reacciones de estos usuarios, a los cambios en estos factores de decisión. Para ello, es conveniente iniciar identificando las opciones que se presentan a los usuarios, en este caso, toda la red vial dentro del área de estudio con sus características físicas y operativas, para tener claro el panorama de decisiones que enfrentan los viajeros.

Además de considerar las características de la red vial que influyen en la decisión del usuario, los modelos de demanda están basados en datos observados sobre las decisiones que toman los usuarios sobre el camino que van a usar para realizar su viaje, así como sus características socioeconómicas. Todos estos atributos de la oferta y demanda, influyen en la elección del usuario.

2.2 Enfoque de las elecciones de los usuarios: Preferencias reveladas y declaradas

En la década de los años sesenta y ochenta, los modelos de demanda estaban basados en datos observados sobre las decisiones tomadas por los usuarios de los sistemas de transporte. Trataban de explicar las decisiones que tomaban los

usuarios, a partir de atributos del sistema de transporte que usaban para realizar su viaje cotidianamente, como: la frecuencia de viaje, tiempos de recorrido, oferta de rutas, o de sus reacciones ante cambios de tarifa. Este enfoque se conoce como preferencias reveladas, ya que se basa en la observación de las elecciones de los usuarios en el uso de los sistemas de transporte en operación y en los cambios que ocurren de ellos.

Preferencias reveladas

Dentro de este enfoque, se recolecta información sobre viajes actuales. Las preferencias reveladas (PR) corresponden, precisamente, a las elecciones observadas de una muestra de viajeros. Cuyo objetivo, es realizar mediciones sobre los niveles de servicio (tiempo de viaje, espera y tarifa) de la alternativa elegida y de todas las posibles alternativas disponibles para un conjunto de viajeros seleccionados, que corresponden a un segmento de la demanda del área de interés. Cabe señalar, que el área de estudio donde se realice la aplicación de una preferencia revelada, deberá existir la variabilidad y diferencias de los tiempos y costos de viaje por las distintas alternativas para los viajeros. Siendo así, el usuario presentará sensibilidad ante un cambio de alguna de las variables significativas de su viaje.

La observación directa del comportamiento de los usuarios no es algo fácil de lograr. Por lo que, el tamaño de la muestra debe ser tal que permita estimar un modelo adecuado con estos datos; se ha encontrado que muestras no inferiores a las 300 observaciones por estrato suelen ser suficientes²¹. Ya que, las observaciones que podemos obtener de contadores mecánicos o electrónicos, o de los boletos usados en el transporte pueden ser de alguna utilidad; pero estas observaciones no pueden dar información más detallada sobre las características del usuario (sexo, edad, nivel de ingreso, etc.) que pudieran auxiliar en el proceso de modelación de las decisiones de los viajeros.

La recolección de información con el enfoque de preferencias reveladas, tiene varias limitaciones. Entre estas se tienen:

- El costo de aplicar encuestas de origen – destino, que deberán cubrir una muestra adecuada del número de entrevistados.
- La dificultad en ocasiones de aplicar las encuestas debido a factores climáticos, geográficos o de seguridad, que ha sido un factor importante en los últimos años en México.

²¹ Ortuzar y Willumsen, 2001.

- La dificultad de detectar la influencia que ejercen en la decisión de los usuarios factores que no son directamente medibles, como es la calidad del servicio, o la comodidad del viaje. Sin embargo, dentro del análisis de la elección de los usuarios, se hace referencia a estas variables cualitativas del impacto sobre las cuantitativas.
- La aparición frecuente de fuertes correlaciones entre las variables explicativas más relevantes (por ejemplo, costo del viaje y tiempo de viaje) que impiden desarrollar buenos modelos de pronóstico por la escasa variabilidad que tienen estos atributos tomados independientemente.
- Y uno de los principales, es la dificultad de obtener datos para estimar las elecciones que harán los usuarios ante un servicio de una nueva carretera que esta apenas en su etapa de planeación y aún no existe ni opera.
- Los entrevistados pudieran dar respuestas poco realistas de sus reacciones motivadas por un exagerado optimismo; de modo que ante las opciones planteadas, sus verdaderas elecciones no serían precisamente lo que dijeron que harían.

Con la finalidad de resolver las limitaciones, aparecieron los primeros trabajos con el enfoque alternativo de las preferencias declaradas (PD), basadas en técnicas de investigación de mercado que fueron llevadas al campo del transporte. A diferencia de las preferencias reveladas, la consideración clave es el diseño adecuado del experimento; la selección y variación correcta de las variables que caractericen la nueva carretera contra las existentes.

Preferencias declaradas

Este enfoque, corresponde a elecciones de una muestra de viajeros de alternativas no existentes en la actualidad, destacando variables secundarias o latentes que no es posible medir en la práctica, como seguridad o comodidad. De tal forma, que las opciones presentadas al usuario pueden corresponder a situaciones hipotéticas de servicios que aún no se implementan, pero que son de importancia al estudio de interés.

La respuesta del usuario puede ser indicando el orden de su preferencia por las opciones (de la más atractiva a la menos, es decir, la que proporciona menor beneficio al usuario); dando una calificación a cada opción para indicar la intensidad de su preferencia. De tal forma, que los usuarios considerados pueden ser individuos que eligen personalmente sus opciones de viaje o grupos de personas que viajan juntos, como pueden ser empleados de una misma empresa,

estudiantes que van a la misma escuela o familias que organizan sus viajes cotidianos.

Las preferencias declaradas resuelven problemas que presentan las preferencias reveladas, como la cantidad de entrevistas, que suele ser menor; se puede investigar las preferencias de los usuarios de una nueva carretera sobre las existentes, y la posibilidad de plantear cuestionarios que permitan identificar con mayor claridad la influencia que tienen las elecciones de los usuarios factores que no se miden fácilmente, como la comodidad, seguridad o confiabilidad.

Un esquema general del enfoque de preferencias declaradas es el siguiente:

- La base de las respuestas de los usuarios es en planteamientos de cómo actuarían ante diversas opciones ofrecidas por el sistema de transporte.
- Cada escenario hipotético, presenta varios atributos del viaje. Cuantitativos, como el tiempo y costo del viaje, y cualitativos como, la seguridad, la comodidad, etc.
- Los atributos de cada escenario hipotético, deben estimarse. Para esto, se utilizan técnicas de diseño experimental que ayudan a manejar las variaciones de los atributos con independencia estadística.
- Los planteamientos de alternativas presentadas a los usuarios, deben ser de forma clara y realista, que sean cercanas a su experiencia cotidiana del sistema de transporte.

Las técnicas de preferencias declaradas basan la estimación de la demanda en un análisis de las respuestas a elecciones hipotéticas; éstas, pueden comprender una gama de atributos y condiciones mayor que las del sistema real (red vial actual). Sin embargo, las repuestas de los usuarios pueden ser muy optimistas, por lo que sesga la información.

Se ha encontrado, que en ciertos casos, los métodos y datos de preferencias declaradas y reveladas se pueden utilizar de forma complementaria, evidenciado y combinando las ventajas de ambos enfoques. En particular, se considera que ofrecen una herramienta invaluable para ayudar a la modelización de alternativas completamente nuevas²².

2.3 Encuestas de preferencia declarada

²² Modelos de transporte, Juan de Dios Ortuzar y Luis G. Willumsen, Universidad de Cantabria, 2008.

La preferencia declarada se refiere a un amplio vector de posibles formas de preguntar al usuario acerca de preferencias, elección, formas de utilizar, frecuencia de usos, etc., de entre varias alternativas que ofrece un red vial dentro de un área de interés. En este tipo de experimentos, las opciones son presentadas al encuestado como una comparación entre los atributos de dos caminos alternativos (o en general, de dos bienes sustitutos), frente a la cual se debe optar, evaluando la situación en una escala semántica. La siguiente tabla muestra un arreglo de nueve escenarios hipotéticos, compara los atributos de tiempo y costo de viaje, de un nuevo camino contra el actual.

Tabla 1 Diseño de arreglos de costos y tiempos de las alternativas de ruta

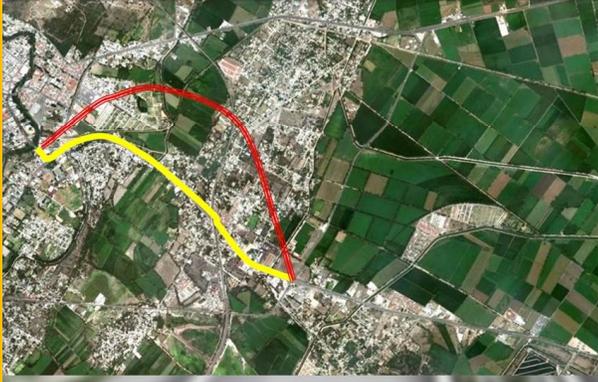
Orden	Carretera Libre		Autopista de Cuota			ELECCION		
	Costo por viaje	Tiempo por viaje	Tiempo por viaje	Ahorro por viaje	Costo por viaje	Actual	Futuras	Indiferente
1	50	1 hr 15 min	35 min	55 min	120	A	B	C
2	50	1 hr 15 min	35 min	45 min	95	A	B	C
3	50	1 hr	25 min	35 min	120	A	B	C
4	50	45 min	20 min	25 min	105	A	B	C
5	50	1 hr	25 min	35 min	95	A	B	C
6	50	1 hr 15 min	30 min	55 min	105	A	B	C
7	50	45 min	20 min	25 min	95	A	B	C
8	50	45 min	20 min	25 min	120	A	B	C
9	50	1 hr	25 min	35 min	105	A	B	C

Fuente: Elaboración propia con información de C&M

Frente a cada opción se encuentra una escala semántica, en el cual se declaran las preferencias por uno u otro camino para realizar el viaje. De tal forma, el encuestado escoge de entre estas sentencias las que refleje más fielmente su preferencia. La siguiente figura muestra una tarjeta con dos alternativas de camino para realizar el viaje: la vía actual y la nueva autopista.

Figura 21 Diseño de tarjeta para selección de ruta

**NUEVA AUTOPISTA – AUTOS -
TARJETAS 1 /9**



Situación Actual – Autopista libre Actual		
Tiempo de viaje	1 hr 15 min	A
Costo de viaje	\$ 0	

Situación Alternativa – Autopista de cuota Futura		
Tiempo de viaje	25 min	B
Costo de viaje	\$ 80	
Ahorro	50 min	
Escoja: indique su respuesta al encuestador		

Usuario indiferente		C
Escoja: indique su respuesta al encuestador		

Fuente: Elaboración propia con información de C&M

Cada encuestado entrega más de una respuesta, debido a que el experimento puede mostrar varios escenarios hipotéticos que requieren respuesta del usuario, lo que hace muy eficiente la recolección de la información. Como por ejemplo, si se presentan nueve escenarios con dos alternativas, las repuestas pueden considerarse como evaluaciones hechas por distintos individuos, a los que se denominan pseudo individuos²³, por lo que se obtendrían nueve respuestas diferentes por cada encuesta aplicada. El análisis de este tipo de datos consiste en encontrar una relación cuantitativa entre los atributos de cada opción y la respuesta expresada en la escala propuesta. Para encontrar esta relación, es necesario asociar a cada sentencia de la escala un valor numérico que la represente.

Así, en este caso el problema no es de medición, sino de diseño. La experiencia internacional en este tema, muestra que la etapa de diseño consume más del 60% de los recursos dedicados a la recolección de datos de la preferencia declarada²⁴. De esta forma, en base a la experiencia de la aplicación de las encuestas de preferencia declaradas en campo, se han definido algunos criterios a tomar en cuenta, con la finalidad de reducir algunas limitaciones y problemas que se reflejan en la calidad de los datos. Los siguientes enunciados, son criterios usados para diseñar la encuesta de preferencia declarada:

²³ Modelos de demanda de transporte, Juan de Dios Ortuzar, 1994, pag. 205.

²⁴ Modelación de demanda para carreteras de cuota, manual de modelación 2006. SCT, Transconsult y Steer Davies Gleave.

- Selección de las variables de interés, así como la estimación de sus niveles de variación esperados, tanto de la nueva carretera como de las vías actuales. Cabe señalar, que es adecuada la aplicación de una prueba piloto antes de la definitiva, lo que permitirá corregir la variación de las variables, o el cambio de alguna que no sea lo suficiente representativa.
- Uso adecuado de la forma y lenguaje utilizados para plantear las distintas situaciones hipotéticas a los encuestados. El apoyo por parte de psicólogos y lingüistas puede ser de gran importancia, ya que resolverán problemas de una incorrecta forma de plantear una pregunta al usuario por parte del encuestador, y/o su redacción dentro del cuestionario.
- La aplicación de la encuesta en campo, puede presentar un problema del tiempo de duración de la encuesta, debido a que puede ser una cantidad grande de alternativas y/o realizada a la orilla de una vía con un flujo considerable. Con lo cual, podría tener respuestas apresuradas, por parte del usuario, y afectar enormemente a la calidad de los resultados.
- No omitir opciones realistas que pudieran ser utilizadas en la práctica, es decir, no por mantener un rango de variación del experimento, se excluya un valor más cercano a lo que pudiera suceder en un futuro.
- En ocasiones, cuando se tiene un número considerable de alternativas a presentar a los usuarios, es conveniente dividir el experimento en dos partes. Lo que se hace en la práctica, es que un encuestador aplica un cierto número de alternativas, y otro, el resto de las alternativas del experimento.
- El tiempo y costo de viaje, son las variables más perceptibles y representativas de un nuevo proyecto carretero ante las vías existentes cuando se presentan al usuario. Sin embargo, se deben considerar otros atributos que sean relevantes e influyan en la elección de los usuarios.
- La selección métrica de la mayoría de los atributos es clara, para los cuantitativos como el tiempo y costo de viaje. Por lo que, para atributos cualitativos como comodidad, se deberá buscar una variable que la represente y sea medible, como podría ser el caso de, la tasa de ocupación vehicular y/o tipo de vehículo.

De igual forma, como se ha ido avanzando en técnicas o metodologías para realizar un adecuado diseño de la encuesta de preferencia declarada, y teniendo

en cuenta lo complejo en cuanto al número de diseños que se pueden presentar para un estudio de la estimación de la demanda, se ha desarrollado software para facilitar la aplicación y recolección de las encuestas, con lo que se reduce los tiempos y errores de captura de datos. La siguiente figura muestra la aplicación de una encuesta PD, con el uso de computadora portátil.

Figura 22 Aplicación de la encuesta PD en campo



Fuente: Elaboración propia

Las limitantes que pudiera presentar, son una mala interface del programa instalado en las computadoras, produciendo errores en la captura de datos en el momento de la aplicación, y no se puedan corregir; el alto costo en un principio de cambiar de tecnología, y el posterior mantenimiento y renovación de esta, etc.

El desarrollo de metodologías, técnicas de muestreo y tecnología, con el objetivo de conocer y estimar el comportamiento de los usuarios a partir de sus características socioeconómicas y de las alternativas que se le presentan para realizar su viaje, y que posteriormente se recolecta en las encuestas de preferencia declarada. Toda esa información, sirve de insumo para construir el modelo de elección discreta adecuado, que replique la elección que hacen los usuarios para realizar su viaje. Este resultado, define y estima la demanda de un sistema de transporte.

2.4 Enfoque de la elección discreta

La demanda que tiene un sistema de transporte es el resultado de las elecciones que hacen los usuarios de las distintas opciones disponibles para viajar en este sistema. El desarrollo de una teoría de demanda para una población de

consumidores, la cual es una lógica y natural generalización de la teoría tradicional, envuelve la selección entre alternativas discretas, las cuáles proporcionan una herramienta para el análisis de la conducta del viajero, tratando de proporcionar una base para el estudio de la amplia variedad de decisiones de los usuarios que son un factor importante en la determinación de la demanda observada.

Lo anterior, define que el valor de la demanda de un sistema de transporte es producto de las decisiones de viaje de los usuarios, lo que es el enfoque de la elección discreta. En base a esto, se debe considerar dos aspectos adicionales de las decisiones de viaje del usuario que requieren una reexaminación del modelo del consumidor tradicional:

- 1) El viaje representa un principio y un fin para el usuario con el fin de cubrir actividades básicas.
- 2) La extraordinaria complejidad de las decisiones de viaje: modo, frecuencia, destino, tiempo de viaje, finalidad y propósitos del viaje.

Para estimar la demanda de transporte se requiere de un modelo que represente razonablemente el proceso de toma de decisiones de los usuarios ante las opciones que tiene para viajar. Si el modelo de elecciones de los usuarios es adecuado, entonces los usuarios que el modelo asigne a las distintas opciones pueden ser sumadas para obtener las estimaciones agregadas del uso que tendrá cada una de esas opciones de viaje.

La construcción de un modelo de elecciones a partir de las elecciones de los usuarios, requiere de tres elementos básicos:

- 1) Identificación de las opciones de viaje que estén disponibles y que sean conocidas por el usuario dentro de un área de interés, por la que ha de tomar la decisión de viaje.
- 2) Identificación de variables que influyan en la decisión de viajar. Estos pueden ser de las opciones disponibles y/o de las características socioeconómicas del usuario.
- 3) Un modelo matemático que represente las elecciones del usuario en función de las variables que afectan su decisión de viajar.

Los dos primeros elementos suelen integrarse sin mucha dificultad, a partir del reconocimiento del área de interés, que pueden ser visitas a campo o por un

conocimiento a través de la experiencia del analista; y de la información que arroje realizar encuestas de preferencia declarada a usuarios de la zona de estudio.

El tercer elemento requiere de supuestos teóricos razonables y realistas para representar adecuadamente el proceso de toma de decisiones de los usuarios del sistema de transporte. Por lo que el modelo elegido, debe considerar:

- Cuando un usuario escoge una opción concreta, está manifestando una preferencia por esa opción.
- Las elecciones manifestadas por el usuario, son producto de las circunstancias concretas que lo afectan, y no de un mundo ideal.
- Las preferencias manifestadas por el usuario, dependen de los atributos que presentan cada una de las alternativas que tiene para realizar su viaje, y sus características socioeconómicas.

Entonces, siendo la elección del usuario una manifestación de sus preferencias, es pertinente realizar la modelación de preferencias de los individuos ante las opciones que se les presenta para decidir. Un marco teórico que resulta adecuado para este propósito es la teoría de la utilidad.

2.5 El concepto de utilidad

La probabilidad de que un individuo escoja una cierta opción, es una función de sus características socioeconómicas y de lo atractiva que resulte la alternativa en cuestión en comparación a las demás²⁵.

Para representar lo atractivo de las alternativas se suele utilizar el concepto de utilidad (que se define, como lo que el individuo desea maximizar); generalmente, la utilidad observable se define como una combinación lineal de variables. Cada variable representa una característica o atributo de la alternativa, lo que ayuda a distinguirla de las demás. La influencia de cada atributo está dada por su coeficiente.

Sea A el conjunto total de alternativas posibles, y X el conjunto de vectores de atributos medibles de los individuos. Por lo tanto, un individuo q , tomando al azar de una población o segmento de mercado Q , va a tener un conjunto de atributos $x \in X$ y va a enfrentar un conjunto de opciones disponibles $A(q) \in A$.

Si cada alternativa A_i tiene asociada una Utilidad U_{iq} , para el individuo q , se puede representar por dos componentes:

²⁵ Modelos de demanda de transporte, 1994, Juan De Dios Ortuzar, Pag. 175

- Una componente sistemática o representativa V_{iq} , que es función de los atributos medidos (observados) x .
- Una componente aleatoria ε_{iq} , que refleja las idiosincrasias y gustos particulares de cada individuo, además de errores de medición y observación por parte del modelador.

Entonces:

$$U_{iq} = V_{iq} + \varepsilon_{iq} \dots\dots\dots 2.1$$

La adición de la componente aleatoria permite resolver dos problemas:

1. Individuos aparentemente idénticos escogen alternativas diferentes.
2. Un individuo no escoge la alternativa aparentemente más conveniente.

Aun cuando hemos dicho que V es representativa, lleva el índice q puesto que es función de los atributos y éstos varían de individuo en individuo (Domencich y McFadden, 1975).

Un caso sencillo y popular de expresión para V_{iq} , es la lineal en los parámetros:

$$V_{iq} = \sum_{k=1}^k \theta_{ik} x_{ikq} \dots\dots\dots 2.2$$

En que se supone que los parámetros θ son constantes para todos los individuos, aunque pueden variar de opción en opción. Para que la descomposición de U en V y ε sea relativamente adecuada, se necesita que la población en estudio sea homogénea. Por esto se suele señalar que se requiere que los individuos tengan las mismas alternativas y enfrenten las mismas restricciones. Para lograr puede ser necesario segmentar el mercado.

Es importante destacar que se están planteando dos visiones del fenómeno de elección. En primer lugar, la de los individuos (que no tienen ningún grado de aleatoriedad), que ponderan todos los atributos que les interesan y escogen la opción más conveniente. En segundo lugar está la del modelador, que sólo es capaz de observar algunos de los elementos de juicio de los individuos, y ello introduce los ε para explicar lo que, de otro modo, aparecerá como irracionalidades.

La teoría de la utilidad aleatoria considera que el individuo escoge la alternativa de máxima utilidad, esto es, escoge A_i si y sólo si:

$$U_{iq} \geq U_{jq} \quad \forall A_j \in A(q) \dots\dots\dots 2.3$$

Descomponiendo las utilidades en sus dos componentes se llega a:

$$V_{iq} + \varepsilon_{iq} \geq V_{jq} + \varepsilon_{jq} \dots\dots\dots 2.4$$

Luego:

$$V_{iq} - V_{jq} \geq \varepsilon_{jq} - \varepsilon_{iq} \dots\dots\dots 2.5$$

Sin embargo, como no se conoce $(\varepsilon_{jq} - \varepsilon_{iq})$, no se puede determinar con certeza si (2.5) se cumple o no; por este motivo se debe asignar probabilidades. Así, la probabilidad de escoger la alternativa A_i es:

$$P_{iq} = \text{Prob} \left\{ \varepsilon_{jp} \leq \varepsilon_{iq} + V_{iq} - V_{jq}, \quad \forall A_j \in A(q) \right\} \dots\dots\dots 2.6$$

Como no se conoce la distribución de los ε no se puede tener una expresión analítica para el modelo. Es conveniente recordar que todavía no se ha hecho ninguna hipótesis respecto a la distribución de los ε , solo se ha señalado que son variables aleatorias con algún tipo de distribución:

$$f(\varepsilon) = f(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n) \dots\dots\dots 2.7$$

Sin pérdida de generalidad se supone que los ε tienen media cero, por lo tanto la distribución de los U es idéntica, pero con media V . Dado lo anterior:

$$P_{iq} = \int_{R_N} f(\varepsilon) d\varepsilon \dots\dots\dots 2.8$$

Con

$$R_N = \left[\begin{array}{l} \varepsilon_{jq} \leq \varepsilon_{iq} + V_{iq} - V_{jq}, \quad \forall A_j \in A(q) \\ V_{iq} + \varepsilon_{iq} \geq 0 \end{array} \right] \dots\dots\dots 2.9$$

Esto muestra claramente que se puede obtener distintos modelos dependiendo de la distribución de los ε . Una clase importante de modelos de utilidad aleatoria es la generada por funciones de utilidad con distribuciones independientes e idénticas (IID), en cuyo caso es posible descomponer a $f(\varepsilon)$ como sigue:

$$f(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_N) = \prod_{n=1}^N g(\varepsilon_n) \dots\dots\dots 2.10$$

Donde $g(\varepsilon_n)$ es la distribución de utilidad asociada a la opción A_n . En este caso la expresión del modelo general se simplifica a:

$$P_i = \int_{-\infty}^{\infty} g(\varepsilon_i) \left[\prod_{j \neq i} \int_{-\infty}^{\varepsilon_i + V_i + V_j} g(\varepsilon_j) d\varepsilon_j \right] \cdot d\varepsilon_i \dots\dots\dots 2.11$$

Ortúzar y Williams (1982) presentan y discuten una interpretación geométrica en dos dimensiones de este modelo, junto con extensiones para el caso más general de correlación y distintas varianzas. La expresión (2.11) se puede re-expresar de la siguiente forma:

$$P_i = \int_{-\infty}^{\infty} g(\varepsilon_i) \prod_{j \neq i} G(\varepsilon_i + V_i - V_j) \cdot d\varepsilon_i \dots\dots\dots 2.12$$

En que,

$$G(x) = \int_{-\infty}^x g(x) dx, \text{ es la función acumulada de probabilidad} \dots\dots\dots 2.13$$

Se han trabajado mucho en encontrar formas para la función g , que permitan resolver esta integral y conduzcan a expresiones analíticas sencillas para P_i .

2.6 Modelación de elecciones discretas: Enfoque determinístico y probabilístico

Los modelos desagregados o elección discreta, tienen su fundamento en las elecciones observadas de viajeros individuales.

Estas elecciones, están referidas para el caso de usar una nueva carretera sobre la que se viene usando cotidianamente para realizar el viaje. Adicionalmente se supone que los usuarios del sistema de transporte toman decisiones racionales y expresan sus preferencias de viaje buscando maximizar la utilidad que les proporciona el viaje (o en su defecto, minimizando los inconvenientes de realizar el viaje).

El valor de la función de utilidad de los usuarios depende tanto de los atributos de la opción de viaje, como de las características del individuo que decide. Esto, refleja el comportamiento de los usuarios ante la presencia de un número finito de opciones, eligiendo la que le genere mayor utilidad. De tal forma, que la expresión de la función de utilidad contiene atributos del individuo y de la alternativa, como por ejemplo, dos atributos básicos de las alternativas son el costo y tiempo de viaje, y una característica básica que distingue a los usuarios es su ingreso anual.

Un ejemplo, es la siguiente expresión de una función de utilidad, la referencia es de una publicación del IMT²⁶.

$$U(c, t, I) = -0.5t - 2c/I \dots\dots\dots 2.14$$

La expresión supone el viaje diario al trabajo, con una función de utilidad que dependa del costo c del viaje en pesos, del tiempo t del traslado en horas y del ingreso anual I del viajero en miles de pesos. Los signos negativos del tiempo y del costo indican la inconveniencia de estos atributos; y el coeficiente c/I mide la proporción del ingreso anual que representa el costo de viaje. Así, viajes más largos serán menos preferidos; y por otra parte, individuos con mayores ingresos percibirán menos inconveniencia en el costo del viaje.

Un aspecto importante en el manejo de las funciones de utilidad para estimar las preferencias de los viajeros ante las opciones de transporte, es que el valor numérico de la función de utilidad no es relevante para identificar la intensidad con la que los viajeros prefieren las opciones; así, si para un viajero la función de utilidad vale 1 para la opción del autobús y vale 3 para la opción de taxi colectivo, no es inmediato deducir que prefiere tres veces más el colectivo que el autobús. La elección del usuario depende solamente del orden de sus preferencias, y el principio de maximización de la utilidad señala que el usuario elegirá la opción de mayor utilidad, independientemente de si su valor es tan sólo ligeramente mayor que el de la opción que le sigue.

La función de utilidad se construye como una función matemática cuyos valores numéricos para las opciones por elegir siguen el mismo orden que las preferencias del viajero para esas opciones. Cualquier función matemática que represente numéricamente el orden de las preferencias del viajero servirá como función de utilidad y dará las mismas predicciones de elección del usuario, independientemente del valor numérico o del signo que resulte de su fórmula analítica.

El principio de maximización de la utilidad permite describir y pronosticar las decisiones que tomará un individuo enfrentando a un conjunto de opciones de viaje. Y considerando que el propósito es la estimación de la demanda, los resultados de la modelación de las elecciones discretas a través de la función de utilidad ayudan a su estimación. Ya que, a partir de evaluar las preferencias individuales de cada segmento de demanda, su suma es la estimación de la demanda de un área de interés.

²⁶ Métodos de elección discreta en la estimación de la demanda de transporte, IMT, 2011, pag.8

Horowitz (1986), identifico cinco limitaciones en la información utilizada para construir modelos de elección basados en el principio de maximización de la utilidad:

1. La omisión de variables relevantes para la modelación de la utilidad. Debido a la simplificación de los modelos, se dejan de lado variables relevantes que explican las preferencias de los viajeros.
2. Los errores de medición de los atributos de viaje. La información no es lo suficientemente precisa.
3. Variables proxy. Esta clase de variables son datos que por sí mismos no son de interés para el problema de modelación, pero que por tener una fuerte correlación con la variable que si interesa, y que por alguna razón no se puede medir directamente, son utilizadas en su presentación.
4. Diferencias relevantes entre los viajeros. Las diferencias en las características socioeconómicas de los viajeros pueden en algunos casos ser incluidas en los modelos de utilidad, como por ejemplo, el nivel de ingresos de los usuarios.
5. Variaciones día con día del contexto de la elección. Los modelos de utilidad consideran los atributos del viaje y las características del viajero para pronosticar las elecciones que se harán, suponiendo que no hay cambios importantes en la repetición día con día de estas elecciones.

Estas limitaciones contribuyen a la aparición de variaciones en las elecciones que los viajeros hacen de sus opciones de viaje, que no pueden ser explicadas por los modelos deterministas de utilidad. Por lo que, el modelado de las selecciones se extiende hacia un contexto de probabilidad. Así, surgen los modelos de utilidad aleatoria que describen las preferencias de los viajeros en términos de probabilidad. El modelo no pronostica la opción elegible por el viajero que toma la decisión, sino más bien calcula las probabilidades de elegir cada una de las distintas opciones.

La forma más general de un modelo de utilidad probabilística U consiste en la suma de una parte de utilidad determinística V , calculada con los atributos de las opciones para elegir y las características de los viajeros y un término de error ε que representa una variable aleatoria que cuenta las diferencias observadas en el modelo determinista, como se observa en la siguiente expresión (para mayor detalle, referirse al punto 2.5).

$$U = V + \varepsilon \dots\dots\dots 2.15$$

A fin de predecir si una determinada opción va a ser escogida, de acuerdo al modelo, el valor de la utilidad debe transformarse en un valor de probabilidad entre 0 y 1. Para esto, existe una gran variedad de posibles transformaciones matemáticas que típicamente se caracterizan por ser graficables en forma de S, e incluyen dentro de su estructura la utilidad, tales como:

Logit

$$P_1 = \frac{\exp U_1}{\exp U_1 + \exp U_2} \dots\dots\dots 2.16$$

Probit

$$P_1 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{U_2 - U_1 + \varepsilon_1} \left[\frac{\exp \left(-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left(\left(\frac{x_1}{\sigma_1} \right)^2 - \frac{2\rho x_1 x_2}{\sigma_1 \sigma_2} + \left(\frac{x_2}{\sigma_2} \right)^2 \right) \right)}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \right] dx_2 dx_1 \dots\dots\dots 2.17$$

2.7 Modelos de selección discreta

Para determinar la demanda de viajes se necesitan modelos más completos, donde se tome en cuenta que el viajero toma una decisión de viaje de una serie de finita opciones, y los modelos que permiten trabajar con estas opciones son los modelos de selección discreta o modelos de segunda generación, ya que toman en cuenta que el viajero toma la opción que le deja mayor rango de utilidad.

Los métodos de modelización de selecciones discretas toman como marco de referencia la teoría de la utilidad aleatoria, que considera la falta de información precisa para describir por completo atributos de las opciones o características socioeconómicas de los viajeros. Por lo que, estos modelos describen las preferencias de los viajeros en términos de probabilidad.

La selección del usuario a partir de la estimación de una probabilidad, permite formular distintos modelos, los más habituales son los modelos Logit o Probit Multinomial, en el caso que haya varias alternativas de transporte a considerar. Cuando la comparación entre modos se realiza de manera secuencial, agrupando medios de transporte “parecidos” (por ejemplo, autobús y auto particular, frente a tren o avión) suelen utilizarse Logits anidados o jerárquicos cuya popularidad ha

crecido e medida que ha mejorado la disponibilidad de datos y los métodos de estimación²⁷.

Los modelos de elección de modo de transporte también se han beneficiado particularmente de las mejoras en las técnicas de recolección de datos – preferencias declaradas frente a preferencias reveladas- lo cual ha permitido avanzar más en los estudios sobre la predicción concreta de rutas elegidas.

Modelo Logit

Las opciones de viaje disponibles para los usuarios están descritas por un conjunto A, y los atributos de estas opciones así como las características socioeconómicas de los individuos se describen por un vector X de atributos.

Cada opción $A_j \in A$ tiene asociada una utilidad U_j para el individuo que decide, y se considera que está formada por dos componentes: V_j , la parte medible sistemática, ligada a los atributos que tienen alternativas; y ε_j , el error aleatorio que permite tomar en cuenta el efecto de las percepciones, la idiosincrasia y los gustos del viajero, así como la falta de información en la decisión del individuo.

Se tiene:

$$U(i) = V(i) + \varepsilon(i) \dots\dots\dots 2.18$$

Dónde:

$U(i)$ representa la función de elección de la opción i.

$V(i)$ representa la función determinista de los atributos de la de la opción i.

$\varepsilon(i)$ representa la componente aleatoria de la utilidad, que es una variable aleatoria con cierta distribución.

A partir del supuesto comportamiento racional del individuo, se define la función $V(i)$ a través de variables que representen los atributos de las alternativas que interesan al usuario; una forma sencilla y comúnmente usada es la lineal, con coeficientes que indican la conveniencia del atributo:

$$V_i = \theta_0 + \theta_1 x_1 + \dots + \theta_k x_k \dots\dots\dots 2.19$$

El coeficiente de costo se espera sea negativo, mientras que el atributo de comodidad debería tener coeficiente positivo asociado a la forma lineal.

²⁷ Economía del transporte, Ginés de Rus/Javier Campos/Gustavo Nombela, 2003, pag. (175)

La definición de la función de la componente aleatoria $\varepsilon(i)$ es algo menos directo, ya que depende de la variabilidad de sus percepciones. Como esto es realmente difícil de implantar en la práctica, es necesario adoptar supuestos estadísticos razonables sobre la componente aleatoria θ_i .

Considerando el principio de maximización de la utilidad por el individuo, se puede esperar que elija la opción i que percibe como la de mayor utilidad, y esto se refleja por el hecho de que el valor de $U(i)$ es mayor que cualquier otro valor $U(j)$ para cualquier otra opción j disponible en el conjunto A .

Por lo que, la probabilidad $P(i)$ de que la opción i sea elegida está dada por:

$$P(i) = P[U(j) < U(i)] \quad \text{para toda } j \neq i \dots\dots\dots 2.20$$

Desarrollando la expresión anterior resulta:

$$P(i) = P[\varepsilon(j) - \varepsilon(i) < V(i) - V(j)] \quad \text{para toda } j \neq i \dots\dots\dots 2.21$$

Igualando expresiones:

$$P(i) = P[\varepsilon(j) < V(i) - V(j) + \varepsilon(i)] \quad \text{para toda } j \neq i \dots\dots\dots 2.22$$

Y considerando la distribución de probabilidad conjunta $F(\cdot)$ de las componentes aleatorias $\varepsilon(1), \varepsilon(2), \dots, \varepsilon(i), \dots, \varepsilon(N)$, para N opciones disponibles, así como la función de densidad marginal de la componente aleatoria i , $f_i(\cdot)$, la probabilidad anterior puede ser calculada como:

$$P(i) = \int F[V(i) - V(j) + \varepsilon(i)] f_i(\varepsilon) d\varepsilon \quad \text{para } j \neq i \dots\dots\dots 2.23$$

Para hacer fácil la estimación de los parámetros de la anterior expresión, se consideran hipótesis sobre la distribución de probabilidad conjunta de los errores $\varepsilon(i)$. La primera hipótesis es considerarlos independientes e idénticamente distribuidos (IID) y la segunda, se refiere a la forma de su distribución de probabilidad.

Se definen diferentes métodos de modelización de selección discreta para la distribución de probabilidad de las diferencias $\varepsilon(j) - \varepsilon(i)$; por ejemplo, de probabilidad lineal al suponer una distribución uniforme, o Probit si se supone una distribución normal. Una forma que ha resultado muy utilizada es la Logit²⁸.

²⁸ Métodos de elección discreta en la estimación de la demanda de transporte, IMT, 2011, pag.19

En el modelo Logit, al suponer que los errores $\varepsilon(i)$ tienen una distribución Gumbel²⁹, se puede demostrar que las diferencias $\varepsilon(j) - \varepsilon(i)$ resultan de tener una distribución Logística (Ben-Akiva & Lerman, 1985).

En el segundo término de la expresión (2.21) es la función de distribución acumulada (FDA) de las diferencias $\varepsilon(j) - \varepsilon(i)$, por lo que la probabilidad de elegir la opción “i” en el modelo Logit viene dada por la densidad Logística:

$$P(i) = \frac{e^{V_i}}{e^{V_i} + e^{V_j}} = \frac{1}{1 + e^{-(V_i - V_j)}} \dots\dots\dots 2.24$$

De los modelos Logit más conocidos están los siguientes. Cuando hay dos selecciones posibles, tenemos un modelo Logit Binario; si hay más de dos opciones, se tiene el modelo Logit Multinomial; y si existen semejanzas en algunas opciones que se puedan “anidar” en una clasificación común, se obtiene un modelo Logit Anidado.

Modelo Logit Multinomial (MNL)

El MNL es el modelo de elección discreta más sencillo y el más utilizado para la estimación de la demanda.

$$P_{iq} = \frac{\exp(\beta V_i)}{\sum \exp(\beta V_j)} \dots\dots\dots 2.25$$

El parámetro β cuyo valor en la práctica se normaliza a uno porque no puede ser estimado separadamente de los parámetros θ representantes en V .

Para decidir qué variables $X_k \in X$ (genéricas o específicas para una alternativa en particular) deben ser insertadas en la función de utilidad, se suele efectuar un proceso “paso a paso” (step – wise, parecido al que se usa en las regresiones múltiples) en el que se comienza por una especificación general que sea teóricamente atractiva (Ortuzar, 1982). Después en cada paso del proceso se analiza las variaciones posibles para comprobar si la variable analizada añade poder explicativo al modelo.

Si para todos los individuos q que tienen disponible una alternativa dada A_j se definiese uno de los valores de x como igual a uno, entonces el coeficiente θ correspondiente a esta variable se interpretaría como una constante específica de

²⁹ La distribución de Gumbel (llamada así en honor de Emil Julius Gumbel), es utilizada para modelar la distribución del máximo (o el mínimo), por lo que se usa para calcular valores extremos. La aplicabilidad potencial de la distribución de Gumbel para representar los máximos se debe a la teoría de valores extremos que indica que es probable que sea útil si la muestra de datos tiene una distribución normal o exponencial.

la alternativa. Aunque se puede especificar una constante para cada alternativa, dada la forma en la que trabaja el modelo no es posible estimar N parámetros individualmente, como se muestra en la siguiente expresión.

$$V_i = \theta_0 + \theta_1 X_{i1} + \dots + \theta_k X_{ik} \dots\dots\dots 2.26$$

Por este motivo, una se toma como referencia (sin pérdida de generalidad su valor puede ser fijado en cero) de forma que los restantes (N-1) valores obtenidos en el proceso de estimación se interpreten como valores relativos respecto al citado valor de referencia. El resto de las variables x pueden ser de uno de los dos siguientes tipos:

1. Genéricas, si aparecen en las funciones de utilidad de todas las alternativas y sus coeficientes pueden ser considerados idénticos.
2. Específicas, si no es una hipótesis factible que los coeficientes θ_k sean iguales.

Es importante destacar que el caso más general es aquel que incluye exclusivamente variables específicas.

Propiedades del MNL

El modelo MNL satisface el axioma de independencia de las alternativas irrelevantes (IIA), que puede ser enunciado así:

En el caso de cualquier par de alternativas que tengan una probabilidad no nula de ser elegidas, la razón entre ambas no está influenciada por la presencia o ausencia de otras alternativas adicionales presentes en el conjunto de elección (Luce y Suples, 1965). En el caso del MNL se tiene que el cociente es:

$$\frac{P_i}{P_j} = \exp\{\beta(U_i - U_j)\} \dots\dots\dots 2.27$$

Es una constante, independiente de las utilidades del resto de las alternativas. Al principio esto fue considerado ventajoso, ya que permitía tratar opciones nuevas a futuro (por ejemplo, que no estaban presentes durante la estimación) sin recalibrar el modelo, ya que sólo se requería conocer sus atributos X_k . Sin embargo, pesa más el hecho de que el modelo puede conducir a predicciones sesgadas si algunas alternativas están correlacionadas (son más parecidas entre sí que otras).

Cuando del número de alternativas es muy elevado, como en el caso de la elección de destino, se pudo demostrar (McFadden, 1978) que se obtienen parámetros insesgados estimando el modelo sólo con una muestra aleatoria del

conjunto de elección disponible (p. ej., siete destinos para cada usuario). Los modelos que no presentan dicha propiedad pueden requerir una gran cantidad de tiempo de cálculo para más de 50 alternativas, aunque su proceso de estimación no sea complicado.

Si se estima el modelo con datos para una sub-área, o con datos de una muestra sesgada en términos de la cantidad de usuarios que escoge cada opción, en relación a la población, se puede demostrar que si éste tiene un conjunto completo de constantes específicas (N-1, si hay N opciones como ya demostraremos) y todos los individuos tiene disponibles todas las alternativas, entonces basta recalcularlas para el área total y se obtendrá un modelo insesgado. Las nuevas constantes son:

$$K_i' = K_i - \ln\left(\frac{q_i}{Q_i}\right) \dots\dots\dots 2.28$$

En que q_i y Q_i son las proporciones de mercado de A_i en la muestra y en la población, respectivamente.

Hasta el momento se ha descrito el modelo Logit Multinomial, su forma, la distribución de probabilidad de la que se deriva, y sus propiedades. Que para este caso, los fines de este trabajo de tesis es el modelo que se pretende usar, para en primera instancia, definir las variables del modelo, determinar el conjunto de opciones y estimación de parámetros, con el objetivo de definir y estimar el valor del tiempo del usuario, para estimar la demanda de un proyecto de carretero.

Sin embargo, es pertinente mencionar otros modelos de selección discreta que se han utilizado para la solución de la estimación de la demanda a partir de las elecciones de los usuarios, y son de los más conocidos, los cuáles proporcionan instrumentos de modelización particularmente potente³⁰. A continuación se hace una descripción breve de estos modelos, conocidos como el modelo Logit Jerárquico (HL) y Probit (MNP).

Modelo Logit Jerárquico (HL)

El modelo MNL estudiado, presenta una matriz de covarianza muy simple que, para el caso trinomial es:

$$\Sigma = \sigma^2 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

³⁰ Modelos de transporte, Juan de Dios Ortuzar, Luis G. Willumsen, Universidad de Cantabria, 2008, pag. 333

Esta estructura de matriz de covarianza del MNL puede presentar problemas en los siguientes casos:

- Cuando las alternativas no son independientes (es decir, cuando existen grupos de alternativas más similares que otras como, por ejemplo, modos de transporte público versus el coche privado).
- Cuando hay variaciones de gusto entre los individuos (es decir, si la percepción de los costos varía con el ingreso pero no se han medido esta variable) en cuyo caso se necesitan modelos con coeficientes aleatorios en lugar de modelos que proporcionen valores medios como es el caso del MNL.

El modelo Probit, que puede ser derivado de una distribución normal multivariada (en lugar de una Gumbel IID) presenta una matriz de covarianza completamente general y permite tratar ambos casos anteriores. Sin embargo, no es fácil resolver dicho modelo excepto para casos de muy pocas (hasta tres) alternativas.

Por otro lado, hay ciertos casos en que, aun cuando fuera posible implementar un modelo Probit, su completa generalidad sería innecesaria en cuanto a que pueda intuirse cuál podría ser la forma de las funciones de utilidad.

La elección bidimensional de la combinación de destino (D) y modo (M), donde las alternativas están correlacionadas pero se puede aceptar que no existen variaciones de gustos. En esta situación las alternativas en cada dimensión se pueden denotar como (D_1, \dots, D_D) y (M_1, \dots, M_M) de forma que su combinación genera el conjunto de elecciones A, cuyo elemento general $D_d M_m$ puede representar una alternativa específica destino-modo para llevar a cabo una actividad determinada.

En este tipo de contexto es interesante considerar funciones del siguiente tipo:

$$U(d,m) = U_d + U_{dm} \dots \dots \dots 2.29$$

Donde, por ejemplo, U_d podría corresponder a la porción de utilidad específicamente asociada al destino y U_{dm} a la desutilidad asociada al costo de viaje.

Escribiendo esto de acuerdo a la teoría de elección, nos queda:

$$U(d,m) = V(d,m) + \varepsilon(d,m) \dots \dots \dots 2.30$$

donde:

$$V(d,m) = V_d + V_{dm} \dots \dots \dots 2.31$$

y

$$\varepsilon(d,m) = \varepsilon_d + \varepsilon_{dm} \dots \dots \dots 2.32$$

Se puede demostrar que si los residuos ε son separadamente IID, bajo ciertas condiciones se obtiene el modelo Logit Jerárquico o anidado (HL), cuya forma es:

$$P(d,m) = \frac{\exp\{\beta(V_d + V_d^*)\} \exp(\lambda V_{dm})}{\sum_{d'} \exp\{\beta(V_{d'} + V_{d'}^*)\} \sum_{m'} \exp(\lambda V_{dm'})} \dots \dots \dots 2.33$$

con

$$V_d^* = \left(\frac{1}{\lambda}\right) \log \sum_{m'} \exp(\lambda V_{dm'}) \dots \dots \dots 2.34$$

Además se puede comprobar fácilmente que si $\beta = \lambda$ (lo cual sucede cuando $\varepsilon_d = 0$) el modelo HL colapsa al MNL uniparamétrico. Las expresiones de la utilidad para el primer destino en el caso simple de un modelo binario:

$$U(1,1) = V_1 + V_{11} + \varepsilon_1 + \varepsilon_{11} \dots \dots \dots 2.35$$

$$U(1,2) = V_1 + V_{12} + \varepsilon_1 + \varepsilon_{12} \dots \dots \dots 2.36$$

Como se puede observar, la fuente de correlación es el residuo ε_1 que está presente en ambas funciones de utilidad $U(1,1)$ y $U(1,2)$. Por lo tanto cuando $\varepsilon_d = 0$ tal correlación desaparece y el HL es distinguible del MNL.

Finalmente, se puede probar que para que el modelo sea internamente consistente es necesario que se cumpla la siguiente condición:

$$\beta \leq \lambda \dots \dots \dots 2.37$$

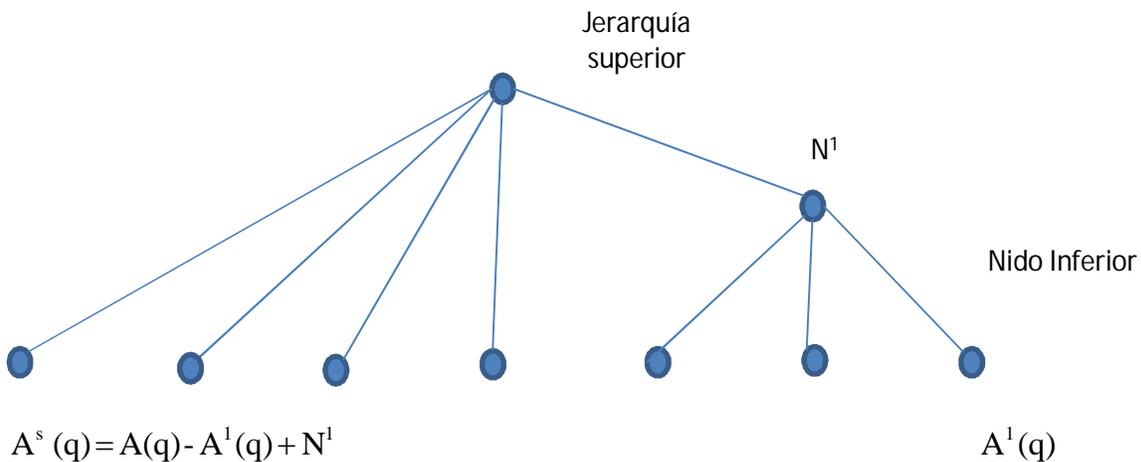
Se ha demostrado que modelos que no satisfacen este requerimiento producen elasticidades de dimensiones y/o signos incorrectos.

El modelo HL en la práctica

Como herramienta práctica de modelización, el HL, se puede exponer para su mejor utilización, de la siguiente forma (Ortuzar, 1980b; Sobel, 1980):

1. Su estructura se caracteriza por agrupar todos los subconjuntos de alternativas correlacionadas (o más similares) en jerarquías o nidos. Cada nido, a su vez, se representa por una alternativa compuesta frente a las demás que están disponibles para los individuos, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 23 Modelo Logit (HL)



Fuente: Elaboración propia con modelos de demanda, Ortuzar

2. El HL se puede estimar secuencialmente utilizando el amplio software disponible para el MNL (aunque en algunos casos su utilización pueda proporcionar serios problemas). En el caso de la figura anterior, se debe estimar primero el MNL de las alternativas $A^1(q)$ pertenecientes al nido inferior N_1 con la precaución de omitir todas aquellas variables (z) que tengan el mismo valor para ese conjunto de opciones (ya que si no, debido a que el MNL funciona a base de diferencias, no se podrían estimar sus parámetros). Estas variables, de hecho, han de ser introducidas posteriormente en el nido superior pues afectan a la elección entre la alternativa compuesta N_1 y el resto de las alternativas que pertenecen a $A^s(q)$.
3. La introducción del nido inferior en la jerarquía superior se realiza a través de la alternativa compuesta, a la cual se asocia una utilidad representativa de todo el nido. Así, la utilidad tiene dos componentes: la primera de ellas considera como variable el valor máximo esperado de la utilidad o máxima

utilidad esperada (EMU, Expected Maximun Utility) entre alternativas del nido, y la segunda considera el vector Z de los atributos comunes a todos los miembros del nido. EL EMU tiene la siguiente expresión:

$$EMU = \log \sum_j \exp(W_j) \dots \dots \dots 2.38$$

Donde W_j es la utilidad de la alternativa A_j en el nido, con la excepción de las variables z comunes a todas las alternativas en el nido $A^1(q)$: hay que resaltar que esta ecuación tiene exactamente la misma forma que V_d^* en la expresión (8) si $\lambda = 1$. Por lo tanto, la utilidad compuesta del nido es:

$$V_1 = \phi EMU + \alpha Z \dots \dots \dots 2.39$$

donde ϕ y α son parámetros a estimar.

4. Después de realizar lo indicado en los puntos anteriores, debe procederse a estimar un modelo MNL para el nido superior, el cual comprende todas las alternativas compuestas que representan a las jerarquías inferiores más las alternativas que no estuvieran anidadas en dicho nido superior.
5. Finalmente la probabilidad que el individuo q elija la alternativa $A_j \in A^1(q)$ puede calcularse como el producto de la probabilidad marginal de elegir la alternativa compuesta N_1 (en el nido más alto) y de la probabilidad condicionada de elegir la alternativa compuesta

Limitaciones HL

- Tal y como sucede en el MNL, el HL no es un modelo con coeficientes variables y, por lo tanto, no puede tratar problemas de variaciones en los gustos ni heterocedasticidad.
- Permite tratar solamente tantas interdependencias entre alternativas como nidos se hayan especificado en la estructura; además, las alternativas de un nido no pueden estar correlacionadas con las de otros nidos.
- La búsqueda de la mejor estructura HL en ocasiones requiere el análisis tentativo de múltiples estructuras jerárquicas, en cuanto es fácil ver a priori que el número de agrupaciones posibles aumenta geométricamente con el número de alternativas.

- La calibración secuencial del modelo es simple y posible, dada la disponibilidad de software para el MNL, y además produce estimadores consistentes (de hecho al aumentar la cantidad de datos, dichas estimaciones convergen hacia los valores verdaderos de los parámetros). Pese a ello, el enfoque presenta varios problemas potenciales; por ejemplo, si no se dispone de datos suficientes para estimar modelos del nivel inferior, las estimaciones pueden ser ineficientes, tanto porque se omite información en el nivel inferior como porque los errores que se producen pueden transmitir a los niveles superiores.

Modelo Probit Multinomial

El modelo Probit, que puede ser derivado de una distribución normal multivariada con media cero (en lugar de una Gumbell IID) presenta una matriz de covarianza completamente general; esto significa que las varianzas pueden ser diferentes y los términos del error pueden estar correlacionados de cualquier manera. Esta estructura tan general crea, el problema de no permitir escribir el modelo de modo tan simple como se hizo para el MNL (salvo para el caso binario) y, por lo tanto, para resolver numéricamente es necesario realizar diferentes aproximaciones.

El modelo Probit Binario

En el caso de que haya dos alternativas, las expresiones de la utilidad se pueden escribir así:

$$U_1(\theta, Z) = V_1(\theta, Z) + \varepsilon_1(\theta, Z) \dots\dots\dots 2.40$$

$$U_2(\theta, Z) = V_2(\theta, Z) + \varepsilon_2(\theta, Z) \dots\dots\dots 2.41$$

donde $\varepsilon(\theta, Z)$ es la distribución normal bivariada $N(0, \Sigma)$ con:

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \rho\sigma_1\sigma_2 \\ \rho\sigma_1\sigma_2 & \sigma_2^2 \end{pmatrix} \dots\dots\dots 2.42$$

En que ρ es el coeficiente de correlación entre U_1 y U_2 . Y la probabilidad de elegir alternativa 1 es:

$$P_1(\theta, Z) = \text{Prob}\{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \leq V_1 - V_2\} \dots\dots\dots 2.43$$

Pero, siendo la distribución normal cerrada respecto a la suma y a la resta (en tanto que la Gumbel es cerrada respecto a la maximización), se obtiene que $(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$ distribuye normal univariada $N(0, \sigma)$ donde:

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\rho\sigma_1\sigma_2 \dots\dots\dots 2.44$$

Dividiendo $(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$ por σ_{ε} se obtiene la normal estándar $N(0,1)$; por lo tanto se puede escribir la probabilidad de elección de un modelo probit binario, de forma más concisa como:

$$P_1(\theta, Z) = \Phi[(V_1 - V_2)/\sigma_{\varepsilon}] \dots\dots\dots 2.45$$

En que $\Phi[x]$ es la distribución normal acumulada estándar que está tabulada. Este modelo sencillo es completamente general para el caso de elecciones binarias.

Cabe señalar que la ecuación $P_1(\theta, Z)$ no es directamente estimable, ya que los parámetros θ presentes en las utilidades representativas V no pueden ser estimados separadamente de las desviaciones estándar σ_{ε} . De hecho, tal y como sucede en los modelos MNL y HL, es necesario normalizar antes de obtener una estimación de los parámetros del modelo; en el caso del modelo probit, la normalización consiste en fijar al menos uno de los elementos de σ_{ε} , en un valor constante.

3 Valor subjetivo del tiempo

Para la estimación de la demanda de un proyecto carretero con cobro de cuota, se definió el modelo de transporte, que está formado por los modelos de oferta y demanda. El modelo de oferta lo define la red vial con sus características físicas y operativas, y en el futuro, se incluirá la nueva carretera que se integrará a la red vial existente, dentro de un área de interés definida. El modelo de demanda se ha definido a partir de tomar como base el modelo clásico de transporte.

Dentro de dos etapas o fases de las que consta el modelo clásico, la selección del usuario es la que define y estima la demanda del sistema de transporte. Estas etapas son la de selección modal y asignación de rutas. En este caso, el interés se centra en la asignación. Ya que, al usuario se le presenta la alternativa de usar una nueva carretera contra las demás vías que utiliza para realizar su viaje actualmente, y cada alternativa le ofrece un beneficio diferente.

Por lo que la selección del usuario va a depender de sus características socioeconómicas, y de los atributos de cada una de las alternativas que se le presenten. De tal forma, que la probabilidad de que un individuo escoja una cierta opción, es una función de sus características socioeconómicas y de lo atractiva que resulten las alternativas.

Para representar lo atractivo de las alternativas se suele utilizar el concepto de utilidad (que se define, como lo que el individuo desea maximizar). Y los modelos que permiten trabajar con estas opciones son los modelos de selección discreta o modelos de segunda generación, ya que toman en cuenta la decisión del viajero que le deja mayor rango de utilidad.

Los modelos de selecciones discretas toman como marco de referencia la teoría de la utilidad aleatoria, que considera la falta de información precisa para describir por completo atributos de las opciones o características socioeconómicas de los viajeros. Por lo que, estos modelos describen las preferencias de los viajeros en términos de probabilidad. Y de los modelos más conocidos son el modelo Logit, y una de sus variantes es el modelo Logit Binario, que considera dos selecciones posibles, en este caso, una carretera con cobro de cuota, y una carretera libre de cuota.

3.1 Modelo Logit Binario

En la sección 2.7 se describió algunos modelos de selección discreta que ayudan a la estimación de la demanda. De tal manera, que a partir del Modelo Logit Multinomial (MNL) se deriva el modelo Logit Binario o Binomial.

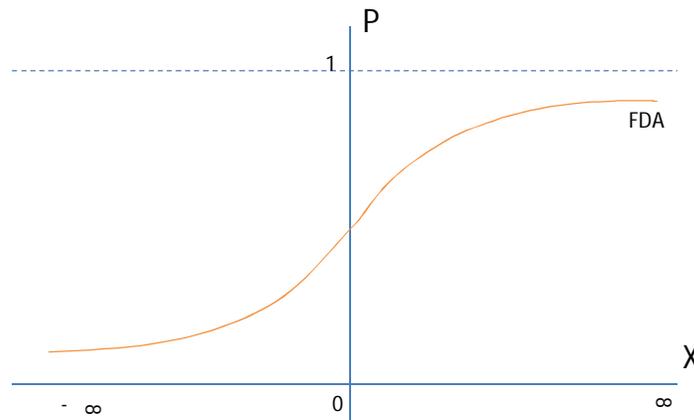
A partir de presentar a un usuario escenarios hipotéticos de usar una nueva carretera contra la que viene usando, la respuesta que puede dar es: usar o no usar la nueva vía. La respuesta es una variable binaria dicótoma. Es una respuesta cualitativa.

En los modelos donde Y es cualitativa, el objetivo es encontrar la probabilidad de que un acontecimiento suceda, como en este caso usar una nueva carretera. Por lo tanto, los modelos de regresión con respuestas cualitativas a menudo se conocen como modelos probabilísticos. Y un método para desarrollar un modelo de probabilidad para una variable de respuesta binaria es el modelo Logit Binomial. Dentro de sus características que lo definen están:

- A medida que X_i aumente, $P_i = E(Y = 1 | X)$ aumente pero nunca se salga del intervalo 0-1.
- La relación entre P_i y X_i es no lineal, es decir, “uno se acerca a cero a tasas cada vez más lentas, a medida que X_i se hace más pequeño; y se acerca a uno a tasas cada vez más lentas a medida que X_i se hace muy grande”.

Geoméricamente, el modelo que se desea tendría la forma de la siguiente figura. Obsérvese en este modelo que la probabilidad se encuentra entre 0 y 1 y que este varía en forma no lineal.

Figura 24 Curva S de probabilidades del modelo LOGIT



Fuente: Elaboración propia con información de Econometría, Damodar N. Gujarati

El sigmoide o curva en forma de S se parece mucho a la función de distribución acumulativa (FDA) de una variable aleatoria. Por consiguiente, se puede utilizar la FDA en regresiones de modelos en los cuales la variable de respuesta es

dicótoma, adquiriendo valores 0-1. Y las FDA comúnmente seleccionadas para representar modelos de respuesta 0-1 son los modelos Logit.

El modelo Logit Binomial considera solamente dos opciones para elegir, como es el caso más simple de considerar para un viaje los atributos del costo y tiempo. Considerando las componentes sistemáticas de la utilidad para las dos opciones como U1 y U2, el modelo más general para la probabilidad de que la opción 1 sea elegida es:

$$P(1) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda(U_1 - U_2)}} \dots\dots\dots 3.1$$

donde,

λ : es un parámetro de dispersión de calibración para el modelo.

U1: Es la utilidad de la opción 1

U2: Es la utilidad de la opción 2

La mayoría de los modelos de elección discreta parten de la teoría de la utilidad aleatoria donde se postula que el individuo q asocia a cada alternativa (i) una utilidad de tipo estocástico (Uiq), eligiendo aquella alternativa que maximiza su utilidad.

Las funciones de utilidad van a estar definidas a partir de las características de cada una de las alternativas. En este caso, variables significativas como tiempo y costo de viaje pueden ayudar a la elección de un usuario.

3.2 Parámetros del modelo Logit Binomial

Las variables y parámetros que definen al modelo Logit Binomial, para el caso de la estimación de la demanda de un nuevo proyecto carretero, son las funciones de utilidad de cada una de las alternativas y el parámetro de dispersión λ .

El parámetro λ está inversamente relacionado con la varianza desconocida de los errores a través de la expresión:

$$\lambda^2 = \frac{\pi^2}{6\sigma^2} \dots\dots\dots 3.2$$

Es importante señalar que en la aplicación práctica del modelo el factor de escala λ se normaliza (típicamente suponiendo igual a uno)³¹; esto no tiene

³¹ Modelación de demanda para carreteras de cuota, SCT, Transconsult, Steer Davies Gleave, 2006.

consecuencias en los resultados. Pero si se requiere su estimación, se puede realizar con el método de máxima de verosimilitud³².

El otro parámetro que forma parte del modelo, son las funciones de utilidad de las alternativas para realizar el viaje. La función de utilidad en los modelos de demanda de transporte ha incluido tradicionalmente como variables explicativas el tiempo y costo de viaje.

3.3 Función de utilidad de un nuevo proyecto carretero

Del modelo Logit Binomial, resulta claro que dos opciones que tengan exactamente los mismos valores de utilidad en sus componentes sistemáticas obtendrán la misma probabilidad de ser elegidas por el usuario. Sin embargo, el hecho de que dos alternativas coincidan en atributos, por ejemplo, tanto en tiempo de viaje como en costo, no significa que sean exactamente iguales. Factores como la comodidad, la seguridad, las vistas escénicas, etc. pueden afectar la decisión que toma el usuario; aun cuando los atributos básicos de tiempo y costo sean los mismos.

La imposibilidad de apreciar, por parte del analista de transporte, todos los atributos y variaciones en los gustos que rigen el comportamiento de los individuos (en este caso, recolectados de la aplicación de una encuesta de preferencia declarada, PD), así como los errores de medición, hacen necesario considerar que la utilidad es la suma de dos componentes diferenciados:

$$U_{iq} = V_{iq} + \varepsilon_{iq} \dots\dots\dots 3.3$$

Donde V_{iq} es un componente determinístico que es función de los atributos medibles, y ε_{iq} es un componente aleatorio o estocástico, que recoge todo lo que el analista es incapaz de medir y permite explicar aparentes irracionalidades.

Y de acuerdo a la teoría de la maximización de la utilidad, el individuo q elige la alternativa i, si:

$$V_{iq} + \varepsilon_{iq} \geq V_{jq} + \varepsilon_{jq} \Rightarrow V_{iq} - V_{jq} \geq \varepsilon_{jq} - \varepsilon_{iq} \dots\dots\dots 3.4$$

Dado que no se conoce $\varepsilon_{jq} - \varepsilon_{iq}$, no se puede asegurar si la expresión pasada se cumple o no y, por lo tanto, se plantea la probabilidad de ocurra. De este modo, la probabilidad de escoger la alternativa i viene dada por:

³² El método de máxima verosimilitud, parte de considerar información individual, y está dada por la multiplicación de probabilidades de seleccionar la opción realmente elegida por el viajero.

$$P_{iq} = \text{Prob} \left\{ \varepsilon_{jq} \leq \varepsilon_{iq} + (V_{iq} - V_{jq}), \forall_j \in A(q) \right\} \dots\dots\dots 3.5$$

donde,

A: son las alternativas a seleccionar por el usuario.

Los residuos ε , son variables aleatorias con media cero. Y la expresión que se adopta para la componente determinístico de la utilidad es una función lineal en los atributos y en los parámetros.

$$V_{iq} = \sum_{k=1}^k \theta_{ik} x_{ikq} \dots\dots\dots 3.6$$

Siendo x_{ikq} el valor que toma el atributo K-ésimo para el individuo q y θ_{ik} el parámetro ligado a dicho atributo, que se considera constante para todos los individuos aunque puede variar entre alternativas.

Dentro de la práctica la función de utilidad que se define para que se pueda reproducir la respuesta de los usuarios en cuanto a sus preferencias, es de la siguiente forma:

$$U_{iq} = \alpha \cdot \text{Costo} + \beta \cdot \text{Tiempo} + \gamma \cdot \text{VS} + \varepsilon \dots\dots\dots 3.7$$

donde:

Ui: Utilidad de la opción i (adimensional).

Costo: Precio en \$ por utilizar la opción i.

Tiempo: Tiempo de viaje en minutos de la opción i.

VS: Variable subjetiva de valorización de la opción i, esta puede cambiar de acuerdo a la percepción del usuario, como por ejemplo, seguridad, comodidad, etc.

$\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon$ son constantes de calibración para cada estrato o categorización de la demanda de un área de interés.

La definición y estimación de la utilidad es clave para la predicción de la selección del viajero individual, y consecuentemente, la determinación de demanda de viajes. Específicamente, se asumirá que los viajeros siempre seleccionaran la alternativa de viaje (o combinación de alternativas cuando se realizan muchas selección juntas) las cuales ofrecerán la máxima utilidad.

3.4 Tiempo del usuario

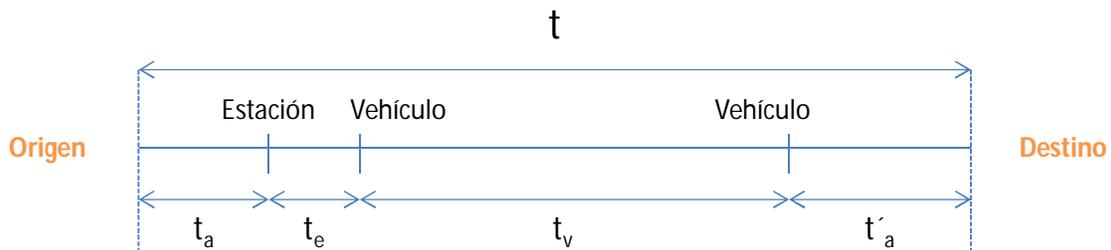
El tiempo constituye un recurso fundamental del que todos los individuos están dotados en la misma cantidad fija (24 horas diarias). De esta manera, puede asignarlo en distintas formas con el fin de realizar diferentes actividades y esto tiene diversas consecuencias respecto de sus finanzas y el nivel de utilidad que ellos perciben. Esto se debe, a que no puede ser almacenado y sólo puede ser transferido entre diferentes actividades que sean intercambiables en momento dado.

El tiempo total invertido en cualquier desplazamiento (t), puede descomponerse de acuerdo con las diferentes fases o etapas del viaje. Aunque existen clasificaciones alternativas, suelen distinguirse al menos tres componentes: el tiempo de viaje en el vehículo (t_v), el tiempo de espera (t_e) y los tiempos de acceso (t_a , t'_a) de manera que:

$$t = t_v + t_e + t_a + t'_a \dots\dots\dots 3.8$$

La siguiente figura representa esquemáticamente cada uno de estos tiempos desde el momento en que el viajero (o la mercancía) parte de su origen hasta alcanzar su destino.

Figura 25 Desagregación del tiempo de viaje



Fuente: Elaboración propia con información de Economía del Transporte, Ginés de Rus/Javier Campos/Gustavo Nombela

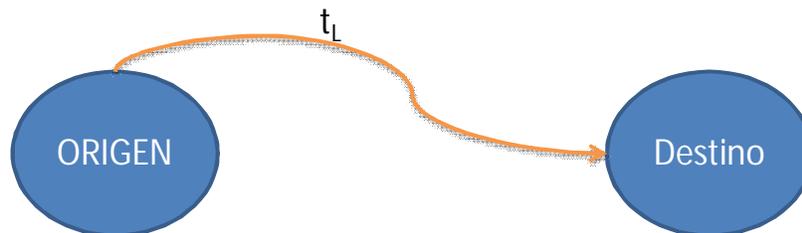
El tiempo de viaje en el vehículo (t_v) incluye el periodo transcurrido desde que el pasajero sube al vehículo hasta que lo abandona. El tiempo de espera (t_e) en un viaje incluye el periodo que transcurre desde que el viajero o las mercancías están dispuestos para abordar el vehículo hasta que efectivamente lo hacen.

Y el tercer componente del tiempo total son los tiempos de acceso (t_a), que incluye lo que se tarda desde el punto exacto de origen (casa, trabajo, otros lugares) hasta que comienza el tiempo de espera y desde que éste termina tras descender del vehículo hasta alcanzar el punto exacto de destino (casa, trabajo, otros lugares). La diversidad de orígenes y destinos entre distintos usuarios hace que

muchas veces no se calculen estos tiempos como parte integrante del viaje, y se hable en su lugar de tiempo “centro a centro” tomando un origen y destino genérico para todos los viajeros. Sin embargo, cuando las distancias totales recorridas son relativamente cortas, los tiempos de acceso tienen un peso relativo muy alto.

Finalmente, es importante observar que en muchas actividades de transporte no resulta inmediato distinguir los límites entre cada uno de los tres componentes anteriores del tiempo, como se muestra en la siguiente figura.

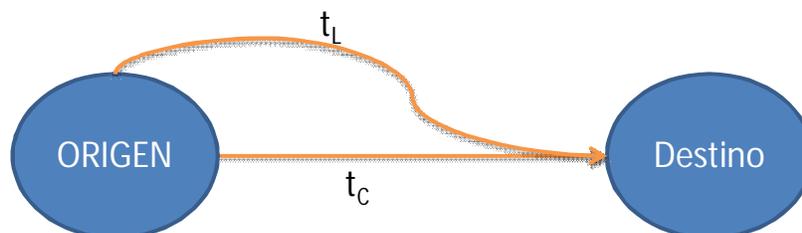
Figura 26 Tiempo de punta a punta



Fuente: Elaboración propia

El tiempo t_L , representa un tiempo de centro a centro, no se distingue o define otro tiempo, entre el origen y destino del viaje. En la práctica, dentro de los estudios de la estimación de la demanda de proyectos carreteros, se considera los tiempos de viaje, a partir de considerar un origen y destino genérico para todos los viajeros de cada par de viaje de la matriz de demanda. Partiendo de este concepto, se considera el tiempo de viaje que se realiza en el nuevo proyecto carretero, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 27 Tiempo de punta a punta: comparación de alternativas



Fuente: Elaboración propia

En la figura, se puede observar que la nueva carretera proporciona un ahorro de tiempo, debido a que, $t_c < t_l$, obteniendo un Δt , lo que es un beneficio proporcionado para el usuario. Las unidades más usuales son hora y minutos, dependiendo la exactitud que se requiera.

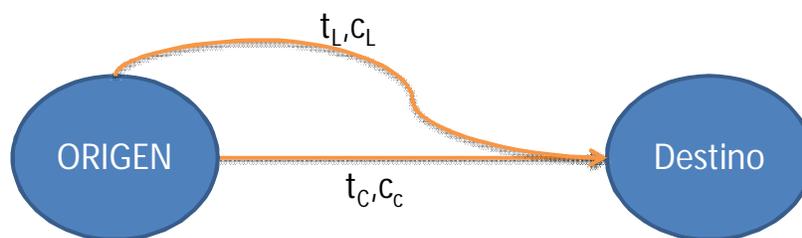
3.5 Costo del viaje

Como decisión individual, la demanda de transporte depende de un conjunto de variables monetarias y no monetarias. De tal forma, que la estimación del costo de viaje consiste en conocer los costos que cada usuario genera para trasladarse de un origen a un destino, a través de la red vial del área de interés.

Los costos que se generan por el viaje son los costos por pago de cuota por usar una vía y costos de operación. Los costos de operación, la mayoría de los analistas de transporte no los consideran dentro de la selección del usuario, debido a que mucho de los costos operativos no están presentes en las mentes de las personas al momento de decidir qué camino utilizar³³. Sin embargo, tienen presente el tiempo de viaje y el valor de la cuota, si la hubiera dentro de su recorrido.

El viaje entre un origen y un destino determinado, un usuario tiene un propósito y dispone de un conjunto finito y discreto de alternativas de vías de transporte. Para el caso de una nueva carretera con cobro de cuota (C_a), usualmente ofrece mejores tiempos de recorrido (t_a), mientras que la vía alterna, por lo general no cobra cuota (C_L) pero el tiempo de recorrido (t_L) suele ser mayor.

Figura 28 Características operativas de las alternativas



Fuente: Elaboración propia

³³ Desarrollo de una metodología para la elaboración de estudios de demanda y de asignación de tránsito en proyectos de infraestructura carretera, Cay y Mayor y Asociados, S.C., 2004

En la figura, se observa que al igual que hay un Δt , también hay una diferencia de costos por cada una de las alternativas que se le presenta al usuario para realizar su viaje. El costo de $c_L < c_C$, esta diferencia se presenta más dentro de la práctica, ya que, en la mayoría de los casos, la circulación por la nueva carretera representa una tarifa (\$/km), y por la vía alterna por lo regular no existe cobro de tarifa.

3.6 Valor subjetivo del tiempo

En el análisis realizado hasta ahora solo se ha considerado el valor del tiempo de viaje de manera de un sumando a la función de utilidad. Sin embargo, la teoría en que se basa la valoración del tiempo de viaje tiene como supuesto básico que cada individuo asigna sus recursos con el fin de maximizar su satisfacción personal o utilidad directa. De tal forma, el usuario está dispuesto a pagar por ahorrar tiempo en su viaje.

Introducción

En la mayoría de las ocasiones la determinación de la cantidad total del tiempo que un usuario invierte en el transporte y la desagregación de dicho tiempo en sus distintos componentes es sólo el primer paso en el cálculo de la utilidad que supone para ese usuario realizar tal actividad. El paso siguiente consiste en la asignación de un valor a dicho tiempo. Esta cuantificación siempre resulta difícil, porque el tiempo es un recurso limitado que puede ser asignado de forma diferente por cada persona según sus circunstancias.

La variable tiempo y su valoración en términos monetarios es un insumo de gran importancia para determinar los beneficios derivados de ahorros en tiempos de recorrido, que impactan en la función de utilidad, el cuál es un elemento básico en los estudios de pronóstico de la demanda, así como de los análisis de factibilidad económica y financiera.

Al considerar que los beneficios por concepto de ahorro de tiempo son el ítem más importante de los proyectos de mejoramiento a los sistemas de transporte en todas partes del orbe, y a pesar de su importancia, no se ha logrado llegar a un acuerdo sobre el tamaño y naturaleza de los valores empíricos a ser utilizados en evaluaciones de proyectos³⁴.

Las dificultades prácticas asociadas a medir el valor del tiempo en forma directa han incentivado métodos indirectos que implican la utilización de modelos desagregados de demanda. Sin embargo, aparecen problemas importantes en

³⁴ Modelos de demanda de transporte, Juan De Dios Ortuzar, 1994, pag. 233

relación a cómo seleccionar una muestra apropiada³⁵ (esto es, que contenga básicamente personas con una real elección entre alternativas claramente definidas en términos de tiempo y costo de viaje), cómo medir los atributos (evitando sesgos de agregación y percepción) y que función de demanda utilizar, que sea consistente con la situación estudiada.

Marco teórico del valor del tiempo

El fundamento teórico de cualquier medición del valor del tiempo se encuentra de nuevo en el comportamiento del consumidor individual. La teoría en que se basa la valoración del tiempo de viaje tiene como supuestos básicos:

1. Que cada individuo asigna sus recursos de modo de maximizar su satisfacción personal o utilidad.
2. Reconocer que el tiempo constituye un recurso económico fundamental del que todos los individuos están dotados en la misma cantidad (24 horas diarias).
3. Las distintas asignaciones del recurso tiempo a las actividades que enfrenta el individuo tienen distinto valor y este puede ser medido en dinero.

Cabe señalar, que las personas tienen la libertad para asignar su tiempo en distintas formas con el fin de realizar diferentes actividades; esto tiene diversas consecuencias respecto a sus finanzas y el nivel de utilidad que perciben. Y que una característica importante del tiempo es, que a diferencia del dinero, no puede ser almacenado y solo puede ser transferido entre diferentes actividades que sean intercambiables en un momento dado.

Por lo tanto, las transferencias de actividades tienen un valor monetario; esto es, un individuo estaría dispuesto a aumentar sus horas de trabajo reduciendo sus horas de ocio a cambio de un cierto salario. Del mismo modo, puede estar dispuesto a usar un medio de transporte más lento si es más barato o a pagar una tarifa mayor por un viaje más rápido.

³⁵ El tamaño de la muestra que considera cada estrato y por cada elección se debe contar como mínimo 50 muestras con suficiente variación de datos (Desarrollo de una metodología para la elaboración de estudios de demanda y de asignación de tránsito en proyectos de infraestructura carretera, C&M, 2004). Lo ideal es que la muestra se encuentre dentro de 60 a 100 individuos encuestados por estrato, Modelling Transport, Third Edition, Juan de Dios Ortuzar & Luis G. Willumsen 2001.

El tiempo de trabajo no es una variable que el individuo pueda elegir, sino que es una constante externa³⁶. Con esto, el tiempo de trabajo desaparece del planteamiento del problema del consumidor y se puede suponer que el ingreso monetario total disponible por el individuo es un dato fijo. Consecuentemente, su tiempo total disponible pasa a ser igual a 24 horas diarias menos el tiempo requerido para las necesidades biológicas básicas y el tiempo dedicado al trabajo.

La formulación del modelo considera como variables, el consumo (de un bien generalizado) y el tiempo gastado en una actividad generalizada. Además, se incluyen los tiempos de viaje y tarifas correspondientes a alternativas de transporte mutuamente excluyentes. La función de utilidad, que depende de las variables anteriores, está sujeta a las siguientes restricciones:

- Restricción de presupuesto monetario.
- Restricción de presupuesto temporal.
- Restricción de tiempo mínimo de actividades realizadas por el individuo (restricción tecnología).

Al maximizar una aproximación lineal de la utilidad directa sujeto a las restricciones, se puede obtener una expresión para la, así denominada, utilidad indirecta, (con base a la cual se supone que el individuo elige una determinada alternativa de transporte), que solo depende en forma lineal de los atributos o características de cada alternativa, en este caso, tiempo y costo del viaje.

Considerando como base la función de utilidad indirecta para la estimación del valor subjetivo del tiempo de viaje (VST o VOT, por sus siglas en ingles), los valores de los coeficientes de tiempo y costo de viaje corresponden a las utilidades marginales de estos atributos. De tal forma, que la razón entre los coeficientes de las variables discretas tiempo y costo de viaje, puede interpretarse como el valor subjetivo del tiempo ahorrado en viajar por la alternativa A_i , esto es:

A partir de:

$$U_{iq} = V_{iq} + \varepsilon_{iq} \dots\dots\dots 3.9$$

Se tiene que la utilidad indirecta:

$$V_{iq} = \sum_{k=1}^k \theta_{ik} x_{ikq} \dots\dots\dots 3.10$$

³⁶ Modelos de demanda de transporte, Juan De Dios Ortuzar, 1994, pag. 234

Y considerando los atributos que definen la utilidad, se tiene:

$$V_{iq} = \alpha \cdot \text{Costo} + \beta \cdot \text{Tiempo} + \gamma \cdot VS \dots\dots\dots 3.11$$

Por lo que el valor subjetivo del tiempo es:

$$VST \text{ ó } VOT = \frac{\beta}{\alpha} \dots\dots\dots 3.12$$

Cabe señalar, que para la estimación del VST no solo depende de los parámetros del tiempo y costo, sino también de las características socioeconómicas y condicionales del viaje de los individuos encuestados. Por lo que se hace necesario considerar las siguientes proposiciones:

- a) Dado que el coeficiente del costo de viaje (α), es la variable de la restricción monetaria de presupuesto y representa, una aproximación a la utilidad marginal del ingreso, su valor debería decrecer con el ingreso.

- b) Dado que el coeficiente de la variable tiempo de viaje representa la diferencia entre el valor del tiempo dedicado a viajar en la alternativa A_i y el valor del tiempo de ocio, es lógico esperar que:
 - i) Dicho valor sea mayor cuanto más desagradables sean las condiciones de viaje.

 - ii) El valor sea mayor para individuos más ocupados (como por ejemplo, su motivo de viaje sea trabajo).

 - iii) El valor del coeficiente de la variable tiempo será menor mientras mayores sean las restricciones que el individuo enfrenta para utilizar en ocio el tiempo ahorrado en viajar.

El marco teórico supone que el individuo puede transferir libremente tiempos ahorrados en una actividad a otras, lo que no siempre se cumple en la práctica, ya que distintos individuos pueden enfrentar distintas restricciones adicionales para realizar tales transferencias.

El modelo de elección discreta planteado para la estimación de la demanda y las consideraciones de teoría micro-económicas del valor del tiempo del usuario para viajar por una alternativa A_i , proveen una sólida base para modificar la forma tradicional en que se ha estimado el valor del tiempo de viaje.

Segmentación de la demanda para la estimación del valor subjetivo del tiempo (VST)

A partir de definir el VST como la razón entre el coeficiente de tiempo y el coeficiente de viaje. El enfoque de la estimación del VST consiste en realizar un conjunto de segmentaciones del modelo, de acuerdo a las características socioeconómicas de los usuarios considerados y las condiciones en que realizan su viaje, que da como resultado la estimación de distintos valores del tiempo de viaje para cada segmento de demanda. A forma de ejemplo, la siguiente tabla muestra una segmentación de la demanda a partir de la estimación del VST.

Tabla 2 Ejemplo de segmentación de la demanda para estimar su VST

Periodo	Motivo	Nivel ingreso
hora pico	Trabajo	Alto
	Escuela	
	Recreación	

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar de la tabla, que la segmentación de la demanda está referida a un periodo del día, a su motivo del viaje y al nivel de ingreso de los usuarios. La segmentación estará definida de acuerdo al tipo de proyecto y al área de interés en estudio que se desarrolla, y el nivel de detalle que se requiera.

Este procedimiento ha permitido mejorar la calidad de las estimaciones realizadas, ya que considera las diferencias en las características socioeconómicas de los usuarios y los atributos de las alternativas, lo que influye en la selección de un usuario. En el caso de segmentar por nivel de ingreso, un usuario con mayor ingreso, tiene en general mayores oportunidades de realizar actividades distintas, pero también tiene mayores demandas sobre el tiempo disponible, por lo que al presentarle una ruta que ayude a disminuir su tiempo de viaje con cobro de tarifa, la probabilidad de viajar por esa alternativa será mayor, con respecto a una persona que presenta un ingreso bajo.

Finalmente, también deben considerarse segmentaciones según las siguientes características:

- Circunstancias en que se desarrolla el viaje, especialmente orientadas a cubrir diferencias entre modos o rutas. La segmentación se basa, en este caso, en que el tiempo ahorrado en el viaje tendrá mayor o menor utilidad dependiendo de la comodidad y medio ambiente en que este se realice.

- Naturaleza de las restricciones de tiempo que afectan al viaje, que están asociadas al propósito de éste y al período en que se realiza. Esta segmentación se basa en que distintas circunstancias están relacionadas con diferentes posibilidades de ahorrar tiempo en forma útil.
- Tipo de persona: Pretende capturar diferencias en las alternativas disponibles para usar el tiempo ahorrado de viajar, pero se relaciona también con la facilidad para transferir o reprogramar actividades entre períodos. Variables potencialmente interesantes en este sentido son la edad, el sexo de la persona, y ocupación del viajero.

Todas estas características que determinan y definen un segmento de la demanda, se reflejan dentro de la función de utilidad de un usuario en específico. De tal forma, que se tiene diferentes funciones de utilidad dentro de un área de interés, y por lo tanto, diferentes valores subjetivos del tiempo.

Metodología para la estimación del valor subjetivo del tiempo

Los valores subjetivos del tiempo de un área de interés, que se han utilizado para los estudios de nuevos proyectos carreteros, se han obtenido a partir de modelos de selección discreta. Una de las aplicaciones de los modelos de selección discreta que se derivan de la teoría de la utilidad aleatoria es el cálculo de la valoración subjetiva del tiempo, entendida como la disposición a pagar de los individuos por el ahorro de tiempo.

Con este marco de estudio es posible evaluar la estimación del valor subjetivo del tiempo para cada una de los segmentos de demanda, encontrados a partir de los datos de una encuesta de preferencia declarada que recolecta las características socioeconómicas y atributos de las diferentes alternativas.

Dado un modelo desagregado de demanda estimado con elecciones observadas, preferencias declaradas, y que incluya atributos como tiempo y costo de viaje, se suele tener:

$$V_{iq} = \alpha \cdot C_i + \beta \cdot T_i + \gamma \cdot VS \dots\dots\dots 3.13$$

donde:

α : Coeficiente de costo de viaje.

β : Coeficiente de tiempo de viaje.

C_i : Costo del viaje por una alternativa A_i .

T_i : Tiempo de viaje por una alternativa A_i .

γ : Coeficiente de la variable subjetiva del viaje, como por ejemplo, seguridad, confort.

V_S : Valor de la variable subjetiva del viaje, por ejemplo, en el caso de seguridad se puede orientar a las estadísticas de accidentes sobre la carretera.

La forma adecuada de calcular el valor del tiempo es encontrar la tasa de sustitución entre tiempo y costo de viaje a utilidad constante. En general, este enfoque conduce a la siguiente expresión:

$$VST = - \left. \frac{dc_i}{dt_i} \right|_V = \frac{\partial V_i / \partial t_i}{\partial V_i / \partial c_i} \dots\dots\dots 3.14$$

Así, para la expresión anterior se obtiene

$$VST \text{ ó } VOT = \frac{\beta}{\alpha} \dots\dots\dots 3.15$$

En particular, el valor subjetivo del tiempo es la tasa marginal de sustitución entre el tiempo de viaje y el costo del mismo, y mide la disposición a pagar de los usuarios por ahorrar tiempo de viaje. Cuando se especifica una función de utilidad lineal, el valor del tiempo es el cociente entre el parámetro del tiempo y el del costo de viaje.

Si la especificación del costo es directa (\$), el VST resultará en \$/min; si en cambio se expresa como costo partido por ingreso (ya sea tasa salarial, o tasa de gasto), el VST se obtendrá como porcentaje de ingreso.

A partir del modelo de selección discreta que se defina, se tendrá la posibilidad de estimar los coeficientes de tiempo y costo directo de viaje. Por lo que, se tendrá que calibrar el modelo, y en este caso el modelo de selección discreta es un modelo Logit, binomial. Como el siguiente:

$$P(1) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda(U_2 - U_1)}} \dots\dots\dots 3.16$$

donde:

U_1 : Utilidad por viajar por la alternativa A_1 .

U_2 : Utilidad por viajar por la alternativa A_2 .

λ : Parámetro de dispersión de calibración para el modelo.

3.7 Calibración del modelo Logit Binomial

Introducción

Para la selección de ruta, se definió el modelo de selección discreta, Logit Binomial, que toma como marco de referencia la teoría de la utilidad aleatoria. Debido a que, este modelo describe las preferencias de los viajeros en términos de probabilidad, y considera la falta de información precisa para describir por completo atributos de las opciones o características de los viajeros.

Y a partir de sus aplicaciones que se derivan de la teoría de la utilidad aleatoria, el modelo de selección permitirá calcular el valor subjetivo del tiempo, que se define a partir de la razón entre el coeficiente de tiempo y costo del viaje, que se encuentran dentro de la función de utilidad de cada alternativa.

En la práctica, se busca que el modelo replique el comportamiento de los usuarios, por lo que el analista o modelador de transporte muestrea las distintas situaciones que pueden ocurrir y se acerquen a la realidad de la situación. De tal forma, se comprueba que no conoce directamente la forma de las funciones de utilidad ni los valores numéricos de los coeficientes asociados; lo que tiene son variables que describen las características socioeconómicas de los usuarios y los atributos de las alternativas.

Por ello, parte de la modelación del sistema de transporte que se está estudiando, es proponer una forma de la función de utilidad, y buscar un proceso para estimar los valores de cada uno de los coeficientes del modelo de selección discreta definido, y permitan estimar la demanda y el valor subjetivo del tiempo (VST ó VOT).

Forma de la función de utilidad

La definición de la función de utilidad va a depender de las variables significativas que interesen ser evaluadas dentro del proyecto, y también a la disposición de esta información.

En el caso de la selección de ruta, como se ha venido mencionando son dos variables significativas que definen una alternativa de otra, son el tiempo y costo de viaje. Sin embargo, últimamente se ha venido incluyendo variables cualitativas como la seguridad, comodidad, etc., variables que se pueden mediar a partir de la estadística de otra variable cuantitativa.

Considerando esto último, en la práctica, la función de utilidad más común para la estimación de la utilidad de las alternativas se define:

$$U_{iq} = \alpha \cdot \text{Costo} + \beta \cdot \text{Tiempo} + \gamma \cdot \text{VS} + \text{Cte} \dots\dots\dots 3.17$$

donde:

α : Coeficiente de costo de viaje.

β : Coeficiente de tiempo de viaje.

C_i : Costo del viaje por una alternativa A_i .

T_i : Tiempo de viaje por una alternativa A_i .

γ : Coeficiente de la variable subjetiva del viaje.

VS: Valor de la variable subjetiva del viaje.

Cte: Valores no observados por el modelador o analista de transporte.

Si solo se quisiera dejar en función del tiempo y costo del viaje, la función queda:

$$U_{iq} = \alpha \cdot \text{Costo} + \beta \cdot \text{Tiempo} + \text{Cte} \dots\dots\dots 3.18$$

Cabe señalar, que se estima una función de utilidad para cada estrato definido de la demanda. Por lo tanto, se tiene un VST por cada estrato. La siguiente tabla muestra un VST ó VOT para cada segmento de demanda:

Tabla 3 Ejemplo del VST para cada segmento de la demanda de un área de interés

Tipo de Vehículo	Motivo	Ingreso	Itinerario	CTE	Coeficiente de tiempo	Coeficiente de costo	VST ó VOT
					(1/min)	(1/\$)	(\$/min)
Automóvil	Trabajo	Bajo	Corto	0.0000	-0.0554	-0.0724	0.7642
			Largo	0.0000	-0.0708	-0.0724	0.9768
		Alto	Corto	0.0000	-0.0554	-0.0632	0.8758
			Largo	0.0000	-0.0708	-0.0632	1.1195
	Otros Motivos	Bajo	Corto	0.0000	-0.0473	-0.0724	0.6530
			Largo	0.0000	-0.0627	-0.0724	0.8657
		Alto	Corto	0.0000	-0.0473	-0.0632	0.7484
			Largo	0.0000	-0.0627	-0.0632	0.9921

Fuente: Elaboración propia

Cabe señalar que debido a las unidades que presenta cada uno de los coeficientes, la razón del VST es coeficiente de tiempo entre coeficiente de costo para tener las unidades definidas en el punto que definió el concepto del valor subjetivo del tiempo.

Forma del modelo de selección discreta: Logit Binomial

A partir de la definición de la función de utilidad de cada alternativa (A_i), y considerando que toma la teoría de utilidad aleatoria los modelos de selección discreta, se tiene la siguiente forma del modelo:

A partir de,

$$P(1) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda(U_2 - U_1)}} \dots\dots\dots 3.19$$

Sustituyendo valores en la ecuación anterior los valores de U_1 y U_2 ,

$$P(1) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda(\alpha_2 + \beta C_2 + \gamma V S_2 - (\alpha_1 + \beta C_1 + \gamma V S_1 + CTE))}} \dots\dots\dots 3.20$$

Basado en los datos obtenidos de la encuesta de preferencia declarada, se van a sustituir los valores de las variables de tiempo y costo de viaje, así como los valores de las variables subjetivas. Cabe señalar, que para cada segmento de la demanda del área de interés, se tiene una ecuación de la expresión anterior, por lo que se tendrá un número igual de VST's.

Parámetros a estimar del modelo

A partir del modelo de selección discreta definido, se sustituyen los valores de las variables significativas que se obtuvieron de las selecciones observadas en campo. Dejando los siguientes coeficientes a estimar:

α : Coeficiente de costo de viaje.

β : Coeficiente de tiempo de viaje.

γ : Coeficiente de la variable subjetiva del viaje.

Cte: Error por aquellos valores no observados por el modelador o analista de transporte.

A partir de estimar estos coeficientes se estimara el valor subjetivo del tiempo, y por consiguiente la demanda de cada alternativa analizada.

Para la estimación de cada uno de los parámetros se busca una regresión. A partir del modelo de selección definido, se deberá realizar un ajuste a los datos obtenidos de la encuesta PD lo mejor posible a fin de poder estimar situaciones que aún no han sido observadas.

Justificación del modelo Logit vs modelo de regresión lineal

Un modelo de regresión se construye para predecir el valor medio de una variable aleatoria de interés, cuando se conocen los valores de otras variables consideradas explicativas. De tal forma, que si la variable explicativa X toma el valor x , es el valor esperado condicional de Y cuando X vale x : $E(Y | X = x)$, en términos de los valores de x .

El caso más simple es cuando el valor medio de Y es una función lineal de su variable explicativa y se supone que Y se distribuye normalmente con varianza constante σ^2 :

$$E(Y | X) = \beta_0 + \beta_1 x \dots\dots\dots 3.21$$

Donde β_0 y β_1 son parámetros que se deben estimar. Una formulación alterna de la ecuación de regresión anterior es la siguiente:

$$E(Y | X) = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \dots\dots\dots 3.22$$

Definido de la utilidad de una alternativa A_i , la función es:

$$U_{iq} = V_{iq} + \varepsilon_{iq} \dots\dots\dots 3.23$$

En la que ε es un error aleatorio de media 0 y σ^2 .

Una reformulación de la función para la estimación de los coeficientes, es debido a que un modelo regresión lineal, al modelar las selecciones de un usuario se encuentra:

- Las selecciones de los usuarios pueden manifestarse como un “Sí” (asociado típicamente a un valor 1) o un “No” (asociado a un valor 0).
- Un modelo lineal de los errores aleatorios de la utilidad, con una distribución uniforme, se tendría una función continua de las variables explicativas que no acota la respuesta entre 0 y 1. Y el modelo Logit acota la respuesta entre 0 y 1.
- El supuesto de varianza constante que requiere el modelo lineal para las respuestas de este tipo no se cumple.

El modelo Logit resuelve las limitaciones del modelo de regresión lineal al acotar la respuesta entre 0 y 1, además de que asigna consistentemente probabilidad de 0.5 cuando la diferencia entre utilidades $U_i - U_j$ es cero, con la interpretación de que el usuario le es indiferente una alternativa u otra.

Estimación de los parámetros del modelo Logit

La estimación del modelo de selección discreta Logit, cuando la respuesta sea una variable cualitativa, como por ejemplo el motivo de viaje $Y=1$ (trabajo); $Y=2$ (hogar); $Y=3$ (otros). Se dificulta establecer un esquema de regresión, dado que los valores de las variables de respuesta son en muchos casos especificaciones de rango y no valores numéricos en los que se pueda hacer estadísticas, y sirven de filtros para ser más específico en la estimación del VST. Sin embargo, dentro de la práctica se puede ocupar para estimar el VST de los diferentes segmentos de la demanda.

En un modelo binario donde la respuesta es del tipo dicótoma $Y = 0$ o $Y=1$, y la función de utilidad está definida de la siguiente forma:

$$U_{iq} = \alpha \cdot \text{Costo} + \beta \cdot \text{Tiempo} + \text{Cte} \dots\dots\dots 3.24$$

La probabilidad de selección de un usuario es:

$$P(1) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda(\alpha_2 + \beta C_2 + \gamma V S_2 - (\alpha_1 + \beta C_1 + \gamma V S_1 + CTE))}} \dots\dots\dots 3.25$$

La estimación de los parámetros α, β, γ , no se pueden obtener por el método de mínimos cuadrados ordinarios, debido a las dificultades que presenta como el hecho de que no se acote el valor entre 0 y 1, por lo que la estimación se realiza con el método de máxima verosimilitud.

Método de máxima verosimilitud

En la estimación de los parámetros del modelo Logit, se utiliza normalmente el método de máxima verosimilitud (ML: Maximun Likelihood). El método se basa en la idea de que aunque se puede obtener la muestra de varias poblaciones, una muestra concreta tiene una población más alta de haber sido obtenida de una cierta población que el resto. De tal forma, que utiliza la información de una muestra de la población de un área de interés para estimar los parámetros del modelo Logit que se definió. El objetivo del método es estimar los parámetros (α, β, γ) que hacen que bajo el modelo Logit, la probabilidad de observar los valores obtenidos en la muestra sea máxima.

Para ilustrar esta idea, considérese una muestra n observaciones de una determinada variable $X = \{x_1, \dots, x_n\}$, obtenida de una población caracterizada mediante un parámetro θ (media, varianza, etc.). Al ser X una variable aleatoria, tiene asociada una función de densidad $f(X/\theta)$ que depende de los valores de θ . Por tanto, siendo valores de la muestra independientes, se puede escribir la función de densidad conjunta como:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n / \theta) = f(x_1 / \theta) f(x_2 / \theta) \dots f(x_n / \theta) \dots \dots \dots 3.26$$

La interpretación estadística de esta función es con X como variables y θ fijo. Invertiendo el proceso, la ecuación anterior puede interpretarse como una función de verosimilitud $L(\theta)$. Si se maximiza con respecto a θ , el resultado se denomina estimador de máxima verosimilitud porque corresponde al valor del parámetro que tiene la probabilidad mayor de haber generado la muestra observada. Esta idea puede extenderse al caso de varios parámetros en este caso para α, β, γ .

Supóngase una muestra de q individuos para los cuales se observa su elección (0 ó 1) y los valores x_{ij} para cada alternativa disponible, por ejemplo:

- El individuo 1 selecciona la alternativa 2.
- El individuo 2 selecciona la alternativa 3.
- El individuo 3 selecciona la alternativa 2.
- El individuo 4 selecciona la alternativa 1, etc.

Como las observaciones son independientes, la función de verosimilitud viene dada por el producto de las probabilidades de que cada individuo elija la opción que realmente seleccionó:

$$L(\theta) = P_{21} \cdot P_{32} \cdot P_{23} \cdot P_{14} \dots etc. \dots \dots \dots 3.27$$

La forma general de la función de la máxima verosimilitud es:

$$L(\theta) = \prod_{i,j} P_{jq} \dots \dots \dots 3.28$$

donde: $j =$ ruta elegida

$q =$ Viajero

Para maximizar esta función se procede tomando derivadas parciales respecto a θ e igualando a cero. De tal forma, se maximiza la función $l(\theta)$ que es el

logaritmo natural de $L(\theta)$, más manejable y que conduce al mismo óptimo. Por lo tanto, la función a maximizar es:

$$\ln L(\theta) = l(\theta) = \sum \ln P_{jq} \dots\dots\dots 3.29$$

La maximización de la función $l(\theta)$ se obtiene un conjunto de parámetros estimados θ que distribuyen asintóticamente $N(\theta, S^2)$.

Para la solución de la función, que es la estimación de los parámetros $\alpha, \beta, \gamma(\theta)$, se dispone de software para estimar este modelo, como por ejemplo, ALOGIT, BIOGEME, SOLVER, STATA, etc.

Estadística del ajuste del modelo (nivel de calidad)

La estimación del modelo Logit consistió en la obtención de los parámetros de la función de utilidad definida para cada alternativa (A_i). Sin embargo, conviene examinar y analizar la precisión de la estimación y la significancia de los parámetros calculados³⁷. Todo esto, con el objetivo de seleccionar el modelo más adecuado.

Precisión de los coeficientes

Para analizar la precisión de la estimación del modelo, se puede calcular el error estándar (SE) de cada uno de los parámetros. A partir de esto, se pueden calcular los niveles de confianza para los parámetros. Dentro de la práctica, lo común es el uso de un intervalo de confianza del 95%.

$$\begin{aligned} &\alpha \pm (SE \cdot 1.96) \\ &\beta \pm (SE \cdot 1.96) \dots\dots\dots 3.30 \\ &\gamma \pm (SE \cdot 1.96) \end{aligned}$$

Entre más amplio sea el rango del nivel de confianza, menor será la precisión de la estimación del valor de coeficiente, y viceversa.

Significancia de los coeficientes

La significancia de la estimación del modelo está asociada a la verificación de la hipótesis de que los valores de los coeficientes son diferentes de cero. Con lo cual, las variables explicativas X_i de la función de utilidad tendrían una interpretación hacia el comportamiento de los usuarios. Y para la verificación de

³⁷ La precisión de la estimación se refiere a determinar el margen de error que tiene la estimación, y la significancia se refiere al nivel de contribución que una variable aporta al modelo con su coeficiente, Métodos de elección discreta de la estimación de la demanda de transporte, IMT, 2011, Pag. 59

esta hipótesis se tienen pruebas de significancia como la prueba “t”, que se define con la siguiente expresión:

$$t = \frac{\beta_k}{SE_{\beta_k}} \dots\dots\dots 3.31$$

Con esto es posible medir la significancia de los parámetros (α, β, γ) , es decir, su valor diferente de cero. Notar que no es exactamente un test t, sino que una aproximación, para muestras grandes, es que t se prueba con la distribución normal $N(0,1)$. Así, si $t > 1.96$ para un nivel de confianza del 95%, se rechaza la hipótesis nula $\beta_k = 0$, y se acepta que el atributo X_i tiene significancia dentro del modelo³⁸.

Aun cuando puede surgir que alguna de las variables sea o no significativa, tiene que observarse los signos de los parámetros con respecto a la interpretación de las variables significativas de la función de utilidad.

El método de “t” que se acaba de describir es uno de los más simples de estimar, pero cabe señalar, que existen diversas pruebas de significancia aplicables al método de máxima verosimilitud como la estándar normal Z, la distribución χ^2 , etc. De tal forma, que sin entrar a su formulación se explicará su valor en la medición de la significancia de los parámetros estimados dentro del estudio de caso del capítulo cuatro.

Bondad de ajuste del modelo

No es posible tener un índice como R^2 en modelos de elección discreta. Sin embargo, es de gran interés contar con algún tipo de índice de bondad de ajuste que esté entre cero y uno, y que sirva para comparar modelos. El ideal sería que también estuviera relacionado con una distribución de probabilidad conocida a fin de posibilitar una prueba de hipótesis³⁹. La más común es la siguiente:

$$\rho^2 = 1 - \frac{Ln L(\beta_k)}{Ln L(\beta_0)} \dots\dots\dots 3.32$$

Esta expresión es llamada ρ^2 de McFadden (1974), que análogamente a R^2 está acotada entre 0 y 1. Los valores obtenidos de la ρ^2 no son comparables con R^2 ,

³⁸ Modelos Econométricos de Elección Discreta, Juan de Dios Ortúzar S., Ediciones Universidad Católica de Chile, 2000, pag. 137.

³⁹ Modelos Econométricos de Elección Discreta, Juan de Dios Ortúzar S., Ediciones Universidad Católica de Chile, 2000, pag. 140.

ya que no tiene una interpretación intuitiva para valores intermedios, de hecho valores menores 0.5 pueden significar excelentes ajustes.

Este método de ajuste, puede ser útil para comparar varios ajustes del mismo conjunto de datos. Esto significa, que dentro del modelo se puede cambiar variables que se utilizan como etiquetas por otras, o el cambio de alguna de las variables cuantitativas por otra dentro de la función de utilidad.

Una forma simple de estimar o medir el ajuste del modelo Logit, es verificar como réplica la respuesta del usuario con lo observado en campo. De tal forma que⁴⁰:

$$Cuenta R^2 = \frac{\text{número de predicciones correctas}}{\text{número total de observaciones}} \dots\dots\dots 3.33$$

Puesto que la regresada en el modelo Logit toma un valor entre 0 y 1, si la probabilidad predicha es mayor que 0.5, se clasifica como si fuese 1, pero si es menor que dicho valor, entonces se considera como 0. Así pues, se cuenta el número de predicciones correctas y se calcula R².

Debe notarse, sin embargo, en los modelos con regresada binaria, la bondad del ajuste tiene una importancia secundaria. Lo que interesa son los signos esperados de los coeficientes de la regresión y su importancia práctica y/o estadística.

⁴⁰ Econometría, Damodar N. Gujarati, McGrawHill, 4ta edición, 2004, pag. 584

4 Estimación del valor subjetivo del tiempo: Caso de estudio

El siguiente estudio de caso, trata de la planeación de una nueva carretera con cobro de cuota dentro de una región de la República Mexicana, con la finalidad de incrementar la conectividad y desarrollo socioeconómico de esa región. De tal forma, que para estimar la viabilidad del proyecto se realizó un estudio de transporte que consistió en la estimación de la demanda de la autopista.

Como parte de las fases y/o actividades desarrolladas dentro del estudio, se realizaron trabajos de campo para caracterizar la oferta y la demanda que actualmente se encuentra dentro del área de interés. Dentro de estos trabajos, fue la aplicación de una encuesta de preferencia declarada (PD) a los usuarios que usan las vías actuales, y que son competencia directa para la nueva carretera.

A partir de la recolección de la información a través de la PD, se conoció las selecciones de los usuarios para realizar su viaje a partir de los atributos de las alternativas y sus características socioeconómicas. Derivado de este experimento, se construirá y definirá un modelo Logit que replique las selecciones que hicieron los usuarios en campo. De tal forma, que para la estimación de la demanda, se requiere del cálculo del VST ó VOT, que es la razón de los coeficientes del tiempo y costo, que son las variables significativas a usar en la función de utilidad.

Y para corroborar el uso de este modelo, se medirá la precisión, significancia y bondad de ajuste de los parámetros del modelo estimado. Y una vez aprobado el modelo a partir de la medición de los índices estadísticos, se estimará cada uno de los segmentos de la demanda del área de interés.

4.1 Descripción del estudio de caso

El siguiente estudio de caso, trata de la planeación para la construcción de la nueva autopista que comunicará a las poblaciones de Tepic con San Blas, en el estado de Nayarit, México.

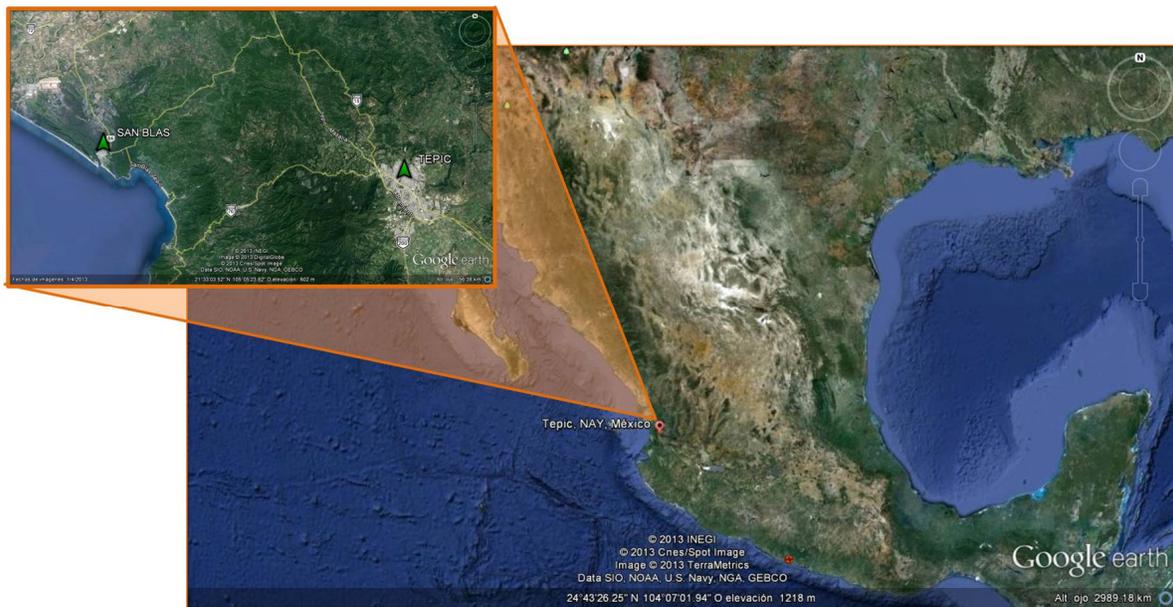
Actualmente se encuentra en etapa de construcción la autopista (2013)⁴¹. Pero previo a esto, se realizaron anteproyectos con la finalidad de medir su viabilidad financiera y económica, y dentro de los estudios que se requerían, fue el de transporte, que consistió en la estimación de la demanda de la nueva autopista.

La inclusión de la autopista al sistema carretero de la región tiene por objetivo otorgar una mayor conectividad entre los municipios de Nayarit, y con estados

⁴¹ <http://www.nayarit.gob.mx/nota.asp?nota=1550>

colindantes, como Jalisco, Zacatecas y Aguascalientes. Con esta infraestructura, se espera un incremento en el desarrollo socioeconómico de la región. Ya que una fuente de ingresos sería la reactivación del turismo a esa parte de la región del estado, en especial a San Blas, que es un puerto de frente al Océano Pacífico. La siguiente figura muestra la ubicación de las poblaciones de San Blas y Tepic.

Figura 29 Ubicación de las poblaciones de San Blas y Tepic



Fuente: Elaboración propia con información de Google Earth

Actualmente para realizar un viaje entre las poblaciones de Tepic y San Blas, prácticamente son dos rutas, pero se puede considerar una tercera, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 30 Alternativas de rutas para realizar el viaje de San Blas - Tepic



Fuente: Elaboración propia con información de Google Earth

De la figura, se observa que la ruta Tepic-El Crucero de San Blas (Libre)-San Blas se diferencia de la ruta Tepic-El Crucero de San Blas-(Cuota)-San Blas por el tramo de Tepic-El Crucero de San Blas, ya que esa trayecto se puede realizar por vía de cuota o libre. La siguiente tabla muestra el trayecto de cada ruta.

Tabla 4 Rutas alternativas para realizar el viaje Tepic – San Blas

Ruta	Tramo	Vía	Tipo	Caseta
R1	Tepic-El Crucero de San Blas	Tepic - Villa Unión (Mex 015D)	Federal Cuota	El Pichón (Trapichillo)
	El Crucero de San Blas-San Blas	Crucero de San Blas - San Blas (Mex 054)	Federal Libre	
R2	Tepic-El Crucero de San Blas	Tepic - Villa Unión (Mex 015)	Federal Libre	
	El Crucero de San Blas-San Blas	Crucero de San Blas - San Blas (Mex 054)	Federal Libre	
R3	Tepic - Jalcocotán	Tepic - Jalcocotán (Mex 76)	Federal Libre	
	Jalcocotán-San Blas	Jalcocotán-San Blas (Mex 76)	Federal Libre	

Fuente: Elaboración propia con información de SCT

Prácticamente las dos únicas vías por las que se llega a San Blas es por El Crucero de San Blas-San Blas (por Navarrete), y Jalcocotán-San Blas (por Aticama). De tal forma, que la demanda proviene de esas dos únicas carreteras. Y cabe señalar, que los usuarios que usan R1 y R2, confluyen en la carretera Crucero de San Blas-San Blas. Por lo que, la nueva autopista tendrá parte de esa

demanda, ya que su trazo unirá las poblaciones de Tepic y San Blas, esto se muestra en la siguiente figura.

Figura 31 Alternativas de rutas y proyecto para realizar el viaje de San Blas - Tepic



Fuente: Elaboración propia con información de C&M y Google Earth

Para realizar el estudio se requirió de realizar estudios para la construcción del modelo de transporte. La información recolectada en campo y documental fue:

- Aforos manuales.
- Aforos automáticos.
- Encuestas Origen - Destino (EOD).
- Encuestas de preferencia declarada (EPD).
- Datos viales SCT.
- Variables socioeconómicas.
- Tiempos de recorrido.
- Características físicas y operativas de las carreteras del área de interés.

A partir de esta información, se realizaron análisis para caracterizar tanto la oferta como la demanda, que son parte importante para definir la zonificación del estudio.

4.2 Zonificación del área de interés

Con el objetivo de realizar un análisis eficiente de los datos, se realizó la zonificación del área de interés para definir el nivel de agregación de la información de los viajes (EOD) y del sistema de red vial del estudio. Por lo tanto, se dividió el área de estudio en zonas geográficas, a partir de considerar sus características socioeconómicas, principales centros de generación y atracción de viajes, y la conectividad de la red vial a esos centros. En la siguiente tabla, se muestra el nivel de agregación definido:

Tabla 5 Nivel de zonificación para proyecto autopista San Blas - Tepic

Zonificación
Internacional
Nacional
Regional
Local

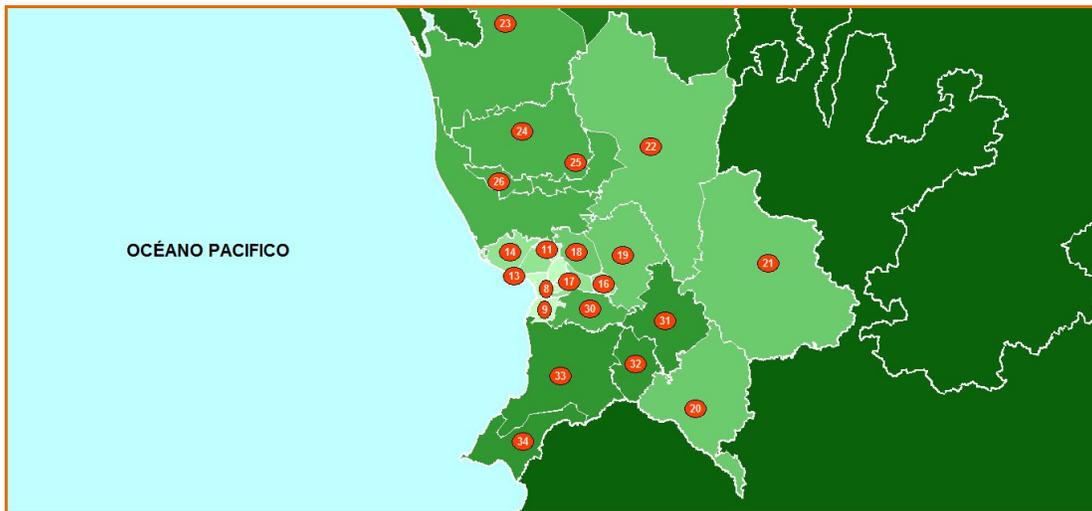
Fuente: Elaboración propia con información de C&M

Cada uno de los niveles tiene un determinado número de zonas, que se define de la agregación de estados, municipios, colonias y localidades. Es decir, por ejemplo, más de dos estados pueden ser una sola zona, e inclusive un solo estado puede ser una zona, y va a depender de las características socioeconómicas y accesibilidad a la red vial. De tal forma, que los niveles para este estudio se definen:

- Nivel Internacional: Se identificó los principales accesos y salidas al norte del País, para agregar a EUA en un número de zonas, al igual que al sur del país.
- Nivel Nacional: Se hizo la agregación de dos o más estados de la República Mexicana a partir de considerar sus características socioeconómicas y accesibilidad a la zona de estudio.
- Nivel Regional: Se hizo la agregación de dos o más municipios del estado de Nayarit, considerando características socioeconómicas y accesibilidad a la red vía del área de estudio.
- Nivel Local: Se realizó la agregación de colonias y/o localidades de los municipios de Tepic y San Blas, a partir de sus características socioeconómicas y accesibilidad a la red vial.

Para realizar la agregación y desagregación del área de interés en zonas, se puede usar como herramienta un software que tenga de plataforma un sistema de información geográfica (SIG O GIS por sus siglas en ingles), y de los que se usan en la práctica de la modelación de transporte son TRANSCAD, ARC VIEW, ARC GIS, etc. La siguiente figura muestra la zonificación realizada para el estudio.

Figura 32 Zonificación del área de interés



Fuente: Elaboración propia con información de C&M

Una vez definida la zonificación, se enumeró cada uno de los orígenes y destinos encontrados dentro de la base de datos de la EOD, y se revisaron la congruencia de los viajes realizando líneas de deseo, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 33 Líneas de deseo de los principales viajes de los usuarios



Fuente: Elaboración propia con información de C&M

Como se puede observar, la mayoría de los viajes son de corto de recorrido, ya que se concentran las líneas en las zonas cercanas al área de estudio, pero también se tienen viajes de largo recorrido, y esto se observa con las líneas que cruzan varias zonas, son viajes que provienen de otros estados, como por ejemplo de Jalisco.

El uso de líneas de deseo facilita la revisión de la información recolectada en campo, ya que permite analizar la congruencia de desplazamiento de los viajes, y para identificar los principales pares de viajes que transitan por zona, y que probablemente podrían considerarse como potenciales a usar la nueva autopista. Del tal forma, que para analizar las principales rutas por las que transitan los usuarios, es conveniente caracterizar la red vial a partir de sus condiciones físicas y operativas.

4.3 Características operativas y físicas de la red vial actual y del proyecto

La red vial es el modelo de oferta, y para definir su extensión se tomó en cuenta el trazo del proyecto, y la accesibilidad a la red de las principales poblaciones que se encuentran dentro del área de influencia del proyecto. Por consiguiente, la red de influencia incluye los corredores que van del centro de la capital de Nayarit a la costa del Pacífico, en dirección al puerto de San Blas.

Estos corredores están formados por carreteras federales libres y de cuota, y carreteras estatales, como se muestra en la siguiente tabla:

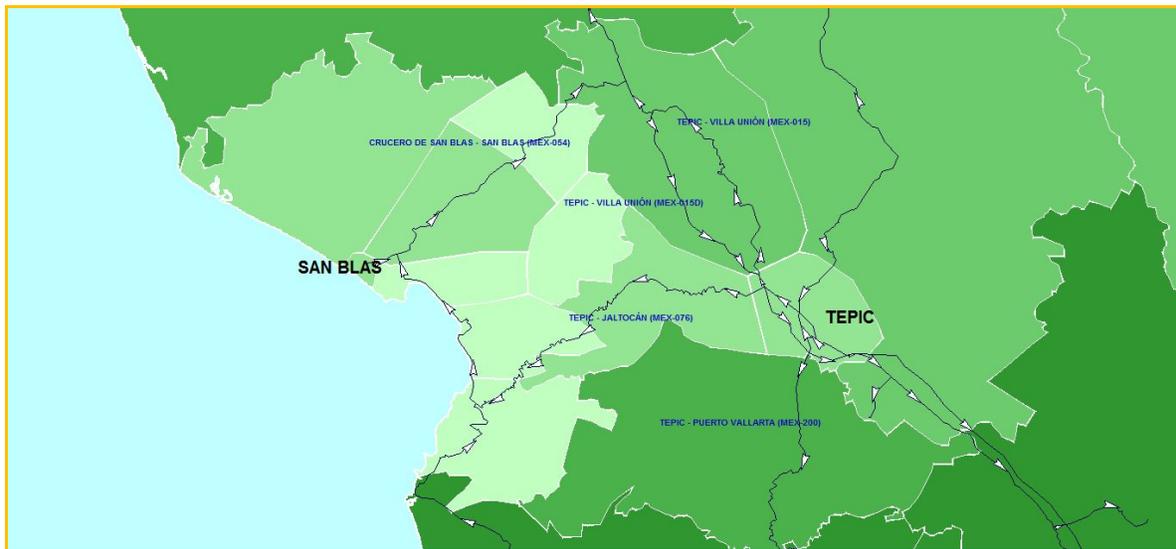
Tabla 6 Tipo de vialidades de la red vial del área de interés

Vía	Tipo
Tepic - Villa Unión (Mex 015D)	Federal Cuota
Crucero de San Blas - San Blas (Mex 054)	Federal Libre
Tepic - Jaltocán (Mex 76)	Federal Libre
Jaltocán-San Blas (Mex 76)	Federal Libre
Guadalajara - Tepic (Mex 015)	Federal Libre
Guadalajara - Tepic (Mex 057D)	Federal Cuota
Tepic - Puerto Vallarta (Mex 200)	Federal Libre
Tepic - Presa Aguamilpa (Mex 015)	Federal Libre
Libramiento de Tepic (Mex015)	Federal Libre

Fuente: Elaboración propia con información de la SCT

Solo se tienen dos carreteras con pago de cuota, pero la que incide mayor en los viajes que tienen como origen o destino San Blas, es la autopista Tepic-Villa Unión. En la siguiente figura se muestra la red vial del estudio.

Figura 34 Red vial del área de interés



Fuente: Elaboración propia con información de C&M

Se observa en la figura que se tienen dos carreteras por las que se accede a San Blas, la carretera crucero de San Blas – San Blas, y Tepic- Jaltocán, que son las vías de competencia al proyecto.

Velocidades de operación

Se realizaron recorridos en automóvil sobre las vías de influencia al proyecto, para conocer sus características operativas y físicas. Parte de esos estudios fueron los tiempos de recorrido realizados con la metodología de vehículo flotante. La siguiente figura muestra las velocidades de operación de la red vial en estudio.

Figura 35 Velocidades de operación de la red vial



Fuente: Elaboración propia con información de C&M

Las mayores velocidades se presentan sobre la autopista Tepic – Villa Unión, están dentro del rango de 90 a 120 km/hr. Y las carreteras por las que se accede a San Blas, presentan velocidades de 60 a 70 km/hr sobre la Crucero de San Blas – San Blas, y de 30 a 70 km/hr sobre la Tepic – Jaltocán.

Número de carriles

Parte de los trabajos realizados, consistieron en contabilizar el número de carriles de cada tramo de la red vial en estudio. Ya que, el número de carriles de una vía es unas características importantes para la estimación del nivel de servicio, debido a que es la capacidad de la vía. La siguiente figura muestra el número de carriles de la red vial.

Figura 36 Número de carriles de la red vial



Fuente: Elaboración propia con información de C&M

Se observa en la figura, que la mayoría de la red vial está compuesta por dos carriles, uno por sentido. Las autopistas con cobro de cuota, son de cuatro carriles, dos por sentido, son del tipo A2. Y el libramiento de Tepic cuenta con seis carriles, tres por sentido, y es debido a que se encuentra dentro de la mancha urbana, y tiene un mayor tránsito.

Estado del pavimento

Esta característica física de la carretera es importante en el desarrollo de las velocidades de operación, y la seguridad con la que circulan los vehículos. Y también, sirve de apoyo en describir y explicar las velocidades de operación de las vías. La siguiente figura muestra el estado de pavimento de la red vial en estudio.

Figura 37 Estado del pavimento del red vial



Fuente: Elaboración propia con información de C&M

El estado del pavimento en que se encuentra la red vial, es buena en 58%, y se presenta en 146 kilómetros de las carreteras. Cabe señalar, que tramos de carreteras que su estado de pavimento es regular se refleja con velocidades de 30 a 50 Km/hr.

Tipo de terreno

En ocasiones los cambios de velocidad y seguridad que experimentan los usuarios por circular por una vía, es debido a las características del tipo de terreno sobre la que se encuentra el trazo de la carretera. Para medir esta característica, se hizo a partir de la clasificación de: montaña, lomerío y plano. La siguiente figura muestra el tipo de terreno de la red vial.

Figura 38 Tipo del terreno de la red vial



Fuente: Elaboración propia con información de C&M

La mayoría del tipo de terreno es Lomerío, debido a que presenta 46% de la red vial de estudio; y el tipo de terreno de plano representa 34%, que son en las manchas urbanas. Y el tipo de terreno que menos se presenta, es el montañoso, con 20%.

Características principales de las vías de competencia

Es de importancia identificar las rutas de competencia al proyecto, así como medir sus características físicas y operativas, ya que son los puntos de comparación con el nuevo proyecto, y las que identifica el usuario por los beneficios que le produce al realizar su viaje. A partir de esto, se identificaron los principales y/o tramos de carreteras que son competencia directa a la nueva autopista San Blas – Tepic, con sus respectivas características de operación:

Tabla 7 Características operativas de las rutas alternas y la autopista Tepic – San Blas

Rutas	Longitud (Km)	Tiempo (min)	Velocidad (Km/hr)
Tepic - El Cruceiro de San Blas (Cuota) - San Blas	69.95	66	64
Tepic - El Cruceiro de San Blas (Libre) - San Blas	71.45	74	58
Tepic - Jalcocotán - San Blas (Libre)	71.73	90	48
Tepic - Autopista Tepic - San Blas- San Blas	66.44	42	68

Fuente: Elaboración propia con información de C&M

Comparando los tiempos de viaje de cada una de las rutas actuales con la nueva ruta que se crea por la autopista Tepic – San Blas, en todos los casos se tienen ahorros. Cabe señalar, que la velocidad de circulación por la nueva autopista, se

encuentra dentro del rango de 90 a 110 kilómetros por hora⁴². Pero en este caso, se usó como velocidad media de operación la de 90 km/hr, debido a las condiciones geográficas donde se encuentra trazada. La siguiente figura muestra los trazos de cada ruta con sus características de operación.

Figura 39 Características operativas de las alternativas de viaje de Tepic – San Blas



Fuente: Elaboración propia con información de C&M

El mayor ahorro de tiempo se encuentra en la comparación del proyecto con la ruta Tepic – Jaltocán - San Blas con 40 minutos, y esto se debe a que el recorrido es mayor y bajas velocidades por esa ruta. La siguiente tabla muestra los ahorros de tiempo y diferencia de longitudes de las rutas con el proyecto.

Tabla 8 Ahorros de tiempo de la autopista Tepic - San Blas con las diferentes alternativas

Rutas	ΔL (Km)	ΔT (min)
Tepic - El Crucero de San Blas (Cuota) - San Blas	3.51	24
Tepic - El Crucero de San Blas (Libre) - San Blas	5.01	32
Tepic - Jalcocotán - San Blas (Libre)	5.29	48

Fuente: Elaboración propia con información de C&M

Los ahorros de tiempo van de 25 a 40 minutos. Por lo que se pudiera esperar que los usuarios que reciben el mayor beneficio de ahorro de tiempo, sean los que estarían más dispuestos a usar la nueva autopista. De tal forma, que se tiene que

⁴² http://seplan.gob.mx/ds/PED/Proyectos_Estrategicos_Pagina.pdf

analizar las características de la demanda del área de interés, para definir los segmentos de la demanda que estaría dispuestos a pagar una cuota por ahorrar tiempo de su viaje.

4.4 Demanda actual del área de interés

A partir de aplicar una encuesta origen – destino, se recolectó información de las principales características de los usuarios, como por ejemplo: origen y destino de su viaje, motivo de viaje, nivel de ingresos, frecuencia de viaje, tiempo de viaje, etc. Todas estas características definen cada uno de los segmentos de la demanda del área de estudio, considerando que los usuarios tienen una diferente disposición a pagar una cuota por ahorrar tiempo de su viaje.

Además de la encuestas origen – destino para caracterizar la demanda, se realizaron aforos manuales y automáticos en puntos estratégicos para captar todos los viajes que tienen como origen o destino San Blas. Toda esta información es recabada en un determinado periodo de tiempo, debido a los altos costos de realizar trabajos de campo. Por lo que, se hace necesario también recabar información histórica que empresas privadas o gubernamentales ponen a disposición para complementar la información de estudios de transporte u otros estudios que lo requieran. De tal forma, que la muestra tomada en campo sea reflejo de toda la población del área de interés.

Comportamiento histórico del volumen vehicular

Para conocer el comportamiento del tránsito anual, se tiene un registro de cada tramo carretero que forman las tres rutas de San Blas – Tepic llamado TDPA (Tránsito Diario Promedio Anual). Con el cual, se puede analizar y observar el desarrollo de la afluencia vehicular dentro del área de interés en un periodo de tiempo, con lo cual, podría dar una idea cercana a lo que ha sido el desarrollo socioeconómico de la región, a partir de los desplazamientos de las personas en los diferentes tipos de vehículos.

La información del TDPA de cada tramo de las carreteras de influencia al proyecto, se recolectó de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)⁴³, dentro de la sección de datos viales. La siguiente tabla muestra el comportamiento del TDPA dentro de la red vial de interés.

⁴³ <http://dgst.sct.gob.mx/index.php?id=459>

Tabla 9 Datos histórico del TDPA de la red vial del área de interés

Año	Caseta "El Pichón"	Los Otates	T. Izq. Autopista	Navarrete	Jalcocotán	Aticama
1995	3,579	5,301	5,432	1,005	537	823
1996	3,645	5,441	5,569	1,041	562	838
1997	4,413	5,525	0	1,081	592	858
1998	5,071	5,692	5,829	1,143	790	868
1999	5,508	5,881	6,020	1,154	828	880
2000	5,820	6,000	6,139	1,165	856	900
2001	5,933	6,157	6,207	1,032	952	1,060
2002	6,521	6,208	6,370	1,075	986	1,100
2003	6,668	6,329	6,355	1,101	1,172	1,175
2004	6,808	6,560	6,590	1,142	1,196	1,267
2005	8,993	6,242	6,786	1,342	1,275	1,305
2006	9,880	6,758	6,873	2,816	2,137	2,291
2007	9,320	8,161	8,640	2,507	2,040	2,446
2008	9,971	8,264	8,378	2,590	2,298	2,690
2009	10,170	8,181	7,942	2,601	2,223	2,863
2010	9,118	8,183	8,129	2,703	2,360	2,921
2011	9,278	3,741	8,297	2,200	2,251	2,474
2012	9,766	3,882	7,948	2,388	2,327	2,619

Fuente: Elaboración propia con información de la SCT

Los menores volúmenes que se registran de las estaciones de la SCT son sobre las carreteras Crucero de San Blas – San Blas y Jalcocotán – San Blas. La siguiente imagen muestra la ubicación de las estaciones de la SCT sobre la red vial de análisis.

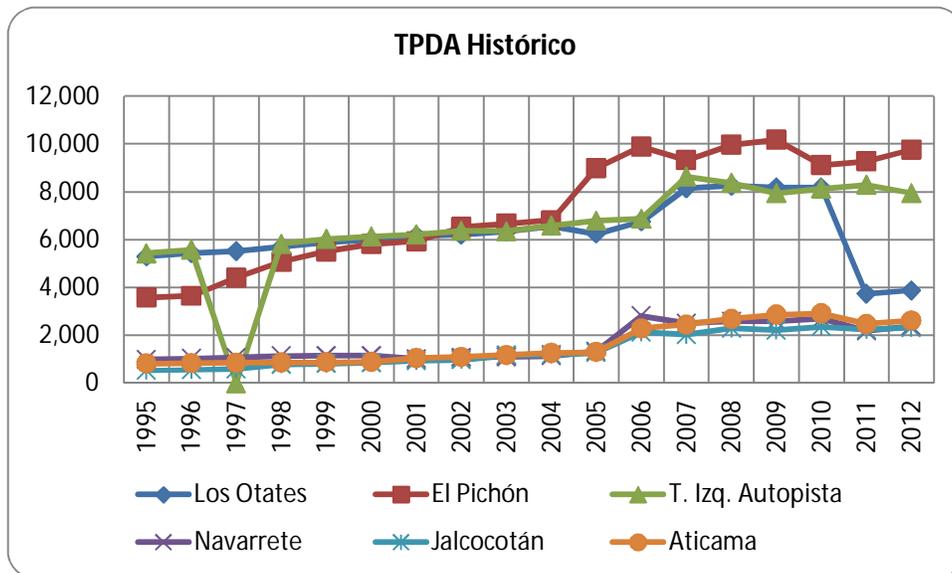
Figura 40 Ubicación de estaciones de aforo de la SCT



Fuente: Elaboración propia con información de la SCT

De las estaciones que tienen mayor impacto en la estimación de la demanda de la autopista San Blas – Tepic son: Navarrete, Jalcocotán y Aticama. Sin embargo, observando los datos históricos del TDPA presenta volúmenes menores que las demás estaciones. La siguiente figura presenta el TDPA de cada estación.

Figura 41 TDPA Histórico de las principales carreteras del área de interés



Fuente: Elaboración propia con información de la SCT

Las tres estaciones han mantenido un crecimiento pequeño y estable del TDPA. En el año 2006, hubo un incremento del 60 al 110% respecto al año 2005. Sin embargo, en el año 2011 decreció del -5% al -19% con respecto al 2010. Las siguientes tablas muestran las tasas de crecimiento medio anual de cada una de las estaciones.

Tabla 10 Tasas de crecimiento medio anual de la red vial del área de interés

Periodo	Caseta "El Pichón"	Los Otates	T. Izq. Autopista	Navarrete	Jalcocotán	Aticama
1995 - 2012	6%	-2%	2%	5%	9%	7%

Fuente: Elaboración propia con información de la SCT

Sin embargo, aun cuando presentan los menores valores del TDPA las tres estaciones mencionadas, presentan tasas de crecimiento mayores que las demás estaciones. Cabe señalar, que el valor del TDPA está referido a vehículos mixtos.

De tal forma, que una parte importante del análisis del volumen vehicular sobre las vías, es la identificación de la composición vehicular. Ya que, la estimación de los porcentajes de cada tipo de vehículo que circula por cada tramo de la red vial de análisis, define la calidad del servicio de la vía. A partir de los datos históricos del TDPA, se calculó un promedio ponderado del TPDA y la composición vehicular de cada tipo de vehículo. Esto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 11 Composición vehicular de la red vial del área de interés

Estación		A	B	CU	CA	TOTAL
Caseta "El Pichón"	TPDA	5,786	778	520	864	7,948
	%comp veh	73%	10%	7%	11%	100%
Los Otates	TPDA	4,413	407	780	917	6,517
	%comp veh	68%	6%	12%	14%	100%
T. Izq. Autopista	TPDA	4,967	434	706	962	7,069
	%comp veh	70%	6%	10%	14%	100%
Navarrete	TPDA	1,709	72	141	50	1,972
	%comp veh	87%	1%	2%	1%	28%
Jalcocotán	TPDA	1,530	52	111	53	1,746
	%comp veh	88%	3%	6%	3%	100%
Aticama	TPDA	1,766	47	154	63	2,031
	%comp veh	87%	2%	8%	3%	100%

Fuente: Elaboración propia con información de la SCT

donde, la clasificación vehicular es la siguiente:

Tabla 12 Clasificación vehicular

Clasificación	Tipo vehículo
A	Autos
B	Autobús
Cu (Camión unitario)	Camiones de 2, 3 y 4 ejes
Ca (Camión articulado)	Camiones mayores de 5 ejes

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

La mayor composición vehicular de automóviles se registra sobre las carreteras de El Crucero de San Blas – San Blas, Tepic – Jalcocotán, y Jalcocotán – San Blas, con 88%. Es muy baja la circulación de los camiones articulados, lo cual se deba al poco desarrollo industrial de la región. Sin embargo, los camiones unitarios son mayores a los articulados, y esto se deba a que son usados para la actividad agrícola, transporte de materiales para la construcción y repartición de productos industrializados dentro de la región. De tal forma, que conocer las características del viaje, se hace necesario para conocer con mayor precisión la demanda, y los datos viales, no dan tal precisión.

Por lo que, para conocer las características como tipo de carga, motivo del viaje, frecuencia del viaje, nivel de ingresos del usuario, origen y destino de viaje, etc., se debe aplicar una encuesta de origen-destino a los usuarios de las vías actuales. Y para este caso de estudio se tiene los resultados de las encuesta origen – destino aplicada en campo.

Resultados de encuesta origen – destino

De la aplicación de la encuesta origen – destino a los usuarios sobre las carreteras El crucero San Blas – San Blas y Aticama – San Blas se obtuvo un determinado número de encuestas, que representa una muestra de la población de la región. La muestra es un número menor al volumen vehicular que transita por las carreteras donde se aplicó. De tal forma, que para que la muestra represente al TDPA que circula por esas carreteras, se expandió la muestra a partir de factores obtenidos de aforos manuales, aforos automáticos y datos viales históricos. La siguiente tabla muestra las encuestas expandidas para el año 2012.

Tabla 13 Encuestas de cada estación

Estación	Periodo	Sentido	Autos	Cu	Ca	Total	
1	ES	San Blas - Tepic	932	91	4	1,027	
		Tepic - San Blas	1,050	96	3	1,148	
		Ambos sentidos	1,981	187	7	2,175	
		Composición vehicular	91%	9%	0.3%	100%	
	FS	San Blas - Tepic	1,107	78	4	1,189	
		Tepic - San Blas	1,133	92	4	1,229	
		Ambos sentidos	2,240	170	9	2,418	
		Composición vehicular	93%	7%	0.4%	100%	
	TPDA			2,055	182	8	2,244
	Compo vehicular			92%	8%	0%	100%
2	ES	San Blas - Tepic	882	36	4	922	
		Tepic - San Blas	886	45	3	935	
		Ambos sentidos	1,768	81	7	1,857	
		Composición vehicular	95%	4%	0%	100%	
	FS	San Blas - Tepic	1,025	38	4	1,067	
		Tepic - San Blas	1,076	40	5	1,121	
		Ambos sentidos	2,100	78	9	2,188	
		Composición vehicular	96%	4%	0%	100%	
	TPDA			1,863	80	8	1,952
	Compo vehicular			95%	4%	0%	100%

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

La muestra obtenida se obtuvo por sentido de circulación, tipo de vehículo, y por periodos, entre semana (ES) y fin de semana (FS). La muestra de la EOD se recolectó de dos estaciones de campo. La siguiente figura muestra la ubicación de las estaciones, así como los sentidos de circulación.

Figura 42 Ubicación de las estaciones para trabajos de campo



Fuente: Elaboración propia con información de la C&M y Google Earth

La información recolectada de las dos estaciones EOD corresponde a los patrones de viaje de los usuarios de automóviles, camiones unitarios y articulados. A partir de esta información se realizó un análisis de la demanda del área de interés, con los siguientes resultados.

Motivo de viaje

La pregunta del motivo de viaje se realizó solo para los usuarios de automóviles, ya que para los usuarios de camiones se supone que es por trabajo. La siguiente tabla muestra los motivos de viaje de ambas estaciones.

Tabla 14 Motivo de viaje de los usuarios

Tipo vehículo	Estación	Periodo	Compras	Estudio	Hogar	Otro	Recreación	Trabajo	TDPA
Auto	1	ES	62	17	82	142	585	1,093	1,981
			3%	1%	4%	7%	30%	55%	100%
		FS	32	2	84	58	1,103	961	2,240
			1%	0.1%	4%	3%	49%	43%	100%
	TDPA	53	13	83	118	733	1055	2,055	
		3%	0.6%	4%	6%	36%	51%	100%	
	2	ES	108	28	42	67	733	790	1,768
			6%	2%	2%	4%	41%	45%	100%
		FS	156	15	86	143	1,105	595	2,100
			7%	1%	4%	7%	53%	28%	100%
TDPA		122	24	55	89	839	734	1,863	
		7%	1%	3%	5%	45%	39%	100%	

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

El principal motivo de viaje de entre semana en ambas estaciones es por trabajo, y en fin de semana es la recreación, debido a que se trata de un lugar turístico. En la estación 2 se registran más usuarios, pues su motivo de viaje es debido a la recreación, y esto se debe a que dentro del área se encuentra el mayor número de playas de la costa de San Blas. Con respecto al resto de los motivos de viaje de los usuarios, los porcentajes son similares en ambas estaciones.

Los motivos de viaje por compras, estudio y hogar presentan valores pequeños. De tal forma, que se pueden agrupar con el motivo de viaje “otros”, con la finalidad de tener un mayor número de muestra dentro de una categoría, y facilite los análisis y cálculos para la estimación de la demanda. La siguiente tabla muestra la agrupación de los motivos de viaje.

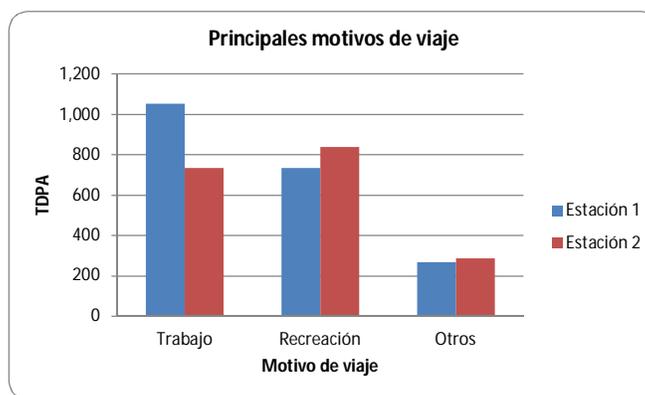
Tabla 15 Motivo de viaje agregados de los usuarios

Tipo vehículo	Estación	Periodo	Trabajo	Recreación	Otros	TPDA
Auto	1	ES	1,093	585	303	1,981
			55%	30%	15%	100%
		FS	961	1,103	176	2,240
			43%	49%	8%	100%
		TDPA	1,055	733	267	2,055
	%	51%	35.7%	13%	100%	
	2	ES	790	733	245	1,768
			45%	41%	14%	100%
		FS	595	1,105	400	2,100
			28%	53%	19%	100%
TDPA		734	839	289	1,863	
%	39%	45%	16%	100%		

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

Como se puede observar de la tabla, la agrupación de los motivos de viaje que presentaron una menor muestra con el motivo de viaje “otros”, se puede verificar que los principales motivos de viaje de cada una de las estaciones son por trabajo y recreación. La siguiente figura compara los motivos de viajes de las estaciones.

Figura 43 Principales motivos de viaje de la región en análisis



Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

Los valores del motivo de viaje “otros” que se presentan en ambas estaciones, no hay una diferencia marcada, no así con el motivo de viaje por trabajo. Los usuarios respondieron 30% más en la estación 1 que su principal motivo de viaje es por trabajo, que en la estación 2.

Nivel de ingresos

Al igual que la pregunta del motivo de viaje, solo se preguntó el nivel de ingresos a los usuarios de automóviles. A partir de la información recabada se definió el rango de ingresos que presentan los usuarios en cada una de las estaciones. La siguiente tabla muestra los niveles de ingresos.

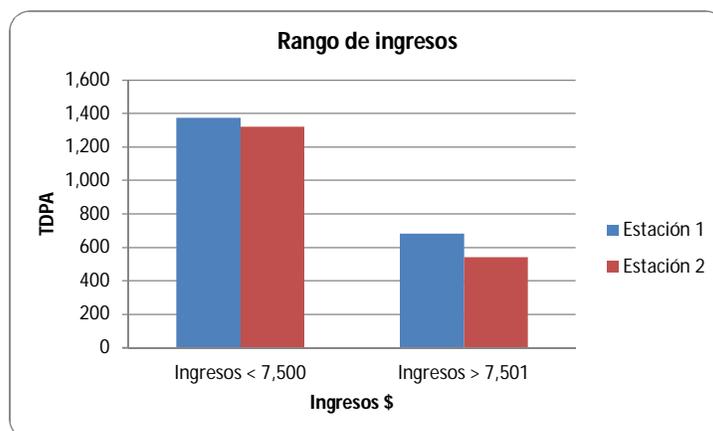
Tabla 16 Nivel del ingresos de los usuarios

Tipo vehículo	Estación	Período	Ingresos < 7,500	Ingresos > 7,501	TPDA
Auto	1	ES	1,352	629	1,981
			68%	32%	100%
		FS	1,424	816	2,240
			64%	36%	100%
	TDDPA	1,373	682	2,055	
		67%	33%	100%	
	2	ES	1,257	511	1,768
			71%	29%	100%
FS		1,478	622	2,100	
		70%	30%	100%	
TDDPA	1,320	543	1,863		
	71%	29%	100%		

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

En ambas estaciones, los usuarios presentan ingresos menores de \$7,500 MXN, y representan casi el 70% de la muestra recolectada en campo. La siguiente figura muestra los rangos de ingresos de los usuarios.

Figura 44 Rango de ingresos de los usuarios de la región



Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

La mayoría de los usuarios que circulan por cualquiera de las dos carreteras que pasan por San Blas, presentan ingresos bajos. Y sólo el 30% presentan ingresos mayores de la media de los usuarios.

Frecuencia de viaje

Para los usuarios de automóviles y camiones que circulan por las dos carreteras que conectan a la población del puerto de San Blas, se recolectó información de la frecuencia con la que realizan su viaje. La siguiente tabla muestra la frecuencia de viaje de los usuarios de automóvil, de ambas estaciones.

Tabla 17 Frecuencia de viaje de los usuarios de automóvil

Tipo vehículo	Estación	Periodo	Anual	Diario	Mensual	Ocasional	Quincenal	Semanal	TDPA
Auto	1	ES	159	604	220	315	104	579	1,981
			8%	30%	11%	16%	5%	29%	100%
		FS	251	550	252	410	181	596	2,240
			11%	25%	11%	18%	8%	27%	100%
	TDPA	185	589	229	342	126	584	2,055	
		9%	29%	11%	17%	6%	28%	100%	
	2	ES	295	540	183	134	195	421	1,768
			17%	31%	10%	8%	11%	24%	100%
		FS	317	391	314	260	205	615	2,102
			15%	19%	15%	12%	10%	29%	100%
TDPA		301	497	220	170	198	476	1,863	
		16%	27%	12%	9%	11%	26%	100%	

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

El 30% de los usuarios realizan su viaje diariamente, y otro casi 30% de manera semanal, que pueden estar asociados a los que su motivo de viaje es por recreación.

La siguiente tabla muestra la frecuencia de viaje para los usuarios de camión unitario, referida a ambas estaciones.

Tabla 18 Frecuencia de viaje agrupadas de los usuarios de automóvil

Tipo vehículo	Estación	Periodo	Anual	Diario	Mensual	Ocasional	Quincenal	Semanal	TDPA
Cu	1	ES	3	118	0	12	2	52	187
			2%	63%	0%	6%	1%	28%	100%
		FS	5	69	2	12	11	71	170
			3%	41%	1%	7%	6%	42%	100%
	TDPA	4	104	1	12	5	57	182	
		2%	57%	1%	7%	3%	31%	100%	
	2	ES	6	26	8	4	2	35	81
			7%	32%	10%	5%	2%	43%	100%
		FS	2	21	4	9	11	31	78
			3%	27%	5%	12%	14%	40%	100%
TDPA		5	25	7	5	5	34	80	
		6%	31%	9%	6%	6%	43%	100%	

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

La mayoría de los viajes realizados por usuarios de camiones unitarios que circulan por la carretera El Crucero San Blas – San Blas, se realizan diariamente un 57% de las veces. Y por la carretera San Blas - Aticama, el 43% de los viajes se realizan en fin de semana.

La siguiente tabla muestra la frecuencia de viaje para los usuarios de camión articulado, referida a ambas estaciones.

Tabla 19 Frecuencia de viaje de los usuarios de camiones

Tipo vehículo	Estación	Periodo	Anual	Diario	Mensual	Ocasional	Quincenal	Semanal	TDPA
Ca	1	ES	0	3	4	0	0	0	7
			0%	43%	57%	0%	0%	0%	100%
		FS	0	4	2	2	0	1	9
			0%	44%	22%	22%	0%	11%	100%
		TDPA	0	3	3	1	0	0	8
	%	0%	38%	38%	13%	0%	0%	100%	
	2	ES	1	1	0	0	0	5	7
			14%	14%	0%	0%	0%	71%	100%
		FS	0	1	3	1	1	3	9
			0%	11%	33%	11%	11%	33%	100%
TDPA		1	1	1	0	0	4	8	
%	13%	13%	13%	0%	0%	50%	100%		

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

Por las carreteras El crucero de San Blas – San Blas y Aticama – San Blas, no se registra un flujo considerable del paso de camiones articulados por la región, por lo que la frecuencia de viaje que presentan no cubre algunas que presentan los otros usuarios. Por lo que a partir de la muestra obtenida, la mayor frecuencia con la que realizan los usuarios de camiones articulados su viaje por la carretera El Crucero de San Blas es 38% diario y mensual. Y los usuarios que circulan por la carretera Aticama – San Blas realizan su viaje 50% de manera semanal.

Tipo de carga

Se recolecto la información del tipo de carga que transporta los camiones unitarios y articulados. Lo cual, ayuda a definir o diferir las principales actividades y sectores económicos de la región. La siguiente tabla muestra la principal carga que transporta los camiones unitarios.

Tabla 20 Tipo de carga transportada por camiones unitarios de cada estación

Tipo vehículo	Estación	Periodo	Productos Industrializados	Productos agrícolas	Productos del mar	Materiales para la construcción	TDPA
Cu	1	ES	50	87	2	48	187
			27%	47%	1%	26%	100%
		FS	68	68	0	34	170
			40%	40%	0%	20%	100%
		TDPA %	55	82	1	44	182
	30%		45%	1%	24%	100%	
	2	ES	28	36	3	14	81
			35%	44%	4%	17%	100%
		FS	37	23	1	17	78
			47%	29%	1%	22%	100%
TDPA %		31	32	2	15	80	
	39%	40%	3%	19%	100%		

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

La mayoría de la carga transportada por los camiones unitarios son productos agrícolas e industrializados. Los productos industrializados son transportados en su mayoría por camiones que pertenecen a empresas, y los productos agrícolas, el camión pertenece al mismo usuario.

La siguiente tabla muestra el tipo de carga transportada por los camiones articulados.

Tabla 21 Tipo de carga transportada por camiones articulados de cada estación

Tipo vehículo	Estación	Periodo	Productos Industrializados	Productos agrícolas	Productos del mar	Materiales para la construcción	TDPA
Ca	1	ES	4	4	0	3	7
			0%	57%	0%	43%	100%
		FS	9	9	0	0	9
			0%	100%	0%	0%	100%
		TDPA %	0	5	0	2	8
	0%		71%	0%	29%	100%	
	2	ES	0	4	0	3	7
			0%	57%	0%	43%	100%
		FS	4	2	1	2	9
			44%	22%	11%	22%	100%
TDPA %		1	3	0	3	8	
	14%	43%	0%	43%	100%		

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

Los camiones articulados en su mayoría transportan productos agrícolas y materiales para la construcción. Entre estos dos conceptos suman más del 85% del tipo de carga transportada.

Viajes potenciales al proyecto

A partir de los viajes captados dentro de la encuesta origen – destino, se estimaron todos los viajes que pueden usar la nueva autopista San Blas – Tepic, con las siguientes consideraciones:

1. No se considera cobro de cuota por usar la nueva autopista San Blas – Tepic.
2. Ahorros de tiempo significativos, por ejemplo, arriba de 1 o 5 minutos.

Sin embargo, no todos los usuarios no tienen la disposición de pagar una cuota por ahorrar tiempo de su viaje. De tal forma, que de los viajes potenciales, se estima el porcentaje de viajes que usará el proyecto. De ahí, la importancia de estimar todos los viajes posibles a usar la nueva autopista.

De las estaciones 1 y 2, se estimaron los viajes potenciales por tipo de vehículo y por los periodos de entre semana y fin de semana. La siguiente tabla muestra los viajes potenciales.

Tabla 22 Viajes potenciales por periodo y por tipo de vehículo de cada estación

Estación	Periodo	Viajes	Auto	Cu	Ca	TDPA
1	ES	Total	1,981	187	7	2,175
		Potencial	934	99	3	1036
		%	47%	53%	43%	48%
	FS	Total	2,240	170	9	2,419
		Potencial	1077	51	4	1132
		%	48%	30%	44%	47%
2	ES	Total	1,768	81	7	1,856
		Potencial	693	31	3	727
		%	39%	38%	43%	39%
	FS	Total	2,100	78	9	2,187
		Potencial	875	31	6	912
		%	42%	40%	67%	42%

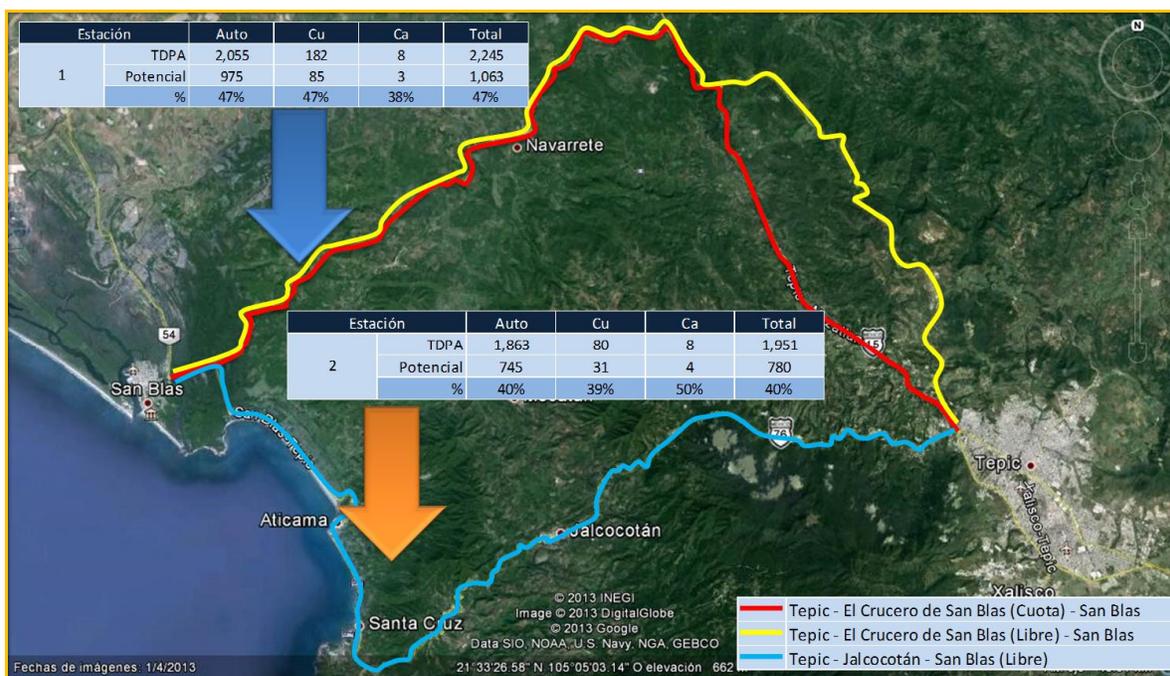
Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

Más del 40% de los viajes captados, son potenciales a usar la nueva autopista por los ahorros en tiempo de viaje. El resto de los viajes son viajes intrazonales, es decir, viajes que se realizan en una corta distancia. Por lo tanto, no requieren de usar una nueva vía, ya que no les representa ahorros en su tiempo de viaje.

El principal par de viaje potencial en automóvil, de la estación 1 es de Tepic a San Blas, tanto entre semana como en fin de semana. Y el principal par de viaje en automóvil en la estación 2, es de Jalisco a San Blas.

Para los usuarios que provienen de Tepic o San Blas, prefieren usar la ruta de El Crucero de San Blas – San Blas, y los que provienen de otro Estado colindante, en este caso de Jalisco, prefieren usar la carretera Aticama – San Blas. La siguiente imagen presenta los viajes potenciales por tipo de vehículo.

Figura 45 Viajes potenciales captados en cada estación



Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

Se tiene más viajes potenciales por la carretera El Crucero de San Blas – San Blas, que por la carretera Aticama – San Blas. Sin embargo, el número de viajes potenciales en ambas estaciones es casi similar. La siguiente tabla muestra los viajes potenciales totales.

Tabla 23 Viajes potenciales totales por tipo de vehículo de cada estación

Estación		Auto	Cu	Ca	Total
1	TDPA	2,055	182	8	2,245
	Potencial	975	85	3	1,063
	%	47%	47%	38%	47%
2	TDPA	1,863	80	8	1,951
	Potencial	745	31	4	780
	%	40%	39%	50%	40%

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

A partir de estimar los viajes potenciales de los viajes captados de la estaciones 1 y 2, se deberá calcular la demanda de vehículos que tendrá la nueva autopista Tepic – San Blas. Por lo que, habrá que analizar la base de datos de la encuesta de preferencia declarada aplicada a los usuarios de ambas estaciones.

4.5 Análisis estadístico de las encuestas de preferencia declarada

En cada una de las estaciones se aplicó la encuesta de preferencia declarada a los usuarios, con el objetivo de obtener su selección de ruta de viaje, a partir de presentarle nueve escenarios hipotéticos, donde se comparó la nueva autopista con las vías actuales. Cada ruta, con sus características de costo y tiempo de viaje. Y también, dentro de la encuesta se realizaron preguntas sobre las características socioeconómicas de los usuarios. La siguiente tabla muestra el tipo de información que se preguntó a los usuarios de automóviles.

Tabla 24 Tipo de información que se preguntó a los usuarios de automóviles con la encuesta de preferencia declarada

Motivo de viaje
Frecuencia del viaje
Ingreso mensual
¿Quién cubre el costo de la cuota?
Tiempo de viaje
Edad
Sexo del conductor
Número de personas en el vehículo
Preferencia (9 escenarios)

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

Y la siguiente tabla muestra el tipo de información que se preguntó a los usuarios de camiones unitarios y articulados.

Tabla 25 Tipo de información que se preguntó a los usuarios de camiones con la encuesta de preferencia declarada

Frecuencia del viaje
¿Quién cubre el costo de la cuota?
Tiempo de viaje
Número de ejes
Preferencia (9 escenarios)

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

La pregunta de “Quién cubre el costo de la cuota”, es un pregunta que puede servir de referencia a una explicación del comportamiento del usuario ante el pago por usar una nueva carretera que le de beneficios en ahorro de tiempo de su viaje.

El experimento que se realizó en campo para determinar la preferencia de los usuarios. Consistió en presentar una serie de nueve tarjetas con el escenario hipotético de la situación actual y situación alterna que incluye la nueva autopista.

Cada escenario tiene diferentes tiempos y costos para realizar su viaje. La siguiente figura muestra un diseño de las tarjetas que se presentan a los usuarios de automóvil con la comparación de escenarios.

Figura 46 Tarjeta de diseño: Comparación de alternativas de rutas de viaje



Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

Para cada tarjeta se tiene diferentes valores de tiempo y costo de las alternativas. Los valores de tiempo y costo varían en cierto porcentaje a partir de valores base, con el objetivo de cubrir un rango del VST. Cabe señalar, que de igual forma se utilizó un formato de tarjeta para los usuarios de camiones.

A partir de la información recolectada de la EPD, se realizó un análisis para identificar los diferentes segmentos de demanda, que represente a los usuarios del área de interés. Ya que, a partir de estas muestras representativas, se estimará el valor del tiempo (VOT o VST) de los usuarios de los diferentes segmentos de demanda, debido a que todos tienen diferente capacidad de pago por ahorrar tiempo en su viaje.

Periodo de aplicación de las encuestas

Las encuestas se aplicaron entre semana y fin de semana a los usuarios de automóviles, camiones unitarios y articulados. Cabe señalar, que dentro de los aforos de la estación 1 y 2 no se encontró un flujo importante de camiones

articulados por lo que impacta al número de encuesta recolectado. La siguiente tabla muestra el número de encuestas recolectadas en cada estación.

Tabla 26 Número de encuestas PD recabadas por periodo y por estación

Estación	Periodo	Auto	Cu	Ca	Total
1	ES	262	52	5	319
	FS	336	110	9	455
	Total	598	162	14	774
2	ES	367	26	0	393
	FS	320	68	9	397
	Total	687	94	9	790

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

En la estación 2 no se obtuvo ninguna encuesta de preferencia declarada para camiones articulados. Esto se puede deber a varios factores, pero el principal es el poco volumen que pasa de camiones articulados por la región. Por lo que, en ocasiones se encuesta cerca del punto, por ejemplo en gasolineras y paraderos para tener una mayor muestra representativa.

Del número de encuestas se obtiene una respuesta del usuario por cada tarjeta presentada por lo que en realidad se obtiene una cantidad de pseudoindividuos. La siguiente tabla muestra el total de las encuestas a partir de las respuestas de los usuarios.

Tabla 27 Número total de registros de la EPD a partir del número de respuesta de cada usuario

Estación	Periodo	Auto	Cu	Ca	Total
1	ES	2,358	468	45	2,871
	FS	3,024	990	81	4,095
	Total	5,382	1,458	126	6,966
2	ES	3,303	234	0	3,537
	FS	2,880	612	81	3,573
	Total	6,183	846	81	7,110

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

A partir de estas encuestas se obtiene la desagregación de la demanda que puede tener varios niveles, y está en función de lo significativo que son las variables que definen al usuario.

Motivo de viaje

Se identificó el motivo de viaje, solo para los usuarios de automóviles. Esta pregunta no se aplicó para los usuarios de camiones, ya que se considera que su principal motivo del viaje es por trabajo o relacionado al trabajo. La siguiente tabla muestra los principales motivos de viaje de cada estación.

Tabla 28 Motivo de viaje por periodo y estación de los usuarios de automóviles (EPD)

Tipo vehículo	Estación	Periodo	Compras	Estudio	Hogar	Otro	Recreación	Trabajo	Total
Auto	1	ES	23	2	2	18	72	145	262
			9%	1%	1%	7%	27%	55%	100%
		FS	17	1	1	22	122	173	336
			5%	0.3%	0%	7%	36%	51%	100%
	Total	40	3	3	40	194	318	598	
		7%	0.5%	1%	7%	32%	53%	100%	
	2	ES	16	2	7	8	151	183	367
			4%	1%	2%	2%	41%	50%	100%
		FS	15	0	6	9	175	115	320
			5%	0%	2%	3%	55%	36%	100%
Total		31	2	13	17	326	298	687	
		5%	0%	2%	2%	47%	43%	100%	

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

Los principales motivos de viaje son por recreación y trabajo, en ambas estaciones. Por lo que, para tener una muestra más representativa del resto de los segmentos, se agruparan en el motivo de “otros”. La siguiente tabla muestra los motivos agrupados.

Tabla 29 Motivo de viaje agregados por periodo y estación de los usuarios de automóviles (EPD)

Tipo vehículo	Estación	Periodo	Trabajo	Recreación	Otros	Total
Auto	1	ES	145	72	45	262
			55%	27%	17%	100%
		FS	173	122	41	336
			51%	36%	12%	100%
	Total	318	194	86	598	
		53%	32%	14%	100%	
	2	ES	183	151	33	367
			50%	41%	9%	100%
		FS	115	175	30	320
			36%	55%	9%	100%
Total		298	326	63	687	
		43%	47%	9%	100%	

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

El motivo de viaje principal de los usuarios es por trabajo entre semana en ambas estaciones, y en fin de semana es recreación, debido a que es un lugar turístico. Cabe señalar, que entre semana los principales viajes se dan entre municipios y/o localidades del Estado de Nayarit, en fin de semana se registra viajes de Estados colindantes como Jalisco, es decir, viajes de mayor recorrido y que tendrían una mayor disposición de pagar una cuota por ahorrar tiempo en su viaje.

Nivel de ingresos

En ocasiones no todos los usuarios tienen la disponibilidad de pagar una cuota por ahorrar tiempo en su viaje al usar una nueva autopista, o la usarían a partir de una cierta tarifa. De tal forma, que se debe analizar la demanda a partir del nivel de ingresos de los usuarios, ya que pueden presentar diferentes valores del valor del

tiempo una persona con ingresos altos o bajos. La siguiente tabla muestra el nivel de ingreso de los usuarios de automóvil por estación.

Tabla 30 Nivel de ingresos por periodo y estación de los usuarios de automóviles (EPD)

Tipo vehículo	Estación	Periodo	Ingresos < 7,500	Ingresos > 7,501	Total
Auto	1	ES	210	52	262
			80%	20%	100%
		FS	242	94	336
			72%	28%	100%
	Total	452	146	598	
		76%	24%	100%	
	2	ES	252	115	367
			69%	31%	100%
		FS	200	120	320
			63%	38%	100%
Total		452	235	687	
		66%	34%	100%	

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

Los usuarios de la estación 2 presentan mayores ingresos en fin de semana. Sin embargo, la media es que los usuarios presentan ingresos menores de \$7,500 MXN.

Se debe considerar que en ocasiones no todas las personas dicen su ingreso real por motivos de seguridad, por lo que se pudiera realizar otra pregunta, como por ejemplo el año del vehículo, con el objetivo de parametrizar la variable de nivel de ingresos.

Frecuencia del viaje

La frecuencia del viaje ayuda a explicar si un usuario que transita de forma regular por las carreteras actuales, realizaría con la misma frecuencia su viaje por la nueva autopista. De tal forma, que las personas que realizan un viaje de manera frecuente tienen un diferente valor del tiempo con respecto a otra persona que esporádicamente realiza su viaje por la región. Donde también interfiere el motivo de viaje, y nivel de ingresos. La siguiente tabla muestra la frecuencia de viaje de los usuarios de automóvil.

Tabla 31 Frecuencia de viaje por periodo y estación de los usuarios de automóviles (EPD)

Tipo vehículo	Estación	Periodo	Anual	Diario	Mensual	Ocasional	Quincenal	Semanal	Total
Auto	1	ES	35	82	26	38	21	60	262
			13%	31%	10%	15%	8%	23%	100%
		FS	53	101	39	42	33	68	336
			16%	30%	12%	13%	10%	20%	100%
	Total	88	183	65	80	54	128	598	
		15%	31%	11%	13%	9%	21%	100%	
	2	ES	76	115	47	22	20	87	367
			21%	31%	13%	6%	5%	24%	100%
		FS	81	48	59	10	23	99	320
			25%	15%	18%	3%	7%	31%	100%
Total		157	163	106	32	43	186	687	
		23%	24%	15%	5%	6%	27%	100%	

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

La mayoría de los viajes se realizan con una frecuencia diaria. Sin embargo, hay segmentos de la frecuencia donde se tiene muestras menores de 30 usuarios, por lo que se podrían agrupar en tres segmentos, como por ejemplo, diario, regular (mensual, quincenal, y semanal) y ocasional (ocasional y anual), con lo que obtendría una mayor muestra por segmento. La siguiente tabla muestra la agrupación de los usuarios de acuerdo a la frecuencia del viaje.

Tabla 32 Frecuencia de viaje agrupados por periodo y estación de los usuarios de automóviles (EPD)

Tipo vehículo	Estación	Periodo	Diario	Regular	Ocasional	Total
Auto	1	ES	82	107	73	262
			31%	41%	28%	100%
		FS	101	140	95	336
			30%	42%	28%	100%
	Total	183	247	168	598	
		31%	41%	28%	100%	
	2	ES	115	154	98	367
			31%	42%	27%	100%
		FS	48	181	91	320
			15%	57%	28%	100%
Total		163	335	189	687	
		24%	49%	28%	100%	

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

A partir de esta agregación, se tiene una mayor muestra en cada nuevo segmento. Por lo que, el mayor porcentaje de los viajes se realizan con una frecuencia regular. El usuario realiza su viaje al mes, a la quincena o semanal. Y puede atribuirse a viajes cuyo motivo sea la recreación, y/o personas que trabajan en zonas urbanas de mayor desarrollo económico, y regresan los fines de semana a su lugar de origen.

A partir de la segmentación realizada para automóviles, se aplica de igual forma para los camiones unitarios. La siguiente tabla muestra la frecuencia de viaje de los usuarios de camiones unitarios.

Tabla 33 Frecuencia de viaje agrupados por periodo y estación de los usuarios de camiones unitarios (EPD)

Tipo vehículo	Estación	Periodo	Diario	Regular	Ocasional	Total
Cu	1	ES	17	30	5	52
			33%	58%	10%	100%
		FS	51	45	14	110
			46%	41%	13%	100%
		Total	68	75	19	162
	%	42%	46%	12%	100%	
	2	ES	2	17	7	26
			8%	65%	27%	100%
		FS	18	42	8	68
			26%	62%	12%	100%
Total		20	59	15	94	
%	21%	63%	16%	100%		

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

Los viajes en camiones unitarios se realizan con una frecuencia regular. Sin embargo, los tamaños del resto de los segmentos son bajos, por lo que no se podría estimar un valor del tiempo a partir de cada segmento por la frecuencia de viaje de los usuarios. Cabe señalar, que en la práctica es difícil encontrar diferentes estimaciones del valor del tiempo para diferentes segmentos de la demanda, debido al tamaño y calidad de la información de la muestra recolectada en campo.

La siguiente tabla muestra la frecuencia de viaje de los usuarios de camiones articulados.

Tabla 34 Frecuencia de viaje agrupados por periodo y estación de los usuarios de camiones articulados (EPD)

Tipo vehículo	Estación	Periodo	Diario	Regular	Ocasional	Total
Ca	1	ES	2	3	0	5
			40%	60%	0%	100%
		FS	0	6	3	9
			0%	67%	33%	100%
		Total	2	9	3	14
	%	14%	64%	21%	100%	
	2	ES	0	0	0	0
			0%	0%	0%	0%
		FS	0	9	0	9
			0%	100%	0%	100%
Total		0	9	0	9	
%	0%	100%	0%	100%		

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

La mayoría de los viajes que se realizan en camión articulado se realizan con una frecuencia regular. Cabe señalar, que no se tiene información de entre semana de la estación 2. Por lo que, para la estimación del valor del tiempo de los usuarios se agrupan los datos de ambas estaciones para tener un VOT de la región de estudio.

Respuesta de los usuarios

Para cada usuario de acuerdo al tipo de vehículo, se tiene un diseño de las tarjetas presentadas. Tanto para Cu y Ca, se utilizó el mismo diseño. Estrictamente debería ser diferente cada diseño, pero debido a la poca afluencia de camiones articulados por la región, se consideró un solo diseño. En ocasiones, es benéfico tomar estas medidas, ya que disminuye los costos de la realización de los trabajos de campo, que suelen ser lo más costosos de un estudio de transporte.

Se analizaron nueve respuestas de nueve tarjeteros para cada tipo de vehículo. En cada tarjetero se mostraba tres opciones, y el usuario elegía una. La respuesta tres es que le significaba indiferencia al usuario elegir una opción sobre otra. La siguiente tabla muestra las respuestas de los usuarios de automóviles.

Tabla 35 Resultados de las selecciones realizadas por los usuarios de automóvil (EPD)

Tipo vehículo	Estación	Periodo	0	1	2	3	Total
Au	1	ES	105	1,055	961	237	2,358
			4%	45%	41%	10%	100%
		FS	31	1,306	1,562	125	3,024
			1%	43%	52%	4%	100%
	Total	136	2,361	2,523	362	5,382	
	%	3%	44%	47%	7%	100%	
	2	ES	6	1,174	1,929	194	3,303
			0%	36%	58%	6%	100%
		FS	40	1,046	1,703	91	2,880
			1%	36%	59%	3%	100%
Total	46	2,220	3,632	285	6,183		
%	1%	36%	59%	5%	100%		

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

donde:

Respuesta	Descripción
0	No contesto
1	Situación actual
2	Situación proyecto
3	Indiferente

En un porcentaje mayor del 3%, los usuarios de la estación 1 prefieren la situación actual. Y los usuarios de la estación 2, prefieren la alternativa que incluye la nueva autopista. Las respuestas tienen lógica, ya que los mayores tiempos de viaje se registran sobre la carretera donde se ubicó la estación 2 (Aticama – San Blas). También es la estación que presenta en fin de semana como principal motivo de viaje la recreación, por lo que son usuarios que tienen una mayor disposición a pagar por ahorrar tiempo en su viaje.

También para los usuarios de camiones unitarios se le presentaron 9 tarjetas con tres repuestas por tarjeta. Cabe señalar, que los valores de tiempo y costo son diferentes al de los automóviles. La siguiente tabla muestra las respuestas de los usuarios de camiones unitarios.

Tabla 36 Resultados de las selecciones realizadas por los usuarios de camiones unitarios (EPD)

Tipo vehículo	Estación	Periodo	0	1	2	3	Total
Cu	1	ES	27	220	158	63	468
			6%	47%	34%	13%	100%
		FS	33	509	441	7	990
			3%	51%	45%	1%	100%
		Total	60	729	599	70	1,458
	%	4%	50%	41%	5%	100%	
	2	ES	0	142	65	27	234
			0%	61%	28%	12%	100%
		FS	0	299	231	82	612
			0%	49%	38%	13%	100%
Total		0	441	296	109	846	
%	0%	52%	35%	13%	100%		

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

Como el principal motivo de viaje es el trabajo o relacionado con el trabajo de los usuarios que operan camiones unitarios presentan una mayor respuesta a la alternativa de usar la nueva autopista Tepic – San Blas. Siendo mayor en la estación 2 que en la estación 1.

Para los usuarios que operan camiones articulados se aplicó el mismo diseño que el de camiones unitarios. La siguiente tabla muestra sus respuestas.

Tabla 37 Resultados de las selecciones realizadas por los usuarios de camiones articulados (EPD)

Tipo vehículo	Estación	Periodo	0	1	2	3	Total
Ca	1	ES	0	16	20	9	45
			0%	36%	44%	20%	100%
		FS	0	34	47	0	81
			0%	42%	58%	0%	100%
	Total	0	50	67	9	126	
	%	0%	40%	53%	7%	100%	
	2	ES	0	0	0	0	0
			0%	0%	0%	0%	0%
		FS	0	26	37	18	81
			0%	32%	46%	22%	100%
Total		0	26	37	18	81	
%		0%	32%	46%	22%	100%	

Fuente: Elaboración propia con información de la C&M

En un porcentaje mayor, las respuestas que dieron los usuarios que operan camiones articulados fue la de seleccionar la ruta actual. Lo cual, no sucede como con los usuarios de camiones unitarios. Cabe señalar, que la muestra obtenida no está completa, muestra un sesgo en los usuarios de entre semana de la estación 2, no se obtuvo la información.

Por lo que para la estimación del valor del tiempo para los usuarios que operan camiones articulados, se sumarán a los de camiones unitarios, para complementar la información. Esta integración se puede realizar, debido a que aplicó el mismo diseño para ambos usuarios.

A partir de este análisis de la encuesta de preferencia declarada, se puede ir definiendo segmentos de la demanda. A estos, habrá que estimar su valor del tiempo (VOT o VST) a partir de calibrar el modelo de selección discreta elegido, en este caso un modelo LOGIT.

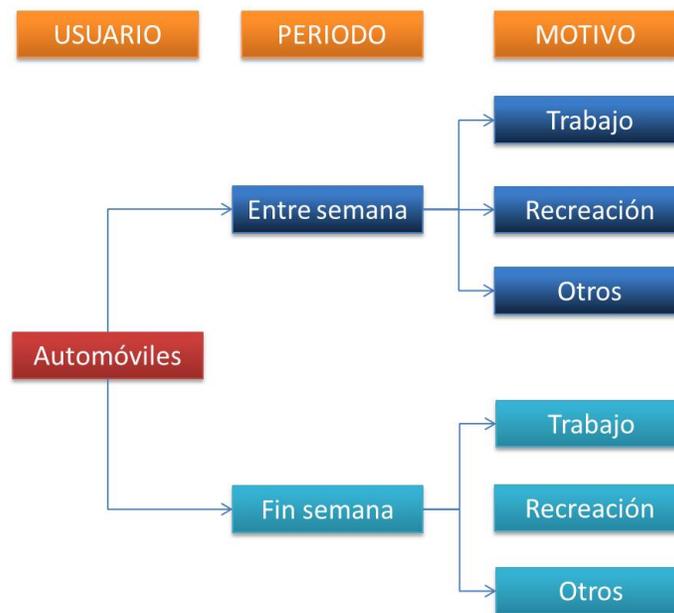
Cabe señalar, que dentro del proceso de la calibración del modelo LOGIT, que sirve para la estimación de los parámetros y variables. Van cambiando los segmentos de la demanda, es decir, se van agrupando o desagrupando la información, hasta obtener que el modelo es significativo y preciso estadísticamente. Es decir, que puede replicar las selecciones de los usuarios a partir de sus características socioeconómicas y las características de las alternativas mostradas dentro de la encuesta de preferencia declarada.

4.6 Definición del modelo LOGIT BINARIO

La demanda del área de interés está compuesta por los usuarios de automóviles, camiones unitarios y articulados. De cada uno de estos segmentos se analizaron sus características socioeconómicas, con la finalidad de desagregarlos en sub-segmentos más específicos de la demanda. Tomando en cuenta, la diferente disponibilidad de pagar una cuota por los beneficios de usar una nueva autopista.

Del análisis estadístico de los usuarios de automóviles se observó, que es la mayor composición vehicular del área, y realizan su viaje de manera regular. Y dentro de sus características socioeconómicas que presentan la mayoría de los usuarios, es un nivel de ingresos menor o igual a \$7,500 MXN, y sus principales motivos de viaje es por trabajo y recreación. A partir de este análisis se realiza la siguiente estratificación de la demanda, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 47 Estratificación de la demanda de los usuarios de automóviles



Fuente: Elaboración propia con información de C&M

Tomando como base esta segmentación, se desagrega la base de datos de la encuesta de preferencia declarada. Lo que se obtiene son sub-bases de datos que representa los diferentes segmentos de demanda de los usuarios de automóviles. En esta base, se incluye sus características socioeconómicas, y los atributos de las dos alternativas de viaje.

A partir de estos datos, se calibra el modelo LOGIT BINOMIAL, para obtener los parámetros de la función de utilidad. De acuerdo a esto, el modelo es el siguiente.

$$P(1) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda(\alpha_2 + \beta C_2 + \gamma VS_2 - (\alpha_1 + \beta C_1 + \gamma VS_1 + CTE))}} \dots\dots\dots 4.1$$

donde:

α : Coeficiente de costo de viaje.

β : Coeficiente de tiempo de viaje.

C_i : Costo del viaje por una alternativa A_i .

T_i : Tiempo de viaje por una alternativa A_i .

γ : Coeficiente de la variable subjetiva del viaje.

VS : Valor de la variable subjetiva del viaje.

Cte : Valores no observados por el modelador o analista de transporte.

Cada alternativa tiene un diferente valor del tiempo y costo, y sobre estos atributos, realizó su selección el usuario. Aquella que le proporcionaba un mayor beneficio, como el ahorro de tiempo.

Al usuario se le presentaron dos alternativas para realizar su viaje, la alternativa actual y la alternativa que incorpora a la nueva autopista. Cada alternativa tiene sus características de tiempo y costo, con lo que se define las siguientes funciones de utilidad.

$$U_{A1} = \alpha \cdot \text{Costo}_{A1} + \beta \cdot \text{Tiempo}_{A1} + Cte \dots\dots\dots 4.2$$

$$U_{P1} = \alpha \cdot \text{Costo}_{P1} + \beta \cdot \text{Tiempo}_{P1} + Cte \dots\dots\dots 4.3$$

donde,

U_{A1} : Utilidad de la alternativa actual, usuarios de automóvil.

U_{P1} : Utilidad de la alternativa con la nueva autopista, usuarios de automóvil.

En este caso, no se incorpora una variable subjetiva al modelo. Esto se debe, que solo se tomó como variables significativas el tiempo y costo para la comparación

de alternativas, y no se incorporó una variable subjetiva, como en este caso podría ser la preferencia de usar una vía por ser panorámica, por su comodidad o seguridad. A partir de una variable cualitativa, se puede parametrizar con una variable cuantitativa, como por ejemplo, la seguridad con el número de accidentes sobre las carreteras del área.

Para la segmentación de la demanda de los usuarios de camiones, se observó que el flujo vehicular de camiones articulados es menor comparada con los camiones unitarios, y se tomó el mismo diseño de tarjeta para la presentación de los escenarios hipotéticos. De tal forma, que se suman las muestras de ambos tipo de vehículo, para hacerla más representativa. La siguiente figura muestra la segmentación de los usuarios de camiones.

Figura 48 Estratificación de la demanda de los usuarios de camiones



Fuente: Elaboración propia con

Esta segmentación define solo a los usuarios de entre semana y fin de semana, ya que no se presenta otra variable, que sea significativa para los usuarios de camiones. Además, la muestra es pequeña comparada con la de autos, y realizar otra segmentación, decrecería la muestra. Y lo que, puede resultar es que no sea significativa y precisa para definir las características de los usuarios de camiones.

Al igual que los usuarios de automóviles, a los de camiones se les presentaron dos alternativas para realizar su viaje. A continuación, se define sus funciones de utilidad.

$$U_{A2} = \alpha \cdot \text{Costo}_{A2} + \beta \cdot \text{Tiempo}_{A2} + \text{Cte} \dots\dots\dots 4.4$$

$$U_{p_2} = \alpha \cdot \text{Costo}_{p_2} + \beta \cdot \text{Tiempo}_{p_2} + \text{Cte} \dots\dots\dots 4.5$$

donde,

U_{A1} : Utilidad de la alternativa actual, usuarios de camiones.

U_{P1} : Utilidad de la alternativa con la nueva autopista, usuarios de camiones.

A partir de los valores de tiempo y costo de cada alternativa, se sustituyen en cada uno de los segmentos definidos. Por ejemplo, las siguientes funciones de utilidad son de los usuarios de automóviles que realizan su viaje entre semana, su motivo de viaje es trabajo.

$$U_{A1} = \alpha \cdot 0_{A1} + \beta \cdot 75_{A1} + \text{Cte} \dots\dots\dots 4.6$$

$$U_{P1} = \alpha \cdot 80_{P1} + \beta \cdot 25_{P1} + \text{Cte} \dots\dots\dots 4.7$$

donde,

Tiempo: unidades en minutos

Costo: \$MXN

Se puede observar que no hay cobro por la alternativa actual, ya que se trata de una vía libre. Sin embargo, se consideró que una variante del viaje actual, incluye una vía de cuota, que es la de la autopista Tepic – Villa Unión, como se muestra en la figura siguiente.

Figura 49 Ubicación de las vías cuota de la región



Fuente: Elaboración propia con información de Google Earth

Las alternativas de ruta de viaje A1 y C1 son las carreteras federales libres, en la cual no se cobra peaje. Y la alternativa B1, se cobra cuota por usar la autopista Tepic – Villa Unión.

Para la definición de las funciones de utilidad de los camiones, se tomó la consideración anterior. Las siguientes funciones definen la utilidad de los usuarios de camiones que realizan su viaje entre semana.

$$U_{A2} = \alpha \cdot 0_{A2} + \beta \cdot 85_{A2} + Cte \dots\dots\dots 4.8$$

$$U_{P2} = \alpha \cdot 120_{P2} + \beta \cdot 25_{P2} + Cte \dots\dots\dots 4.9$$

Definidas las funciones de utilidad de cada uno de los segmentos de demanda, se debe calibrar el modelo LOGIT, que replique la selección del usuario, por lo que se debe calibrar el modelo.

La calibración consiste en la estimación de los parámetros $\alpha, \beta, y \lambda$, como se explicó en el inciso 3.7, no se pueden obtener por el método de mínimos cuadrados ordinarios, por lo que la estimación se realiza con el método de máxima verosimilitud.

4.7 Calibración del modelo LOGIT

La estimación de los parámetros α y β , se realiza con el método de máxima verosimilitud, que consiste en estimar los parámetros desconocidos de tal manera que la probabilidad de observar las Y dadas sea lo más alta posible, para encontrar el máximo de la función. Para esto se puede utilizar como herramienta el uso de un software estadístico, como MINITAB, SPSS, STATA, EViews, ALOGIT, BIOGEME, etc.

Para este caso se utilizó el software BIOGEME⁴⁴, que es un software gratuito de código abierto, diseñado para la estimación de modelos de selección discreta. Por lo que permite la estimación de los parámetros del modelo LOGIT BINARIO. El siguiente es una simplificación del procedimiento para usar el software.

De la base de datos se realizó lo siguiente:

- 1) Se codificaron los usuarios de los diferentes tipos de vehículos (Automóviles=1, Camiones=2).
- 2) Se codificaron las variables socioeconómicas de la base de datos, como por ejemplo, para el motivo de viaje (trabajo=1, recreación=2, otros=3).
- 3) Se codificaron los periodos de viaje (Entre semana=1, Fin de semana=2)
- 4) Se codificaron las respuestas de los usuarios (alternativa A_1 =1, alternativa P_1 =2, indiferente=0)

Se puede codificar toda la base de datos, o cada segmento definido. Según la práctica, lo mejor, es utilizar la base completa codificada en un inicio, y posterior a la calibración, guardar las bases por cada uno de los segmentos definidos. La siguiente figura muestra la codificación de la base de datos de la encuesta de preferencia declarada.

⁴⁴ <http://biogeme.epfl.ch/>

Figura 50 Base de datos codificada de la encuesta de preferencia declarada

Fuente: Elaboración propia con información de C&M

En ocasiones se tiene que agregar variables que sirven como filtros, con la finalidad de mejorar la calidad de la muestra. Como por ejemplo, se ocupó la variable “ncuota”, que sirve para filtrar a los usuarios que no pagaron cuota en su viaje actual, que ellos mismos la pagaron, pago la empresa o no contesto esa pregunta. La siguiente tabla muestra la codificación de las variables.

Tabla 38 Claves para la codificación de las variables de la encuesta de preferencia declarada

Clave	Variable	Codificación			
per	periodo	ES=1	FS=2		
est	Estación	Est1 = 1	Est2 = 2		
sent	sentido	a San Blas = 4	a Tepic = 2		
tp	tipo vehiculo	Autos =1	Camiones = 2		
nmot	motivo	Trabajo =1	Recreación =2	Otro =0	
ning	menor de 7,500 = 1	mayor de 7,501 = 2			
ncuota	Pago cuota	No = 1	Usted =2	La empresa =3	No contesto = 4
ddis	diseño de tarjeta	TA11 = 1	TA12 = 2	TU11=3	TU12=4
resp	respuesta	Alternativa A =1	Alternativa B =2	Alternativa C =3	
sare	variación respuesta	misma = 1	una diferen =2	variado = 3	

Fuente: Elaboración propia

Para realizar la estimación de los parámetros del modelo LOGIT, con el software BIOGEME, se requiere de programar el algoritmo⁴⁵, que contenga la estructura de las funciones de utilidad de cada alternativa, así como las variables codificadas. Por lo que, se crea un archivo con la programación, con extensión .MOD. Cabe señalar, que la extensión del archivo de la base es .DAT.

La siguiente figura muestra la programación del algoritmo del modelo LOGIT con el software BIOGEME. Este software es gratuito, y se puede descargar de internet.

Figura 51 Programación del modelo LOGIT BINARIO con software BIOGEME

```

1 // File MODELO_PD.mod
2
3 [ModelDescription]
4 "Modelo PD "
5 "This file contains the minimum model description needed by BIOGEME"
6 "Note that ASCII is constrained to 0.0 and will not be estimated"
7 "JOSE LUIS OLMEDO LOPEZ, ABRIL 8 2013"
8
9 [Choice]
10 choice
11
12 [Beta]
13 // Name Value LowerBound UpperBound status (0=variable, 1=fixed)
14 B1 -2.0e-02 -1.0 1.0 0
15 B2 -2.0e-02 -1.0 1.0 0
16
17 [Utilities]
18 // Id Name Avail linear-in-parameter expression (beta1*x1 + beta2*x2 + ...)
19
20
21 1 LIBRE Av1 B1 * t0 + B2 * c0
22 0 CUOTA Av2 B1 * t1 + B2 * c1
23
24
25 [Expressions]
26 // Define here arithmetic expressions for name that are not directly
27 // available from the data
28 one = 1
29 Av1 = 1
30 Av2 = 1
31
32 choice = ( resp = 1 )
33
34
35 [Exclude]
36 // Condicion que se excluye
37 ( per = 1 ) || ( tp = 1 ) || ( nmot = 1 ) || ( ning = 2 ) || ( ncuota = 1 ) || ( resp = 3 ) || ( sares = 1 ) || ( sares = 2 ) || ( ncuota = 1 )
38
39
40 [Ratios]

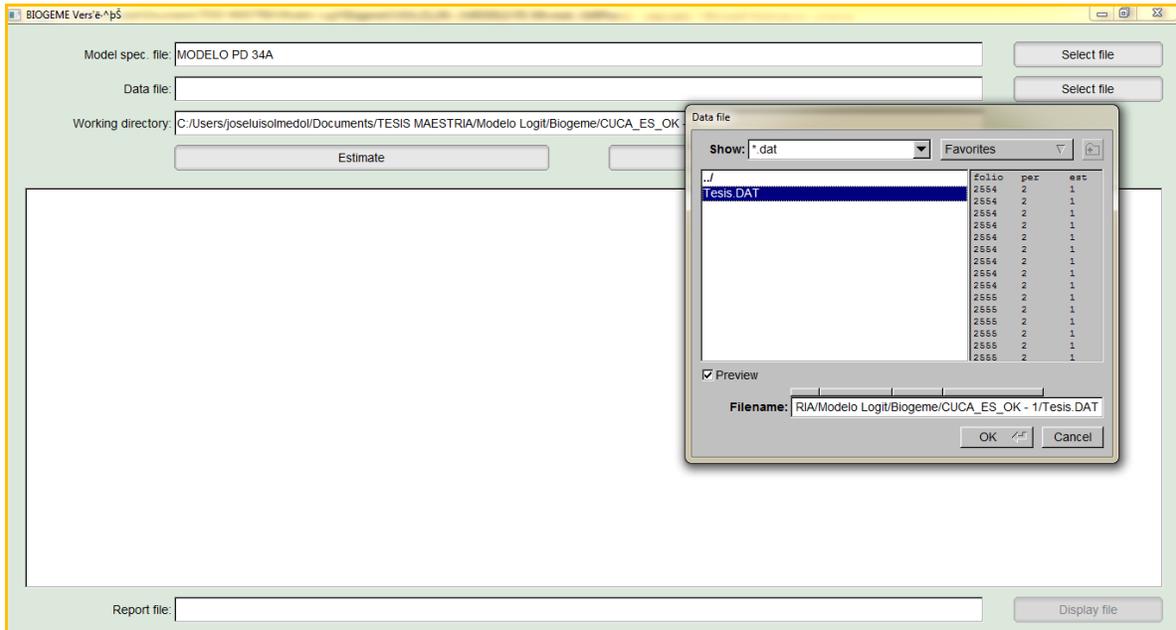
```

Fuente: Elaboración propia con información de BIOGEME

Esta programación cambia de acuerdo a los diferentes segmentos de la demanda que se requiera estimar su valor del tiempo. Una vez realizada la programación del modelo LOGIT y de la codificación de la base de datos, se carga al software BIOGEME. La siguiente figura muestra la carga de datos al software.

⁴⁵ En la siguiente dirección de internet, se puede consultar el tutorial para la programación del algoritmo con el software BIOGEME, <http://biogeme.epfl.ch/v18/tutorialv18.pdf>

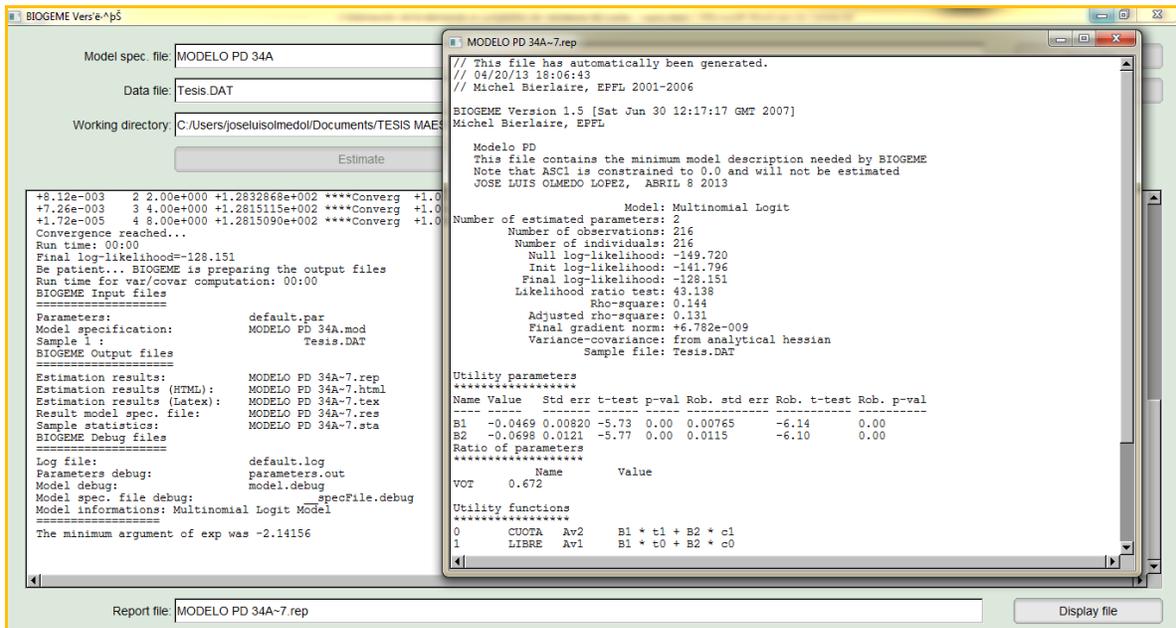
Figura 52 Interface del software BIOGEME para cargar base de datos



Fuente: Elaboración propia con información de BIOGEME

Cabe señalar que esta no es una versión (1.5) actualizada del software, pero se puede actualizar dentro de su página web. Los resultados que arroja el software BIOGEME, se muestra en la siguiente figura.

Figura 53 Interface de los resultados arrojados por el software BIOGEME



Fuente: Elaboración propia con información de BIOGEME

A partir de este proceso, se realizó la estimación de los parámetros de la función de utilidad de cada uno de los segmentos de demanda definidos. La siguiente tabla muestra los valores de los coeficientes de tiempo y costo, así como el valor subjetivo del tiempo (VOT ó VST) de los usuarios de automóvil.

Tabla 39 Valor subjetivo del tiempo de los usuarios de automóviles

Tipo de Vehículo	Periodo	Motivo	Coefficiente de tiempo	Coefficiente de costo	VST ó VOT
			(1/min)	(1/\$)	(\$/min)
Automóvil	Entre semana	Trabajo	-0.0481	-0.0588	0.82
		Recreación	-0.0593	-0.0747	0.79
		Otro	-0.0390	-0.0472	0.826
	Fin Semana	Trabajo	-0.0159	-0.0242	0.66
		Recreación	-0.0598	-0.0757	0.79
		Otro	-0.0550	-0.0704	0.78

Fuente: Elaboración propia con información de BIOGEME

Como se puede observar el valor subjetivo del tiempo de los usuarios que viajan por motivo de recreación es mayor en fin de semana que por motivo trabajo. Esto se debe, al incremento de la afluencia de viajeros de otros Estados a esa región turística del estado de Nayarit, y tienen una mayor disposición a pagar por ahorrar tiempo de su viaje.

El valor subjetivo del tiempo por motivo de trabajo es mayor entre semana que en fin de semana, ya que la mayoría de los viajes los realizan las personas de la región. Y el VST de los usuarios que viajan en fin de semana por otros motivos es mayor que por el motivo de trabajo, ya que uno de los principales “otros” motivos, es el viaje al hogar.

La siguiente tabla muestra los valores de los coeficientes de tiempo y costo, así como el valor subjetivo del tiempo (VOT ó VST) de los usuarios de camiones.

Tabla 40 Valor subjetivo del tiempo de los usuarios de camiones

Tipo de Vehículo	Periodo	Coefficiente de tiempo	Coefficiente de costo	VST ó VOT
		(1/min)	(1/\$)	(\$/min)
Camión	Entre semana	-0.0506	-0.0796	0.6357
	Fin semana	-0.0469	-0.0698	0.6719

Fuente: Elaboración propia con información de BIOGEME

Debido al poco flujo de camiones en el área de interés, y a que la mayoría de los viajes entre semana son dentro de la región, y son usuarios de camiones unitarios en su mayoría, el VST es menor al de fin de semana, que tiene un mayor número de usuarios de otros Estados colindantes.

Para la calibración del parámetro λ , que es un parámetro de dispersión del modelo LOGIT. Se puede considerar que su valor es igual a 1⁴⁶, o se puede estimar con el método de máxima verosimilitud. La siguiente tabla muestra los valores del parámetro λ para cada segmento de demanda.

Tabla 41 Valores del parámetro de dispersión λ

Tipo de Vehículo	Periodo	Motivo	λ
Automóvil	Entre semana	Trabajo	1.8
		Recreación	1
		Otro	1.6
	Fin Semana	Trabajo	1.8
		Recreación	1
		Otro	1
Camión	Entre semana	---	1
	Fin semana	---	1

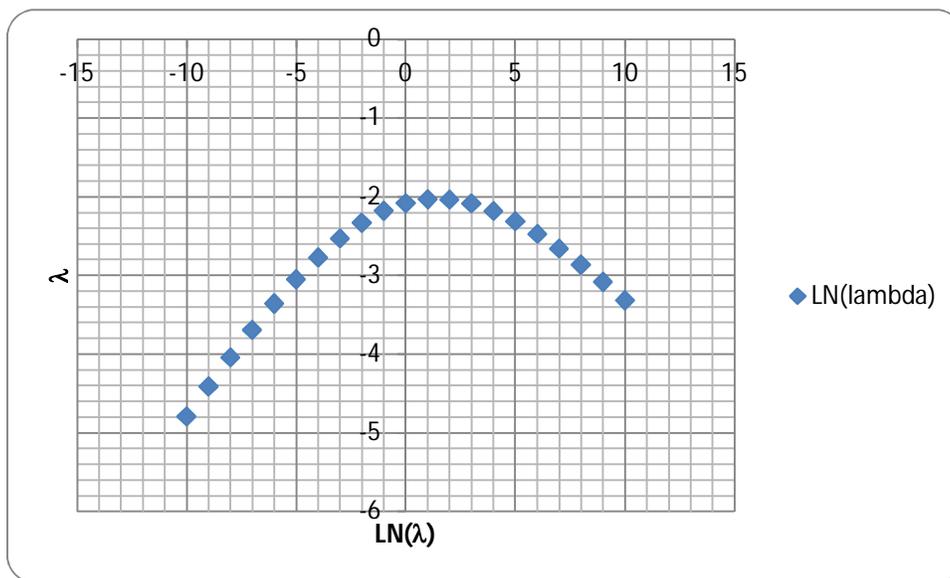
Fuente: Elaboración propia con información

En algunos casos de la estimación del parámetro λ , se presentó que la captación de la nueva autopista era grande, debido al ahorro del tiempo, y esto no era congruente con la selección del usuario que hizo en campo, por lo que se dejó el valor de 1, para esos casos.

La obtención del valor de λ se obtuvo graficando, y se tomó el valor que maximiza la función definida para el método de máxima verosimilitud. Esto se muestra en la siguiente gráfica.

⁴⁶ La estimación del valor de λ , se detalla dentro del inciso 3.1.

Figura 54 Estimación del valor λ



Fuente: Elaboración propia con información

Para construir la curva, se estimó la probabilidad de que un usuario eligiera la nueva ruta sobre las otras rutas alternas, a partir de los ahorros de tiempo y costos de cada alternativa.

4.8 Estadística del ajuste del modelo LOGIT

En la estimación de cada uno de los parámetros de la función de utilidad con el método de máxima verosimilitud se obtuvieron índices para examinar y analizar la precisión de la estimación y la significancia de los parámetros calculados, con el objetivo de seleccionar el modelo más adecuado. La siguiente tabla muestra los índices estimados de cada uno de los parámetros, para cada uno de los segmentos de demanda.

Tabla 42 Índices estadísticos de ajuste del modelo LOGIT

Segmentación			Coeficiente Tiempo			Coeficiente Costo		
Tipo de Vehículo	Periodo	Motivo	t	P-value	Error Standard	t	P-value	Error Standard
Automóvil	Entre semana	Trabajo	3.4	0.0	0.014	3.2	0.0	0.018
		Recreación	5.4	0.0	0.011	5.4	0.0	0.014
		Otro	4.1	0.0	0.010	3.7	0.0	0.013
	Fin Semana	Trabajo	3.0	0.0	0.005	3.3	0.0	0.007
		Recreación	4.4	0.0	0.014	4.1	0.0	0.018
		Otro	4.3	0.0	0.013	4.0	0.0	0.018
Camión	Entre semana	---	3.7	0.0	0.014	3.8	0.0	0.021
	Fin semana	---	5.7	0.0	0.008	5.8	0.0	0.012

Fuente: Elaboración propia con información de BIOGEME

Se usó un intervalo de confianza del 95%, dando como resultados valores de $t > 1.96$, y errores estándar menores del 3% de cada una de las muestras de la encuesta de preferencia declarada. La probabilidad que se obtenga un parámetro igual a cero casi es nula, dado que los valores de P-value son igual a cero.

4.9 Segmentación de la demanda

Dentro del análisis estadístico de la encuesta de origen – destino, se obtuvo una aproximación de la segmentación de la demanda del área de interés, y se volvió a corroborar al analizar la información de la encuesta de preferencia declarada. De tal forma, que para la estimación de los parámetros del modelo LOGIT, que definen el valor subjetivo del tiempo de los diferentes segmentos de la demanda del área de interés, se corroboran los segmentos de demanda analizados. La siguiente tabla muestra los segmentos de la demanda que captará la nueva autopista Tepic – San Blas.

Tabla 43 Segmentación de la demanda del proyecto autopista Tepic – San Blas

Tipo de Vehículo	Periodo	Motivo
Automóvil	Entre semana	Trabajo
		Recreación
		Otro
	Fin Semana	Trabajo
		Recreación
		Otro
Camión	Entre semana	---
	Fin semana	---

Fuente: Elaboración propia

A partir de cada uno de los segmentos definidos, se obtendrá la captación que tendrá la nueva autopista Tepic – San Blas. Para la estimación, se utilizará los valores subjetivos del tiempo de cada segmento dentro del modelo LOGIT BINARIO definido.

4.10 Estimación de la demanda

Se estimó la demanda de la nueva autopista Tepic – San Blas con el modelo Logit Binomial definido. Para cada segmento se estimó el porcentaje de usuarios a usar el proyecto. La siguiente tabla muestra el porcentaje de viajes captados.

Tabla 44 Volumen captado por la nueva autopista Tepic - San Blas en su año base

Tipo de Vehículo	Viajes potenciales	Captación	%
Autos	1,720	1,050	61%
Camiones	123	30	24%

Fuente: Elaboración propia

Hay una mayor captación de automóviles que de camiones. Este valor, es un reflejo de los usuarios que en la encuesta de preferencia declarada escogieron en un porcentaje mayor por usar la nueva autopista sobre las vías actuales. En el caso de camiones, un porcentaje mayor de los usuarios de camiones unitarios escogieron la vía actual.

Para corroborar el comportamiento de seleccionar una ruta para realizar su viaje de los usuarios del área de interés, se puede utilizar los datos viales de la SCT

como referencia. La siguiente tabla muestra el porcentaje de viajes que se realizan por la vía libre y cuota, dentro del trayecto Villa Unión – Tepic, a partir de los puntos de datos viales históricos analizados.

Tabla 45 Porcentaje de captación de la autopista Villa Unión vs federal libre

Vía	Autos	Camiones
Libre	68%	78%
Cuota	32%	22%
%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia con información del SCT, año 2012

Como se puede observar son datos, parecidos a los estimados para la autopista Tepic – San Blas. A partir de esta estimación de la demanda, se realizó un estudio de evaluación socioeconómica y financiera para estimar su viabilidad.

Analizando los números estimados de la demanda, son bajos para decir que se requiere de una nueva autopista dentro de la región. Probablemente, dentro de la evaluación socioeconómica se ve un potencial de desarrollar la región como zona turística al nivel de Puerto Vallarta, con la finalidad de ser competencia como centro turístico.

5 Conclusiones

1. En la planeación del transporte para la estimación de la demanda de una nueva carretera con cobro cuota, se toma como base al modelo clásico de transporte de las cuatro etapas. Sin embargo, sufre modificaciones en algunas de sus etapas a partir del desarrollo de herramientas computacionales y/o metodologías que sirven de complemento al modelo clásico, para hacerlo más eficaz en algunos estudios.
2. El uso de información desagregada para realizar un estudio de transporte de un proyecto carretero. Ha aportado a tener una mayor precisión del comportamiento del usuario del área de interés a través de recolectar sus características socioeconómicas de encuestas origen – destino, preferencia declarada y preferencia revelada.
3. A partir de un análisis estadístico adecuado de la información de la encuesta origen - destino, se puede realizar una aproximación de los diferentes segmentos de la demanda. Y posteriormente, se puede corroborar a partir de la estimación de los VST o VOT de cada segmento encontrado de la encuesta de preferencia declarada.
4. El análisis estadístico de la encuesta de preferencia declarada, ayudará a agrupar o desagrupar la información de los usuarios. Con el objetivo de tener muestras significativas e interpretativas de una muestra de la población del área de interés. En ocasiones, debido a la calidad de la información no se podrá obtener un mayor número de segmentos de la demanda de una población que usará la nueva carretera.
5. Para la inclusión de una variable cualitativa a los atributos de las diferentes alternativas de ruta o caminos, que se presentan dentro de los escenarios hipotéticos de la encuesta preferencia declarada. Tendrá que ser una que se pueda parametrizar con otra variable cuantitativa de la que se tengan datos históricos del área de interés. Con la finalidad de que se pueda dar una adecuada interpretación de la misma. Sin embargo, hay que tener en cuenta que los usuarios pueden presentar diferentes percepciones e interpretaciones sobre una variable cuantitativa.
6. En el caso de presentar a un usuario un escenario de dos alternativas para realizar su viaje, la actual y la nueva autopista. El uso del modelo LOGIT BINOMIAL es el adecuado, debido a su fácil estimación a partir de software con plataformas de análisis estadístico, como SPSS, EVIEWS, MINITAB,

STATA, etc. En este caso, para el estudio se utilizó el software BIOGEME, que se especializa en la estimación de los parámetros de modelos de selección discreta como es el caso del modelo LOGIT.

7. El uso de herramientas como el software, es benéfico para realizar cuantas estimaciones y cambios de los parámetros del modelo LOGIT se requiera en plazos de tiempo cortos. Sin embargo, en ocasiones, no se puede observar el hecho de que cada respuesta de un usuario le corresponde una función de utilidad, y que se tiene “n” funciones de utilidad como “n” respuestas de los usuarios se tenga.
8. Las variables de viaje a las que son más perceptibles los usuarios, sin duda alguna son el tiempo y el costo. Sin embargo, solo perciben la mayoría de las veces los tiempos de traslados, o lo ven como un tiempo que va de un origen a un destino, y en ocasiones para la mayoría de casos de un proyecto como una nueva autopista no se requiere tener una especificación detallada de los diferentes tiempos.
9. El método de máxima verosimilitud resulta ser de gran utilidad para la estimación del valor de λ , que es el parámetro de dispersión del modelo LOGIT. En la práctica el valor que se asigna como base es 1, y esto se debe a la tendencia a la normalización del comportamiento de la información, como se observa para muestras grandes. Sin embargo, λ se modifica por diversos factores asociados a estadísticas del comportamiento de otras autopistas cercanas a la nueva, es decir, que de una aproximación semejante o cercana a la captación vehicular de esa autopista en operación. Pero con la aplicación del método de máxima verosimilitud se podría corroborar es valor de λ . Pero siempre cuidando que el valor responda al comportamiento de las respuestas de los usuarios recabadas en campo.
10. Una parte importante dentro de la estimación de los parámetros de tiempo y costo que definen al VST o VOT, son los signos de sus valores. Para lo cual, se debe encontrar su interpretación a partir de las variables que se están empleando dentro de la función de utilidad de cada una de las alternativas, y de los variables que se emplean como filtros para la calibración del modelo LOGIT.
11. El valor subjetivo del tiempo de viaje de un usuario por motivo de trabajo, suele ser mayor al de un usuario que su motivo de viaje es por recreación. Pero en una región turística, suele ser al revés.

12. Se dificulta la estimación del valor subjetivo del tiempo de usuarios de camiones, debido a que la mayoría de las veces paga la cuota la empresa, dueña del camión y del servicio. Ocasionando información sesgada, y modelos sin sensibilidad al cambio de la demanda por incrementos de la tarifa. De tal forma, que se tenga que sumar ambas muestras de camiones unitarios y articulados para obtener un solo VOT para ambos. Actualmente se emplean otras metodologías para el diseño y aplicación de la encuesta, y consiste a través de realizar la encuesta en grupos focales antes de su aplicación final, y tiene la finalidad de identificar posibles errores del diseño de la EPD a partir de la experiencia del grupo focal. Y otra forma de estimación del VST de camiones, es a partir de usar valores agregados, como son las variables socioeconómicas a nivel población. El Instituto Mexicano del Transporte realizó un estudio con datos agregados para la estimación del valor del tiempo para pasajeros.
13. La estadística del ajuste del modelo LOGIT se debe realizar, para que el modelo sea capaz de replicar el comportamiento de las selecciones de los usuarios. La mayoría de software proporcionan estos índices de la calidad de significancia y precisión de la estimación de los parámetros.
14. Este trabajo de tesis amplió el panorama de los diversos usos del modelo LOGIT, ya que no solo se utiliza en dos de sus cuatro fases del modelo clásico de transporte, donde se resuelve el valor subjetivo del tiempo de los usuarios en el caso de que las alternativas son caminos o carreteras. Si no, que además tiene aplicaciones en estudios sociales y económicos, donde intervienen sectores como la educación, la política, la salud, etc.

6 Bibliografía

Aparicio Izquierdo Francisco. (2008). Ingeniería del transporte. DOSSAT 2000. Capítulo 2 y 6.

Cal y Mayor y Asociados. (2004). Desarrollo de una metodología para la elaboración de estudios de demanda y de asignación de tránsito en proyectos de infraestructura carretera. C&M.

Díaz, Saad, Grajeda. (2005). Modelo de asignación para los flujos de libramiento y acceso al área metropolitana de la Ciudad de México. Instituto Mexicano del Transporte.

González, Amador, Alonso. La sensibilidad del valor del tiempo de viaje a la especificación econométrica del modelo. Universidad de La Laguna, Tenerife, España.

Gujarati N. Damodar. (2003). Econometría. McGrawHill.

Hamdy A. Taha. (2004). Investigación de operaciones. Pearson Prentice Hall. Capítulo 5.

Instituto Mexicano del Transporte. (1993). Integración de la infraestructura carretera con el medio urbano. IMT

INEGI. (2012). Anuario estadístico de los Estados Unidos Mexicanos. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Lizardi Guerrero Carlos. (2008), Introducción a la econometría. Capítulos 3, 4 y 5.

M. Gwilliam Kenneth. (1997). The value of time in economic evaluation of transport projects. The World Bank.

Navidi William. (2006). Estadística para ingenieros y científicos. McGrawHill. Capítulo 5 y 7.

Ortuzar, Juan de Dios. (1994). Modelos de demanda de transporte. Universidad Católica de Chile.

Ortuzar, Willumsen. (1994). Modelling transport. Wiley.

Ortuzar, Juan de Dios. (2000). Modelos econométricos de elección discreta. Universidad Católica de Chile.

Ortuzar, Juan de Dios. (2000). Stated Preference Modelling Techniques. PTRCE Education and Research Services. Ltd. Sección 1.

Poon Hung Clemente. (2009). Programa carretero 2007-2012, proyectos de ingeniería en México situación actual y perspectiva.

Quintero Moreno Eric. (2011). Métodos de elección discreta en la estimación de la demanda de transporte. Instituto Mexicano del Transporte.

Quintero Moreno Eric. (2007). Diagnóstico de la información disponible y necesaria para fines de planeación del sistema de transporte. Instituto Mexicano del Transporte.

Rodríguez González José de Jesús. Las concesiones de las autopistas mexicanas, examen de su vertiente legislativa. Centros de estudios sociales y de opinión pública.

Rus, Campos, Nombela. (2003). Economía del transporte. Antoni Bosch Ediciones.

Sampieri, Collado, Lucio. (2010). Metodología de la investigación. McGrawHill.

SCT, SDG, Transconsult. (2006). Manual de modelación, modelación de demanda para carreteras de cuota.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. El Sector carretero, 2009. SCT.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (1995-2012). Datos Viales del estado de Nayarit. SCT.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2009). Principales estadísticas del sector comunicaciones y transportes. SCT.

Sussman Joseph. (2006). Introducción a los sistemas de transporte. Universidad Nacional Autónoma de México. Capítulo 10 y 11.

Spiegel, Schiller, Srinivasan. (2010). Probabilidad y estadística. McGrawHill.

Street J. Deborah. (2007). The Construction of Optical Stated Choice Experiments. Wiley.

Vargas, García. (2006). Propuesta metodológica para la estimación del valor del tiempo de los usuarios de la infraestructura carretera en México: El caso del transporte de pasajeros. Instituto Mexicano del Transporte.

Guzmán Sánchez José María. (2006). Modelos de selección discreta para determinar la demanda de viajes urbanos. Tesis.

7 Paginas webs

www.bancomundial.org

<http://biogeme.epfl.ch/>

www.inegi.org.mx

www.imt.mx

www.sct.gob.mx