



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

**APLICACIÓN DEL MODELO LOGIT BINOMIAL PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
DEMANDA DE VIAJES EN UN PROYECTO CARRETERO DE CUOTA**

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

PRESENTA:
FIDEL VALENTÍN GONZÁLEZ PÉREZ

TUTOR PRINCIPAL:
DR. RICARDO ACEVES GARCÍA
POSGRADO DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, FEBRERO 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M. I. José Antonio Rivera Colmenero

Secretario: M. en Urb. Gustavo Camacho Palacios

Vocal: Dr. Ricardo Aceves García

1^{er.} Suplente: M. I. Héctor Daniel Reséndiz López

2^{d o.} Suplente: Dra. Zaida Estefanía Alarcón Bernal

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.

TUTOR DE TESIS:

DR. RICARDO ACEVES GARCÍA

FIRMA

RESUMEN

Mediante este trabajo se analiza la importancia de la estimación de demanda de transporte para un proyecto de infraestructura carretera de cuota propuesto, específicamente en un estudio de caso, se aborda una situación real para una región en la parte central de México (Estado de Querétaro), donde se tiene una alternativa carretera actual (Carretera Federal 57 en su tramo libre de cuota) la cual por sus características operativas, geográficas y físicas, constituye parte de la red troncal del país pero presenta algunos problemas relativos a malos niveles de servicio, externalidades serias como accidentalidad alta y volúmenes de tránsito vehicular en ascenso a través del tiempo, es por esto, que resulta conveniente analizar la posibilidad de agregar una nueva opción de infraestructura carretera que sea complementaria o en su caso, sustituta a la alternativa existente; esto consiste en la propuesta de un nuevo libramiento de cuota que permita mejorar los niveles de servicios, como el ahorro de tiempo de recorrido de los usuarios (entre 20 y 30 minutos) con respecto a la vialidad actual, además de mejorar las condiciones de seguridad y ofrecer una mayor conectividad hacia puntos específicos en la región aledaña como el aeropuerto, zonas y parques industriales y sitios de interés turísticos.

Surge entonces el problema para determinar ¿cuántos usuarios de los que conforman la demanda actual en la carretera existente, elegirían usar una nueva alternativa asumiendo un costo o peaje para realizar su viaje o parte de éste? Con el propósito de saber la respuesta a esta cuestión, es necesario la aplicación de técnicas de modelación de demanda de transporte, pues se requiere determinar si una nueva alternativa carretera de cuota sería parte del conjunto de elecciones de los usuarios. Para ello, es absolutamente necesario el estudio de las preferencias de éstos, para plantear cuánta demanda se capta bajo un escenario hipotético de operación y elaborar un pronóstico de demanda aproximado que sea usado en la toma de decisiones (por ejemplo, de implementar o no, la infraestructura propuesta).

La modelación de demanda de transporte hace uso de técnicas estadísticas como son el muestreo para la obtención de datos de una población de interés, objetivamente de los usuarios de la red vial de la región en estudio, ya que se sabe que para la realización de estudios de transporte, la obtención de datos resulta costosa y consume gran parte de los recursos económicos disponibles, por lo tanto, el uso de una muestra representativa debe ser manejada para los análisis correspondientes; específicamente en este trabajo se utilizan datos obtenidos mediante encuestas de preferencias declaradas, facilitadas por un tercero (empresa privada) y también recopilados desde fuentes de información especializadas, especialmente datos disponibles al público de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes, resultado de estudios origen y destino llevados a cabo sobre la red vial del área de interés. De esta manera cada usuario de la muestra representativa tiene características socioeconómicas diferentes y dado que

se plantea un escenario hipotético de elecciones, éste puede percibir los atributos de cada alternativa (la actual o la propuesta) en relación con lo que le represente mayor beneficio propio, es decir, elegirá la opción que le produzca o perciba con una mayor conveniencia, lo cual en términos económicos se llama utilidad, por lo tanto el usuario tenderá a elegir la alternativa con el propósito de maximizar su utilidad.

La utilidad de cada alternativa puede ser definida en función de variables cuantitativas como son tiempo y costo del viaje, pero también podrían ser variables cualitativas como la seguridad, el motivo de viaje, la comodidad, entre otras, en este sentido, resulta necesario el planteamiento de una función matemática que relacione todas estas variables y que representa las preferencias de los viajeros. Para la estimación de la probabilidad de que un usuario seleccione una alternativa (descartando la otra), se plantea un modelo de elección discreta Logit Binomial, el cual será de ayuda para determinar la probabilidad de elección de los usuarios ante un escenario de elección dicotomo.

Contenido

Introducción.....	xv
Capítulo 1. Situación general del sector carretero en México	1
1.1 La situación actual del transporte de carga y de pasajeros en México	1
1.2 Situación actual del desarrollo carretero en México	3
1.3 Situación actual del sistema carretero en México	5
1.4 Tipos de carreteras de cuota en México	9
1.4.1 Carreteras interurbanas.....	9
1.4.2 Libramientos.....	9
1.4.3 Puentes internacionales y túneles	10
1.4.4 Autopistas urbanas/suburbanas.....	10
1.5 Clasificación de carreteras respecto a los requerimientos de modelación	11
1.5.1 Proyectos simples.....	11
1.5.2 Proyectos de redes	12
1.6 Impactos producidos por nueva infraestructura carretera de cuota	12
1.6.1 Cambios en los patrones de viaje a corto plazo	13
1.6.2 Cambios a largo plazo.....	15
Capítulo 2. El modelo clásico del transporte.....	16
2.1 La demanda por transporte.....	16
2.2 La oferta de transporte.....	17
2.3 Externalidades en el transporte	18
2.4 Generalidades de modelación.....	19
2.5 Nivel de detalle deseado en la modelación de transporte	21
2.6 Zonificación.....	22
2.7 Información típica requerida para la modelación de transporte.....	23
2.8 Encuestas de Preferencias Reveladas	24
2.9 Encuestas de Preferencias Declaradas	27
2.10 El modelo clásico de transporte	29
2.10.1 Categorización de la demanda	31
2.10.2 Modelo clásico de cuatro etapas	32
2.10.2.1 Modelo de generación de viajes	34
2.10.2.2 Modelos de atracción de viajes.....	37

2.10.2.3	Síntesis de los modelos de generación y atracción de viajes.....	38
2.10.2.4	Modelo de distribución de viajes.....	39
2.10.2.5	Modelo de partición modal	39
2.10.2.6	Asignación.....	42
2.10.3	Limitaciones del modelo clásico de transporte de cuatro etapas	44
2.11	Enfoques para la estimación de la demanda de transporte.....	45
2.11.1	Enfoque de elección discreta.....	48
Capítulo 3. Modelos de elección discreta		49
3.1	Introducción a modelos de elección discreta	49
3.2	Enfoque determinístico en la modelación de las elecciones discretas	50
3.2.1	Problemas que presenta el “enfoque determinístico” en la modelación de las elecciones discretas 52	
3.3	Enfoque probabilístico en la modelación de las elecciones discretas.....	54
3.4	Teoría de la utilidad aleatoria	55
3.5	Introducción al modelo Logit Multinomial.....	57
3.6	Características del Modelo Logit Multinomial	59
3.7	Propiedades del modelo Logit Multinomial	60
3.8	El modelo Logit Binomial	62
3.9	Contexto estadístico de los modelos de respuesta binaria.....	63
3.9.1	Problemas en los modelos de probabilidad lineal.....	64
3.10	Introducción de una nueva alternativa	65
3.10.1	Las constantes específicas de las alternativas.....	66
3.11	Determinación de las variables del modelo.....	66
3.12	Definición del conjunto de opciones disponibles	68
3.13	Estimación de los parámetros de la función de utilidad.....	69
3.14	El método de la máxima verosimilitud.....	70
3.15	La calidad estadística de la estimación	72
3.16	Comprobación del desempeño de la estimación del Modelo Logit.....	75
Capítulo 4. Estudio de caso: Aplicación del modelo Logit Binomial para la estimación de demanda de transporte		76
4.1	Descripción general del estudio de caso	78
4.2	Red vial en el área de interés.....	80
4.3	Zonificación del área de estudio	84
4.4	Características operativas y físicas de la red vial del área de interés.....	88
4.4.1	Velocidad de operación en la red vial del área de interés.....	90

4.4.2	Número de carriles en las vialidades del área de interés.....	91
4.4.3	Nivel de servicio de la vialidad de competencia.....	92
4.4.4	Accidentes de tránsito en la vialidad de competencia.....	93
4.4.5	Demanda actual de la infraestructura vial existente	95
4.5	Encuesta Origen – Destino.....	100
4.5.1	Motivo de viaje de usuarios automóbiles	103
4.5.2	Vehículos de carga.....	104
4.5.3	Origen y destino de viajes	109
4.6	Viajes potenciales al proyecto	117
4.7	Análisis de datos de las Encuestas de Preferencias Declaradas.....	121
4.7.1	Motivo de viaje.....	126
4.7.2	Frecuencia de viaje.....	127
4.7.3	Quién paga o cubre los gastos del viaje	130
4.8	Orígenes y destinos encontrados en la EPD	133
4.9	Estimación del modelo	138
4.9.1	El modelo Logit Binario	139
4.9.2	Regresión logística binaria.....	141
4.9.3	Los coeficientes del modelo	143
4.10	Planteamiento teórico de la regresión al caso práctico	144
4.11	Selección de las variables para el estudio de caso.....	145
4.12	Procedimiento de regresión logística binaria con SPSS	147
4.13	Presentación de resultados e interpretación del modelo de regresión logística	150
4.14	Calidad estadística del ajuste.....	158
4.14.1	Precisión de la estimación	158
4.14.2	Significancia de los coeficientes	159
4.15	Comprobación del desempeño de la estimación del modelo Logit.....	163
4.16	Estimación de la demanda.....	166
	Conclusiones	173
	Bibliografía.....	176

Lista de Tablas

Tabla 1 Volúmenes de pasajeros y carga transportados por cada modo de transporte.....	3
Tabla 2 Entidades federativas con mayor densidad de carreteras	8
Tabla 3 Resumen de métodos a utilizar en los modelos de atracción y generación de viajes.....	38
Tabla 4 Variables respuesta que pueden ser de interés para la modelación de elecciones discretas.....	69
Tabla 5 Tabla de clasificación genérica para la comprobación del desempeño del Modelo Logit.....	75
Tabla 6 Promedio de accidentes diarios 2012-2016	94
Tabla 7 Registro histórico del TDPA en las vialidades actuales del área de interés.....	97
Tabla 8 Tasa de crecimiento del TDPA en las estaciones de aforo sobre las vialidades actuales del área de interés.....	99
Tabla 9 Nomenclatura para la clasificación vehicular de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.....	99
Tabla 10 TDPA como promedio ponderado del registro histórico 2006-2017	99
Tabla 11 Número de encuestas origen – destino en cada estación de aplicación.....	102
Tabla 12 Motivo principal de viaje de usuarios de automóvil del estudio origen – destino de SCT en cada estación de aplicación.....	103
Tabla 13 Número de vehículos de carga en cada estación de aplicación del estudio Origen – Destino de SCT.....	104
Tabla 14 Agregación de vehículos de carga respecto a su clasificación unitarios o articulados.....	106
Tabla 15 Volúmenes de camiones unitarios clasificados por producto que transporta y en cada estación de aplicación del estudio O-D.....	107
Tabla 16 Volúmenes de camiones articulados clasificados por producto que transporta y en cada estación de aplicación del estudio O-D.....	108
Tabla 17 Viajes potenciales identificados en cada estación de la aplicación de la EOD de SCT	118
Tabla 18 Número de Encuestas de Preferencias Declaradas obtenidas en cada estación.....	121
Tabla 19 Número de EPD para el proyecto circuito "Universidades-Aeropuerto-Carretera 57"	123
Tabla 20 Definición del tamaño de la población <i>N</i> en el estudio de EPD para el proyecto circuito "Universidades-Aeropuerto-Carretera 57"	124
Tabla 21 Clasificación vehicular principal en la base de datos.....	125
Tabla 22 Número de EPD para el proyecto circuito "Universidades – Aeropuerto –Carretera 57" por tipo de vehículo.....	125
Tabla 23 Número de EPD para el proyecto circuito "Universidades – Aeropuerto –Carretera 57" por cada sentido de circulación	126
Tabla 24 Motivo de viaje de usuarios de vehículos particulares en la EPD.....	126
Tabla 25 Frecuencia de viaje de usuarios de vehículos particulares en la EPD.....	127
Tabla 26 Frecuencia de viaje de usuarios de vehículos de carga en la EPD.....	129
Tabla 27 Persona que cubre los gastos de viaje, EPD.....	131
Tabla 28 Variables independientes seleccionadas para el modelo de regresión para vehículos particulares de la EPD.....	146
Tabla 29 Variables independientes seleccionadas para el modelo de Regresión para vehículos de autotransporte de carga de la EPD.....	146
Tabla 30 Resultados de la regresión logística binaria en SPSS para vehículos particulares.....	150

Tabla 31 Cálculo de las probabilidades de elección con base en los resultados de la regresión logística binaria en SPSS para vehículos particulares	151
Tabla 32 Cálculo de los porcentajes de elección con base en los resultados de la regresión logística binaria en SPSS para vehículos particulares.	151
Tabla 33 Cálculo de las probabilidades de elección con base en los resultados de la regresión logística binaria en SPSS para vehículos de carga.	153
Tabla 34 Cálculo de las probabilidades de elección con base en los resultados de la regresión logística binaria en SPSS para vehículos de carga en sentido desde CDMX.	154
Tabla 35 Cálculo de los porcentajes de elección con base en los resultados de la regresión logística binaria en SPSS para vehículos de carga en sentido desde CDMX.	155
Tabla 36 Comparación de los porcentajes de elección de usuarios de vehículos de carga sobre la nueva alternativa con base en el sentido de circulación	156
Tabla 37 Cálculo de las probabilidades de elección con base en los resultados de la regresión logística binaria en SPSS para vehículos de carga en sentido hacia CDMX.	156
Tabla 38 Cálculo de los porcentajes de elección con base en los resultados de la regresión logística binaria en SPSS para vehículos de carga en sentido hacia CDMX.	157
Tabla 39 Intervalos de confianza para los coeficientes del modelo estimados por regresión logística para vehículos particulares.	158
Tabla 40 Intervalos de confianza para los coeficientes del modelo estimados por regresión logística para vehículos de autotransporte de carga	159
Tabla 41 Calculo de la "t" para los coeficientes del modelo estimados por regresión logística para vehículos particulares.	160
Tabla 42 Calculo de la "t" para los coeficientes del modelo estimados por regresión logística para vehículos de autotransporte de carga.	160
Tabla 43 Criterio del estadístico de Wald y la significancia estadística para los coeficientes del modelo estimados por regresión logística mediante SPSS para vehículos particulares.	161
Tabla 44 Criterio del estadístico de Wald y la significancia estadística para los coeficientes del modelo estimados por regresión logística mediante SPSS para vehículos de autotransporte de carga.	162
Tabla 45 Tabla de clasificación de casos genérica para la comprobación del desempeño de la estimación de los coeficientes por regresión logística	163
Tabla 46 Tabla de clasificación de casos genérica para la comprobación del desempeño de la estimación de los coeficientes por regresión logística	163
Tabla 47 Tabla de clasificación de casos para la comprobación del desempeño de la estimación de los coeficientes por regresión logística mediante SPSS para vehículos particulares	164
Tabla 48 Tabla de clasificación de casos para la comprobación del desempeño de la estimación de los coeficientes por regresión logística mediante SPSS para vehículos de autotransporte de carga.	165
Tabla 49 Segmentación de los viajes potenciales de la EOD por MOTIVO principal de viaje de los usuarios de automóviles	166
Tabla 50 Cálculo de la cantidad de viajes captados a USAR LA NUEVA CARRETERA usuarios de vehículos particulares	167
Tabla 51 Segmentación de los viajes potenciales de la EOD por SENTIDO de circulación de los usuarios de vehículos de cargas.	167
Tabla 52 Cálculo de la cantidad de viajes captados a USAR LA NUEVA CARRETERA usuarios de vehículos de carga en el sentido de circulación 0.	167

Tabla 53 Cálculo de la cantidad de viajes captados a USAR LA NUEVA CARRETERA usuarios de vehículos de carga en el sentido de circulación 1.....	168
Tabla 54 Desagregación de los viajes potenciales de los usuarios de vehículos de carga en la EOD por cada SENTIDO de circulación.....	168
Tabla 55 Tarifas actuales de los peajes establecidos en la plaza de cobro No. 5 "P.C. Palmillas".....	169
Tabla 56 Tarifas actuales de los peajes establecidos en la plaza de cobro "Chichimequillas"	170
Tabla 57 Cuadro comparativo de cuotas vigentes para cada tipo de vehículo de carga.....	170
Tabla 58 Cantidad promedio dispuesta a pagar como cuota de cada segmento de usuarios de camiones de carga, para hacer uso de la nueva alternativa propuesta.....	170
Tabla 59 Cantidad promedio dispuesta a pagar como cuota de los usuarios de camiones de carga, para hacer uso de la nueva alternativa propuesta.....	170
Tabla 60 Propuesta de un escenario hipotético: Cuotas proyecto: Circuito "Universidades – Aeropuerto – Carretera 57"	171
Tabla 61 Estimación del Transito Promedio Diario captado por el proyecto: Circuito "Universidades – Aeropuerto – Carretera 57" bajo un escenario hipotético de cuotas	171
Tabla 62 Estimación de los ingresos económicos del proyecto: Circuito "Universidades – Aeropuerto – Carretera 57" bajo un escenario hipotético de cuotas	171
Tabla 63 TPDA actual en la plaza de cobro "Chichimequillas"	172
Tabla 64 Estimación de ingresos económicos en la plaza de cobro "Chichimequillas" con base en el TPDA actual y las cuotas vigentes establecidas.	172

Lista de Figuras

Fig. 1 Comparativa Autotransporte Federal vs otros modos de transporte	1
Fig. 2 Tendencia en la evolución del transporte de carga por diferentes modos	2
Fig. 3 Comparación de la movilidad de pasajeros modo terrestre vs otros modos.....	2
Fig. 4 Evolución de la movilidad de pasajeros en los diferentes modos de transporte	3
Fig. 5 Carreteras pavimentadas en México	4
Fig. 6 RNC. Tipo de camino.....	6
Fig. 7 RNC. Estado superficial.....	7
Fig. 8 RNC. Por carriles.....	7
Fig. 9 Densidad de carreteras en los Estados de México	8
Fig. 10 Generalización conceptual de un modelo.....	19
Fig. 11 Organigrama de las EPR (Encuestas de Preferencias Reveladas)	27
Fig. 12 Diagrama conceptual del modelo de transporte clásico secuencial de las cuatro etapas.....	30
Fig. 13 Gráficas de las distribuciones normal y Gumbel.....	57
Fig. 14 Comportamiento de la función Logit Binomial para obtener las probabilidades de elección entre dos alternativas	59
Fig. 15 Comportamiento de la función Logit Binomial para obtener las probabilidades de elección entre dos alternativas, variando el valor de B	63
Fig. 16 Proyectos de infraestructura propuestos.....	79
Fig. 17 Localización del Estado de Querétaro en la región central de México.....	80
Fig. 18 Principales ejes troncales carreteros de México.....	80
Fig. 19 Infraestructura vial en el Estado de Querétaro: Carreteras Federales y Carreteras Estatales ..	81
Fig. 20 Carretera federal No. 57 y Carretera federal No. 45 en sus trayectorias hacia la frontera norte de México.....	82
Fig. 21 Situación actual, Carretera federal libre 57, Libramiento Noreste de Querétaro (cuota).....	83
Fig. 22 Situación planteada: Carretera federal libre 57, Libramiento Noreste de Querétaro (cuota) y Libramiento de cuota planteado (Circuito Universidades – Aeropuerto – Carretera 57)	83
Fig. 23 Libramiento Noreste de Querétaro (Carretera 57D) de cuota.....	84
Fig. 24 Representación de la zonificación del área de estudio	86
Fig. 25 Representación de la red vial dentro del área de interés, haciendo referencia a la entidad gubernamental que la administra	88
Fig. 26 Representación de la red vial dentro del área de interés, haciendo referencia a las condiciones de peaje o libre de peaje	89
Fig. 27 Representación de la red vial dentro del área de interés, haciendo referencia a la velocidad de operación de las vialidades.....	90
Fig. 28 Representación de la red vial dentro del área de interés, haciendo referencia al número de carriles de las vialidades.....	91
Fig. 29 Representación del nivel de servicio de la red vial dentro del área de interés.....	92
Fig. 30 Representación del nivel de servicio de la red vial dentro del área de interés.....	93
Fig. 31 Accidentalidad 2012-2016 Carretera Federal 57 (vialidad de competencia al proyecto)	94
Fig. 32 Mapa temático: Número de accidentes promedio de 2012 a 2016 en los diferentes cadenamientos de la vialidad de competencia.....	95
Fig. 33 Localización de puntos de aforo en las vialidades actuales del área de interés	97
Fig. 34 Gráfica del comportamiento histórico del TDPA en las vialidades actuales del área de interés.....	98

Fig. 35 Localización geográfica de estaciones de aplicación de la EOD de la SCT	102
Fig. 36 Grafica: Motivo principal de viaje de usuarios de automóvil en cada estación del estudio O-D de SCT.....	103
Fig. 37 Número de vehículos de carga en cada estación de aplicación del estudio Origen – Destino de SCT.....	105
Fig. 38 Diferenciación de los vehículos de carga por la SCT.....	106
Fig. 39 Representación de pares origen – destino (líneas de deseo) de la estación 1 del estudio O-D de SCT.....	110
Fig. 40 Representación de pares origen – destino (líneas de deseo) de la estación 1 del estudio O-D de SCT.....	110
Fig. 41 Representación de los principales destinos de los viajes como porcentajes del total de viajes de la estación 1 del estudio O-D de SCT.....	111
Fig. 42 Representación de pares origen – destino (líneas de deseo) de la estación 2 del estudio O-D de SCT.....	113
Fig. 43 Representación de los principales destinos de los viajes como porcentajes del total de viajes de la estación 2 del estudio O-D de SCT.....	113
Fig. 44 Representación de pares origen – destino (líneas de deseo) de la estación 2 del estudio O-D de SCT.....	114
Fig. 45 Representación de pares origen – destino (líneas de deseo) de la estación 3 del estudio O-D de SCT.....	115
Fig. 46 Representación de los principales destinos de los viajes como porcentajes del total de viajes de la estación 3 del estudio O-D de SCT.....	116
Fig. 47 Viajes potenciales identificados en cada estación de la aplicación de la EOD de SCT.....	119
Fig. 48 Localización del proyecto: circuito “Universidades-Aeropuerto-Carretera 57”y de estaciones donde se aplicó la EOD de SCT.....	120
Fig. 49 Localización geográfica de las estaciones de aplicación de la EPD por interceptación.....	122
Fig. 50 Delimitación de la cantidad de EPD obtenidas para cada proyecto propuesto.....	122
Fig. 51 Motivo de viaje de usuarios de vehículos particulares en la EPD.....	127
Fig. 52 Frecuencia de viaje de usuarios de vehículos particulares en la estación “Chichimequillas” de la aplicación de la EPD.....	128
Fig. 53 Frecuencia de viaje de usuarios de vehículos particulares en la estación “Carretera estatal 200” de la aplicación de la EPD.....	128
Fig. 54 Frecuencia de viaje de usuarios de vehículos de carga en la estación “Chichimequillas” de la aplicación de la EPD.....	129
Fig. 55 Frecuencia de viaje de usuarios de vehículos de carga en la estación “Carretera estatal 200” de la aplicación de la EPD.....	130
Fig. 56 Persona que cubre los gastos de viaje, EPD	131
Fig. 57 Qué tan probable sería el uso del nuevo tramo carretero, EPD	132
Fig. 58 Representación gráfica de pares O-D (mediante líneas de deseo) de los usuarios de vehículos particulares en la EPD.....	133
Fig. 59 Pares O-D (mediante líneas de deseo), usuarios de vehículos particulares Estación Chichimequillas. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V. e INEGI, 2017 (datos geográficos).....	134
Fig. 60 Pares O-D (mediante líneas de deseo), usuarios de vehículos particulares Estación Carretera Estatal 200.....	135

Fig. 61 Representación gráfica de pares O-D (mediante líneas de deseo) de los usuarios de vehículos de autotransporte de carga en la EPD.....	136
Fig. 62 Pares O-D (mediante líneas de deseo), usuarios de vehículos de autotransporte de carga, Estación Chichimequillas.....	137
Fig. 63 Pares O-D (mediante líneas de deseo), usuarios de vehículos de autotransporte de carga, Estación Carretera estatal 200	138
Fig. 64 Abstracción de la regresión logística binaria.....	142
Fig. 65 Localización del proyecto: circuito "Universidades-Aeropuerto-Carretera 57"	144
Fig. 66 Abstracción de la regresión logística binaria para el caso de vehículos particulares.....	145
Fig. 67 Abstracción de la regresión logística binaria para el caso de vehículos de autotransporte de carga.....	145
Fig. 68 Vista del Software SPSS para el despliegue de los menús correspondientes para realizar la regresión logística binaria.....	147
Fig. 69 Vista del recuadro de selección de la variable dependiente y las independientes en el Software SPSS para realizar la regresión logística binaria	148
Fig. 70 Vista del recuadro para establecer las variables independientes categóricas en el Software SPSS para realizar la regresión logística binaria	149
Fig. 71 Gráfica de los porcentajes de elección con base en los resultados de la regresión logística binaria en SPSS para vehículos particulares.	152
Fig. 72 Gráfica de los porcentajes de elección con base en los resultados de la regresión logística binaria en SPSS para vehículos de carga en sentido = 0.....	155
Fig. 73 . Gráfica de los porcentajes de elección con base en los resultados de la regresión logística binaria en SPSS para vehículos de carga en sentido = 1.....	157
Fig. 74 Localización geográfica de las casetas de cobro "P.C. Palmillas" y "Chichimequillas" sobre vialidades del área de interés	169

Introducción

La estimación de demanda para un proyecto de infraestructura carretera es una parte crítica en el proceso de planeación. La demanda y las tarifas a ser establecidas, son determinantes en el cálculo de los ingresos futuros desde una perspectiva objetivamente económica, en este contexto, las estimaciones de demanda muy optimistas pueden conducir hacia problemas financieros desde los primeros años en que la nueva infraestructura es puesta en operación, por lo tanto, dichas estimaciones originales usualmente deben ser usadas al 50%, 70% y 90% para los tres primeros años, respectivamente, especialmente en proyectos de infraestructura de carretera interurbanas (World Bank/PPIAF, 2009). Adicionalmente, si la demanda no se materializa según lo previsto, se deben usar, esencialmente análisis de riesgo y sensibilidad para conocer los impactos del proyecto (World Bank/PPIAF, 2009). Según una publicación del Banco Mundial la estimación de demanda generalmente debería ser llevada a cabo por el sector público en conjunto con sus colaboradores y ésta debería estar contenida ya en el proceso de licitación, ya que se corre un gran riesgo si se aceptan estimaciones de demanda muy optimistas (no reales), pues el proyecto podría provocar serios problemas financieros y políticos tanto al gobierno como al concesionario subsecuentemente.

Es importante señalar que los impactos de una mala estimación de demanda tienen diferentes consecuencias, algunas pueden ser (World Bank/PPIAF, 2009):

- Impacto directo sobre la infraestructura: en el caso de carreteras, por un lado, podrían ser subutilizadas y en caso contrario, podrían tener un rebase de su capacidad.
- Impacto en la viabilidad financiera del proyecto y/o impacto en las finanzas del gobierno.
- Impactos a corto plazo (el tráfico se estabiliza) o un problema a largo plazo (el tráfico no se estabiliza sino hasta un periodo incierto que podría ser de 10 años).

Realmente en la práctica, se sabe que limitar los errores en la estimación de demanda siempre es un reto.

La estimación de demanda para un proyecto carretero de cuota, es el tema central en este trabajo, en éste se hace uso del enfoque de preferencias declaradas, el cual surgió a finales de la década de los años 70, basado en técnicas de investigación de mercados, sin embargo, es en los años 80 cuando se aplica al campo del transporte para analizar las preferencias de los usuarios, mediante la aplicación de encuestas a los viajeros en los sistemas de transporte, lo cual permitió utilizar los datos individuales de cada viajero en las estimaciones de demanda, aunque se sabe que en un inicio los pronósticos obtenidos mediante este enfoque no fueron

satisfactorios, posteriormente en los 90s, el mejoramiento tanto en la aplicación de técnicas estadísticas como en el diseño de cuestionarios (encuestas), permitieron lograr mejores resultados. El enfoque de preferencias declaradas se basa teóricamente en la modelación de elecciones discretas de los usuarios de transporte, es decir, se parte de que un modelo matemático puede explicar el comportamiento de los viajeros respecto a sus elecciones, cuando éstos deben elegir una opción de un conjunto finito de opciones para realizar su viaje. La estimación de demanda resulta de sumar las elecciones individuales que han hecho los usuarios, es decir, una vez que se ha construido un modelo que pueda reproducir correctamente el proceso de decisión de los usuarios, al elegir entre las distintas posibilidades de viaje, la demanda será la suma o agregación de las decisiones de los viajeros para cada una de las opciones de viaje del conjunto.

Dado que las preferencias de los usuarios dependen de los atributos de cada opción de viaje del conjunto de elección (variables como costo, tiempo, motivo, etc.) y también de características del propio usuario (como edad, ingreso económico, entre otros), la modelación se fundamentará en la Teoría de la Utilidad la cual pertenece al campo de la economía, pero aplicada a la modelación de transporte es útil para la formulación de la hipótesis en la cual los usuarios de transporte siempre tenderán a elegir la opción de viaje que maximiza su utilidad y evitar aquella que perciba menos conveniente. Para operar este principio se plantea la función de utilidad que es una función matemática que representa las preferencias de los usuarios. (Quintero Moreno, 2011). Sin embargo, para resolver algunas discrepancias, como cuando usuarios con las mismas características, enfrentados a dos opciones de viaje (del conjunto de opciones disponibles) que tienen los mismos atributos, eligen de modo distinto, se debe trabajar con un enfoque probabilístico, porque las variaciones en las elecciones de los usuarios mencionadas, pueden ser abordadas sumando un término de error a la función de utilidad, dicho término englobará los factores desconocidos por el modelador pero que influyen en la decisión tomada por los individuos. De esta manera surge el concepto de utilidad aleatoria.

El planteamiento de la utilidad aleatoria es posible mediante el Modelo Logit, que es una versión probabilista de modelos de elección discreta. En esta tesis el Modelo Logit Binomial es usado para determinar la elección de los usuarios enfrentados a dos opciones de ruta específicamente: una alternativa actual (tramo carretero libre) y una hipotética (proyecto con cobro de cuota).

En los proyectos con cobro de cuota un aspecto importante es la estimación del valor de la cuota que los usuarios potenciales estarían dispuestos a pagar. La disposición a pagar peaje de los usuarios está relacionada con su nivel socioeconómico, el valor que se le asigna a los ahorros de tiempo, el costo y a otros beneficios que una carretera de cuota ofrece en comparación con una alternativa de competencia y que no tiene cobro de peaje. La aplicación de Encuestas de

Preferencias Declaradas (EPD) tienen el objetivo de obtener datos que son útiles para la estimación de la función de utilidad (de cada ruta, en este caso), con la cual se determinará la probabilidad de que los usuarios (conductores) elijan una nueva alternativa de cuota en lugar de la alternativa libre actual. Adicionalmente, la función de utilidad permite estimar el valor del tiempo y en consecuencia el valor de la cuota promedio que los conductores estarían dispuestos a pagar. A continuación, se resumen los contenidos de cada sección de este trabajo:

En el **Capítulo 1**, se presenta información en cifras referentes a la importancia del transporte terrestre en México, especialmente el transporte por carretera en comparación con otros modos. Se analizan los datos de la red carretera nacional respecto de cómo se clasifican los diferentes tipos de caminos que conforman el sistema carretero del país, lo que conduce a particularizar en las infraestructuras que presentan cobros de cuota como son carreteras interurbanas, libramientos, puentes y túneles internacionales y autopistas urbanas y suburbanas; al mismo tiempo se tiene una clasificación de éstas con base en sus requerimientos de modelación. Adicionalmente se enlistan los impactos que se podrían producir como resultado de la puesta en servicio de una nueva alternativa carretera de cuota.

Continuando al **Capítulo 2**, para abordar el enfoque de preferencias reveladas y el modelo clásico de transporte de cuatro etapas, el cual plantea la hipótesis que los usuarios efectúan de manera secuencial su elecciones para realizar sus desplazamientos, con base en características personales y atributos del sistema, dichas elecciones reflejan la relación con sus decisiones de viajar (generación de viajes) hacia un destino (distribución de viajes) en algún modo de transporte (partición modal) y mediante una ruta específica (asignación).

El **Capítulo 3**, aborda el marco teórico de las elecciones discretas y la descripción de la metodología a usar en la solución del Estudio de caso planteado.

En el **Capítulo 4** se desarrolla la situación a ser resuelta en el Estudio de caso, se usará el modelo Logit Binomial, que es la variante más adecuada del Modelo Logit Multinomial que se ajusta para dar solución al problema, el cual consiste en obtener las probabilidades de elección de los usuarios de una muestra obtenida mediante un estudio de EPD y de esta manera poder determinar la magnitud de viajes potenciales (obtenidos por análisis de EOD), que el tramo propuesto podría capturar en caso de ser puesto en servicio.

Finalmente, en la última sección se presentan las conclusiones de este trabajo.

Capítulo 1. Situación general del sector carretero en México

1.1 La situación actual del transporte de carga y de pasajeros en México

El autotransporte federal en México es el principal modo de transporte ya que según datos estadísticos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 2016) se movilizan de esta manera:

- 81 % de la carga terrestre
- 56 % de la carga nacional
- 96% del total nacional de pasajeros

El sector autotransporte genera en el país más de dos millones de empleos directos, por lo tanto, contribuye con 4.9 % al PIB nacional y dentro del sector transporte, correo y almacenamiento participa con el 81 %. El autotransporte es el principal modo para la movilidad de carga en general, en comparación con otros modos como el ferrocarril, el avión y el barco.

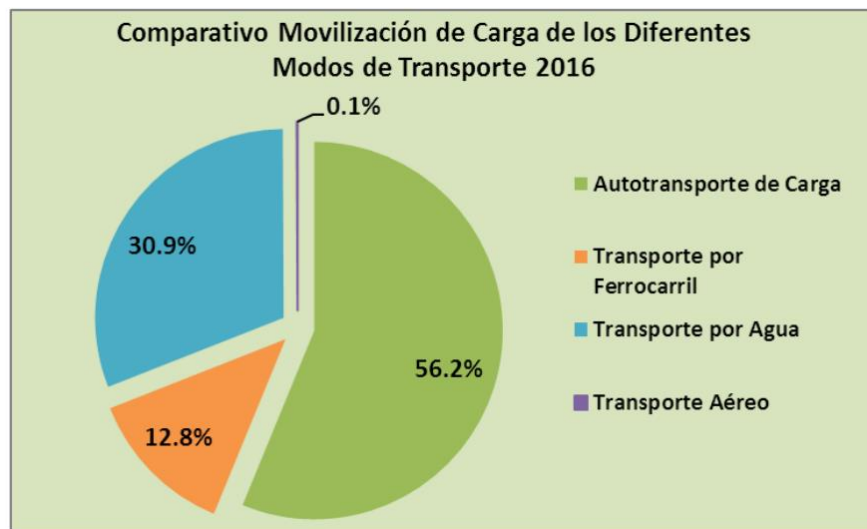


Fig. 1 Comparativa Autotransporte Federal vs otros modos de transporte. Fuente: SCT, 2016

En un lapso de poco más de 20 años (1995-2016), los volúmenes de carga transportados a través de los diferentes modos de transporte siguen una tendencia en crecimiento, con los datos obtenidos en la Figura 2 se puede constatar que el Autotransporte de carga sigue una tendencia de mayor crecimiento respecto a los otros modos de transporte (hasta un 50% de 1995 a 2016).

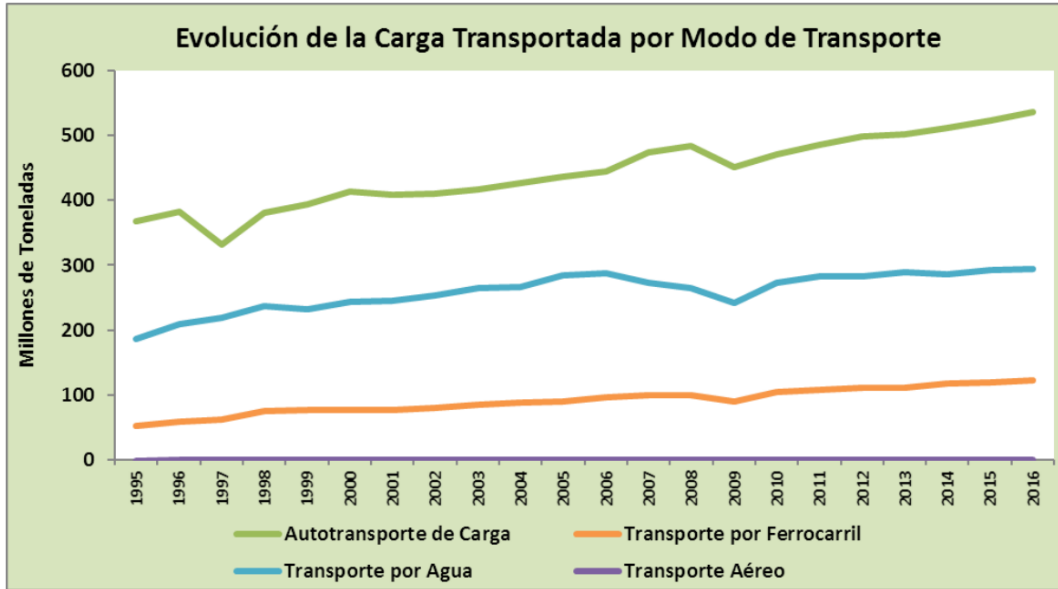


Fig. 2 Tendencia en la evolución del transporte de carga por diferentes modos. Fuente: SCT, 2016

El 96% de la movilidad de pasajeros se efectúa por vía terrestre, por lo tanto, los individuos que usan otro medio como el transporte por agua, aéreo o ferrocarril, representan juntos sólo un 4% del total.

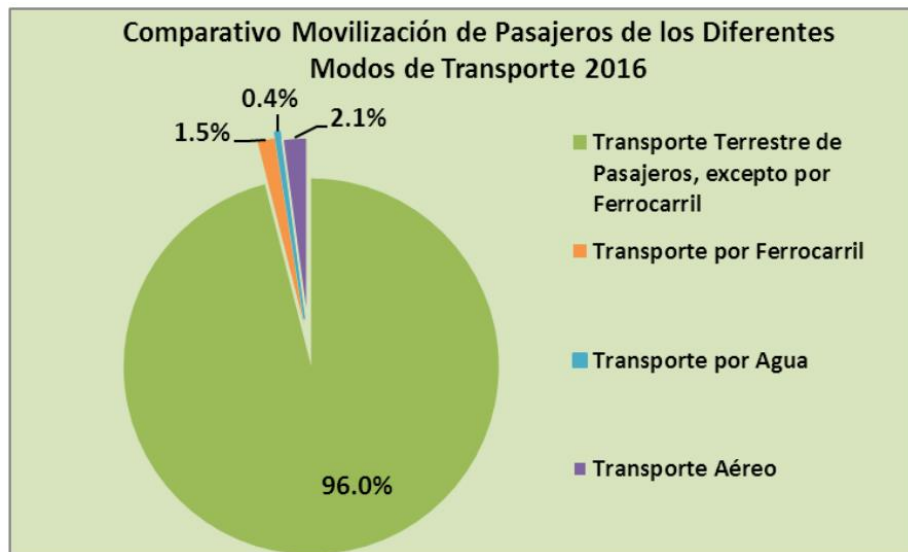


Fig. 3 Comparación de la movilidad de pasajeros modo terrestre vs otros modos. Fuente: SCT, 2016

En las últimas dos décadas (1995 a 2016) el transporte de pasajeros por vía terrestre ha sido el principal medio para desplazamientos, aunque también se ha incrementado considerablemente el transporte aéreo, según la Figura 4.

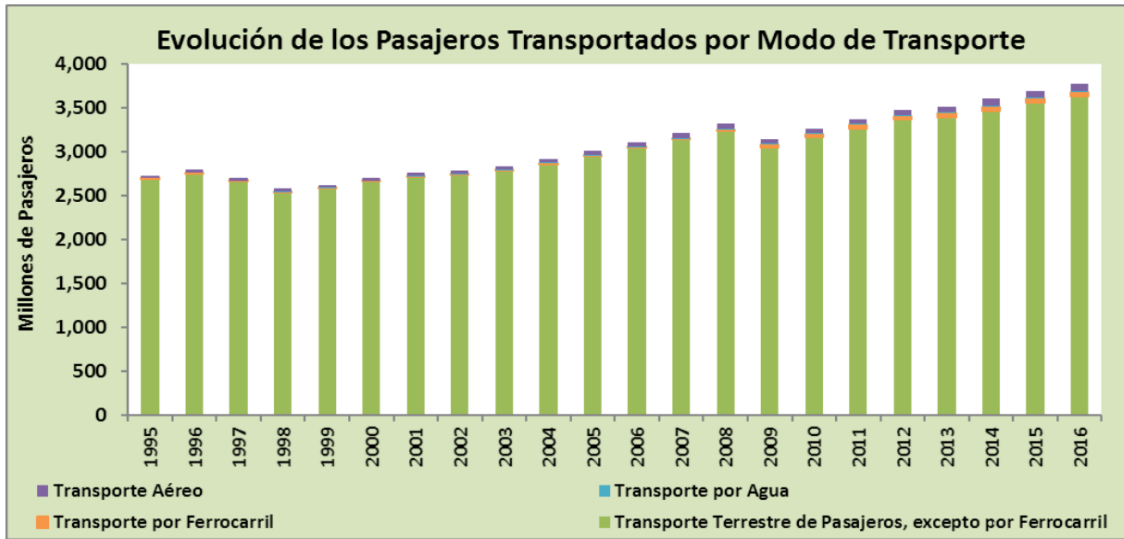


Fig. 4 Evolución de la movilidad de pasajeros en los diferentes modos de transporte. Fuente: SCT, 2016

Para el año 2016, la Tabla 1 muestra las magnitudes de los movimientos tanto de pasajeros como de carga dentro del territorio nacional por cada medio de transporte (terrestre, acuático y aéreo). El principal medio de transporte es terrestre lo cual indica que la gran mayoría de desplazamientos en el país se realizan desde su origen a su destino a través de calles, carreteras y autopistas y refleja la importancia de éstas en el desarrollo socioeconómico, al permitir la realización de las actividades productivas del sector primario, secundario y terciario.

Tabla 1 Volúmenes de pasajeros y carga transportados por cada modo de transporte durante el año 2016. Fuente: DGAF y Cuarto informe de gobierno 2016

Medios de transporte	Toneladas transportadas millones	%	Pasajeros transportados (millones)	%
Autotransporte de carga y pasajeros	535.5	56.2	3623	96
Transporte por ferrocarril	122.2	12.8	56	1.5
Transporte por agua	294.3	30.9	14	0.4
Transporte aéreo	0.7	0.1	80	2.1
Total	953	100	3773	100

1.2 Situación actual del desarrollo carretero en México

Conforme a la ley, en México está establecido que debe existir una vía alterna a una autopista de peaje (Ley de Caminos, Puentes y Autotransporte Federal. Artículo 30, 2015) con el fin de que aquellos individuos que no posean los recursos para poder pagar cuotas tengan las condiciones

favorables de movilidad. De esta manera, se determina que los usuarios de la red carretera puedan elegir las vías dentro de su itinerario de viaje valorando los atributos que diferencian las autopistas de cuota de las carreteras libres.

Las concesiones de carreteras en México fueron implementadas en los años 90, en el año 2000 se creó el NEC (nuevo esquema de concesiones) y esta modalidad para el desarrollo de la Red Carretera hizo que para el 2012 el país tuviera 8500 kilómetros de Red Federal Troncal de cuota con especificaciones altas y generaron ahorros de tiempo y costos de operación vehicular a los usuarios.

La Ley de Asociaciones Público-Privadas (APP) fue publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 16 de enero de 2012, y tiene por objeto regular los esquemas para el desarrollo de proyectos de asociaciones público-privadas, equilibrando la distribución de beneficios y riesgos entre los agentes participantes a través de un contrato a largo plazo para la concesión de un servicio público específico.

Una concesión carretera es “un acto mediante el cual el Estado otorga a un particular el derecho a prestar un servicio público y explotar bienes del dominio público, durante un tiempo determinado, sujeto a diversas condiciones que pretenden preservar el interés público” según la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y Banobras (2003).

Las APP en el sector carretero comprenden tres tipos de contratos a largo plazo:

- Concesiones carreteras tradicionales
- Proyectos de prestación de servicios (PPS)
- Aprovechamiento de activos

En México, según datos del anuario estadístico 2015 (SCT 2016) existen, (ver Fig. 5):

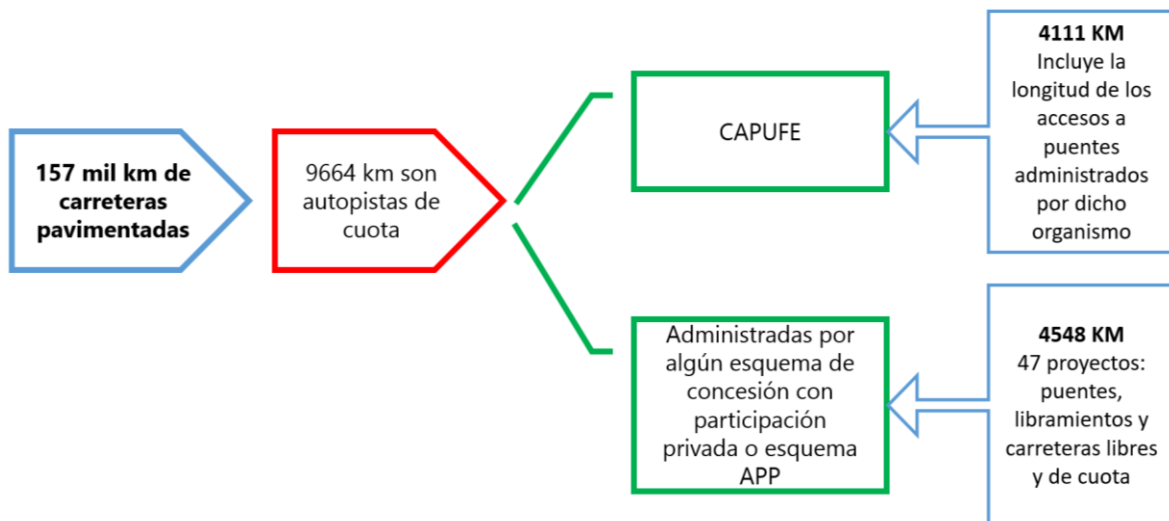


Fig. 5 Carreteras pavimentadas en México. Fuente: Anuario estadístico 2015 (SCT, 2016)

En el ámbito federal, las entidades involucradas en la evaluación de proyectos carreteros son:

- La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)
- La Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP)

A través de ellas es posible la creación de una cartera de proyectos denominada "Proyectos y Programas de Inversión" la cual efectúa la Administración Pública Federal para la construcción, ampliación, adquisición, modificación, mantenimiento o conservación de activos fijos con el fin de solucionar una problemática o atender una necesidad específica (Devesa 2014) citado por (Hernández García , Cruz González , Arroyo Osorno , González García , & Torres Vargas , 2017)

Devesa (2014) distingue dos tipos de principales de proyectos de inversión:

- De infraestructura social
- De infraestructura económica, dentro de estos se incluye la construcción, adquisición y/o ampliación de activos fijos para la producción de bienes y servicios tanto en el sector transportes como en otros sectores

De igual manera identifica dos tipos de evaluación de infraestructura carretera:

- La financiera, aplica cuando la inversión es típicamente privada
- La socioeconómica se evalúa bajo un punto de vista de la sociedad en conjunto, utilizando diferentes grupos de variables según sea el caso.

1.3 Situación actual del sistema carretero en México

La importancia de la infraestructura de transporte terrestre en México radica en que (SCT, 2013):

- Es un factor determinante para el desarrollo económico
- El bienestar de las naciones está relacionado con el grado de desarrollo de su infraestructura
- Brinda comunicación permanente entre los centros de población con los polos regionales de desarrollo, centros de producción y consumo
- Facilita el acceso a servicios de educación, salud entre otros
- Es un factor para elevar la competitividad: reduce costos y tiempos de transporte, facilita el acceso a mercados e integra cadenas productivas
- Contribuye a eliminar desequilibrios regionales
- Contribuye a fortalecer la paz social y la seguridad

- Le da un sentido de unidad a todo el país

La Red Nacional Carretera en 2015 tiene un total de **390,301** km de longitud y se clasifica por características cualitativas y cuantitativas, es decir, se subdivide de la siguiente manera (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2016):

i. Por tipo de camino

Dentro de esta clasificación se subdivide en cuatro rubros:

- Federal. 50,403 km
 - Libre 40,739 km
 - Cuota 9,664 km
- Estatal 94,983 km
- Rural 175,521 km
- Brechas mejoradas 69,394 km

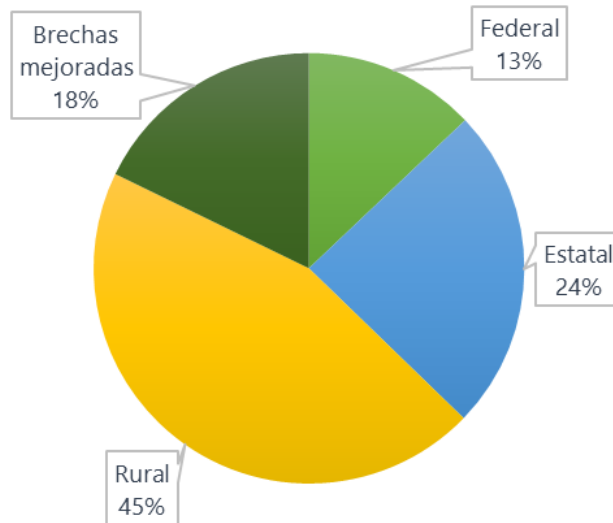


Fig. 6 RNC. Tipo de camino. Fuente: SCT, 2016

ii. *Por estado superficial*

Dentro de esta clasificación se subdivide en cuatro rubros:

- Pavimentado 156,797 km
- Revestimiento 152,879 km
- Terracerías 11,231 km
- Brechas mejoradas 69,394 km

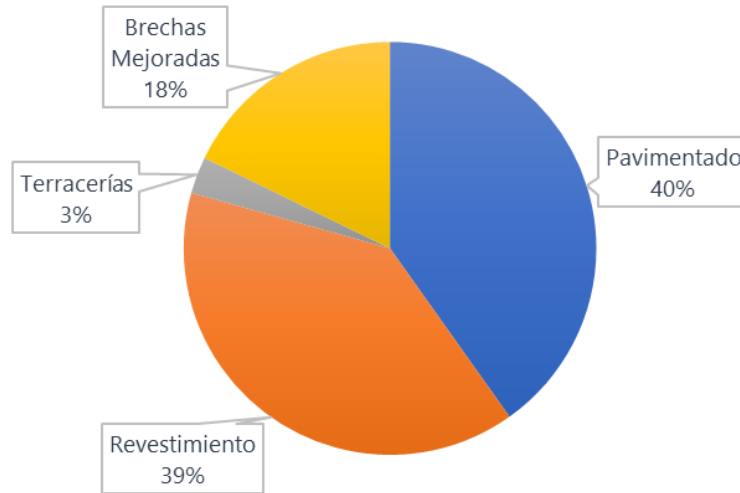


Fig. 7 RNC. Estado superficial. Fuente: SCT, 2016

iii. *Por carriles*

Dentro de esta clasificación se subdivide en dos rubros:

- Dos carriles 141,545 km
- Cuatro o más carriles 15,252 km

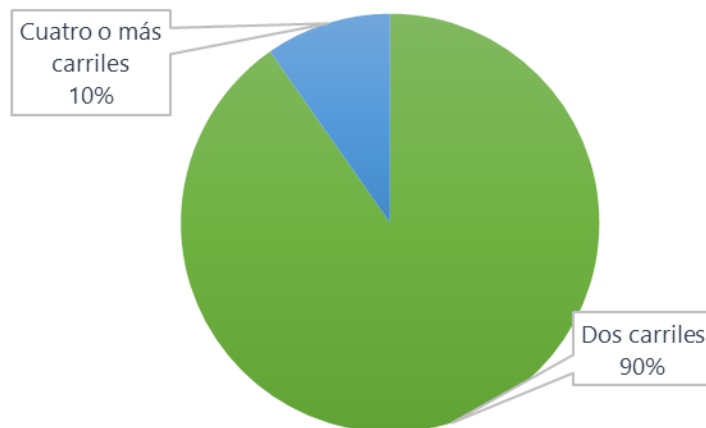


Fig. 8 RNC. Por carriles. Fuente: SCT, 2016

Las cinco entidades federativas con mayor y menor densidad de longitud de red carretera federal en 2015:

Tabla 2 Entidades federativas con mayor densidad de carreteras, Fuente: SCT, 2015

Entidad Federativa	Longitud carretera (p/c 100 km ²)	Entidad Federativa	Longitud carretera (p/c 100 Km ²)
Estados Unidos Mexicanos	19.90		
Mayor Densidad		Menor densidad	
1. Tlaxcala	73.20	I. Chihuahua	5.4
2. México	70.3	II. Cd. de México	5.8
3. Morelos	60.9	III. Coahuila de Zaragoza	5.9
4. Colima	58.9	IV. Baja California Sur	7.5
5. Hidalgo	57.5	V. Campeche	9.7

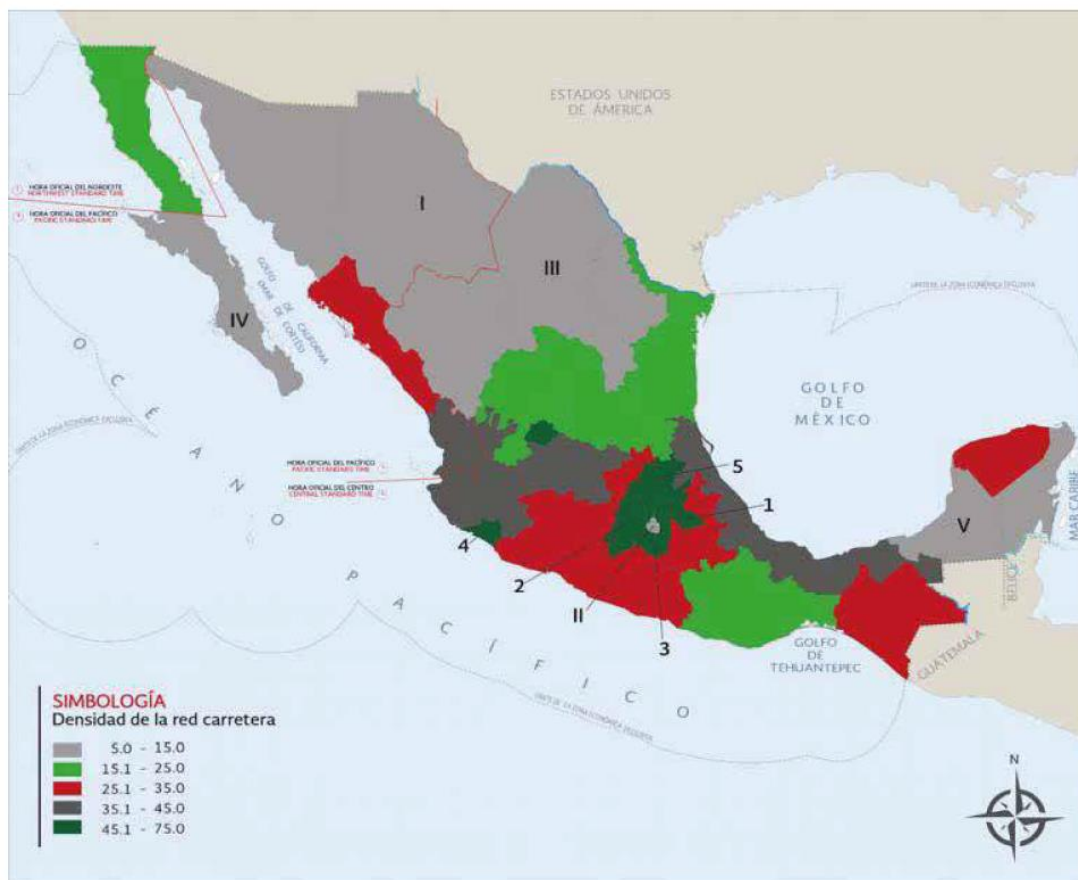


Fig. 9 Densidad de carreteras en los Estados de México. Fuente: SCT 2015

1.4 Tipos de carreteras de cuota en México

En México pueden considerarse cuatro tipos de carreteras o infraestructura tarifada, (Steer Davis Gleave y Transconsult para la SCT, 2006) y pueden ser clasificados en:

1. Carreteras interurbanas.
2. Libramientos.
3. Puentes internacionales y túneles.
4. Autopistas urbanas y suburbanas.

Las características generales de cada una podrían ser:

1.4.1 Carreteras interurbanas

Son el tipo de infraestructura carretera de cuota más común en México, algunas características de éstas son:

- Tramos relativamente largos sin muchas limitaciones de espacio para instalar plazas de peaje.
- Con alternativas, a veces libres y otras veces de cuota.
- El número de alternativas depende de la geografía y del desarrollo de la región.
- Diseños con número limitado de accesos para evitar la evasión y permitir cobro a los usuarios.
- Uso optativo de peaje electrónico de baja velocidad.
- A menudo parte de una red mayor, de importancia para el transporte de carga y el desarrollo regional.
- La congestión no es significativa, las velocidades y características de diseño son los atributos más importantes en la elección de rutas.

1.4.2 Libramientos

Se trata de carreteras que permiten:

- Evitar pasar por el centro de un área urbana, los casos más comunes consisten en un libramiento que conecte dos accesos a la ciudad y por ello genera dos alternativas de ruta: por el área urbana o por el libramiento.
- Conectar más de dos accesos a ciudades grandes, se producirán varias alternativas de ruta para distintos pares origen-destino (O-D). En estos casos el proceso de modelación es más complejo. En grandes ciudades los libramientos pueden ser usados para efectuar viajes locales en horarios de máxima demanda para evitar la congestión en ciertas zonas.

1.4.3 Puentes internacionales y túneles

- Infraestructura que conecta dos puntos que anteriormente sólo se conectaban por una ruta más larga y menos conveniente. Otros casos pueden ser puentes en estuarios, túneles que cruzan una cadena montañosa, entre otros.
- Se caracterizan por el hecho de que sí bien cuentan con alternativas, éstas son generalmente peores que la nueva infraestructura.
- Rara vez la congestión juega un papel importante en la elección de ruta, excepto en el caso de obras internacionales, en que la eficiencia de las operaciones de aduana e inmigración puede tener un rol importante en la selección de la ruta a seguir.
- Son generalmente parte de un sistema de rutas más amplio, pero generalmente pueden modelarse como sistemas simples con pocas alternativas.
- Los costos de las expropiaciones pueden variar significativamente dependiendo de la localización de esta infraestructura. En ciudades fronterizas pueden ser muy altos.

1.4.4 Autopistas urbanas/suburbanas

En los últimos 10 años ha aumentado el número de concesiones de carreteras urbanas y suburbanas de cuota tanto en México como en países como los EE.UU., Canadá, Australia, Brasil, Chile y varios países del sudeste asiático.

- La nueva carretera viene a resolver un problema de acceso y de congestión, que es más grave en horas pico. Los ahorros de tiempo deben ser significativos para que la carretera sea atractiva.
- Los costos del terreno (expropiaciones) son generalmente muy altos y por lo tanto es difícil destinar espacio a plazas de peaje, así que la tendencia actual es establecer sistemas de recolección de cuota electrónica de flujo libre, sin barreras ni demoras.
- El número de alternativas, libres o con cuota, es elevado, así como lo son los pares O-D relevantes.
- Las autopistas urbanas de cuota generalmente provocan problemas de congestión en los puntos donde existen incorporaciones (casetas) y desincorporaciones (salidas de los tramos de cuota) durante las horas pico, es por esto que el nuevo paradigma de movilidad dentro de zonas urbanas sugiere que se hagan inversiones económicas para implementar otros modos de transporte más sustentables como la bicicleta.

1.5 Clasificación de carreteras respecto a los requerimientos de modelación

De acuerdo con la configuración del subsistema en que el proyecto estará inmerso y sus requerimientos de modelación la clasificación del punto 1.4 anterior se divide en (Steer Davis Gleave y Transconsult para la SCT, 2006):

1.5.1 Proyectos simples

En este caso es posible identificar sólo unas pocas rutas alternativas y pares O-D de relevancia y por ende es posible aplicar modelos de elección entre alternativas discretas y aplicarlos en hojas de cálculo. El modelo que se utiliza más frecuentemente en estos casos es el Modelo Logit, que entrega la proporción de viajeros que utilizaría una alternativa determinada.

Algunas carreteras interurbanas (con sólo una alternativa), así como puentes o túneles en áreas poco pobladas, también se pueden catalogar como proyectos simples. Algunas características de este tipo de proyectos son:

- i. Existencia de número limitado de alternativas (ruta existente y alternativa de cuota).
- ii. Posibilidad de agrupar a los usuarios potenciales de la nueva alternativa de cuota dentro de un número limitado de zonas.
- iii. No existen serios problemas de congestión.

En los modelos tipo Logit se suele aplicar una función exponencial para calcular la captación de tránsito con base en la diferencia de costos generalizados de viajes (incluyendo tiempo, costo de operación y el pago de cuota entre la ruta existente y la nueva alternativa de cuota).

La fórmula utilizada para evaluar la selección de ruta con diferentes cuotas toma la forma siguiente:

$$P_c = \frac{e^{\lambda \text{Costogen}_c}}{\sum_k e^{\lambda \text{Costogen}_k}}$$

Donde:

- P_c es la proporción de viajeros que escoge la alternativa c (cuota).
- Costogen_k es el costo generalizado de viajar por la alternativa k (cuando $k=c$ es la carretera de cuota)
- λ es un parámetro que debe ser estimado

Esta función se utiliza para estimar el tráfico que sería captado por la alternativa de cuota o la ruta libre de pago, en función de la diferencia en el costo generalizado del viaje (incluyendo el peaje) entre una u otra ruta. Si el costo generalizado es el mismo, el tráfico se asigna 50/50. Los modelos Logit gráficamente son una curva en forma de "S".

1.5.2 Proyectos de redes

En situaciones donde además de la alternativa de cuota existen múltiples rutas alternativas, la ruta óptima puede variar dependiendo de las condiciones de tráfico. Cuando existe la opción de múltiples rutas, la introducción de una autopista de cuota o un puente/túnel en un área urbana con una red compleja, puede modificar los patrones de viajes de varias zonas de la ciudad, lo que genera un impacto en gran parte de la red.

La aplicación de modelos de transporte es necesaria para estimar demanda en proyectos de cuota dentro de áreas urbanas y en sus periferias, así como en carreteras interurbanas donde existe congestión y donde no, especialmente cuando se debe y requiere considerar muchas alternativas, pares O-D y otras interacciones de tráfico)

Para la estimación de demanda en redes complejas se hace uso de software que sea capaz de simular la elección de ruta de los conductores teniendo en consideración a la congestión, algunos programas disponibles en el mercado son Emme/2, TransCAD, CUBE/Trips y SATURN.

Los modelos de elección Logit y modelos simples todo o nada, no son convenientes para la modelación de tráfico dentro de áreas urbanas con redes complejas.

1.6 Impactos producidos por nueva infraestructura carretera de cuota

Los efectos que pueden producir el mejoramiento o la puesta en servicio de un nuevo tramo de infraestructura carretera, un puente o un túnel de cuota pueden ser inmediatos en algunos casos o a largo plazo como son (Steer Davis Gleave y Transconsult para la SCT, 2006):

- Alteración de los patrones de comportamiento de los viajeros de diversas maneras, al ofrecer un mejor servicio a un precio establecido.
- Conduce a una disminución del costo generalizado de viaje, debidos mayormente a ahorros de tiempo.
- Los viajeros pueden aprovechar las ventajas que ofrece la nueva infraestructura:
 - cambiando de ruta (reasignación)
 - cambiando el modo de transporte
 - cambiando la hora en que se viaja
 - viajando más frecuentemente
 - cambiando el lugar de residencia o trabajo (redistribución).

- Los usos del suelo pueden cambiar como consecuencia de cambios en los niveles de accesibilidad.

En un entorno urbano (como la mayoría de las ciudades en México) es necesario llevar a cabo un análisis de las infraestructuras que permiten la movilidad, es decir: el espacio público, ciclovías, calles, superficie de rodamiento, aceras, infraestructura de transporte masivo, entre otras, ya que según una publicación de ITDP (2012), la construcción de más vialidades (túneles, pasos a desnivel, segundos pisos y autopistas urbanas con el fin de hacer más rápido el tráfico de vehículos de motor) es una solución inadecuada a la mayoría de los problemas de movilidad porque éstas fomentan el uso del automóvil y en consecuencia la movilidad urbana sustentable queda rezagada.

1.6.1 Cambios en los patrones de viaje a corto plazo

- Cambio de ruta entre origen y destino

Es llamado efecto de reasignación de tráfico se refiere exclusivamente a usuarios que alteran su ruta (los usuarios viajan a la misma hora y por el mismo modo que anteriormente) es el efecto más evidente y fácil de modelar ya sea en hoja de cálculo para proyectos simples o usando modelos de redes. La magnitud del tránsito reasignado puede ser determinante en la valoración financiera del proyecto.

El cambio de ruta es la respuesta conductual más importante en la mayoría de las carreteras de cuota en el mundo, pues resulta ser la fuente de más del 90% de la recaudación en la mayoría de los casos, al menos en el corto plazo.

- Cambio de modo de transporte entre origen y destino

La modelación del efecto cambio de ruta en países desarrollados ante proyectos de cuota suele ser poco significativa y por lo tanto no se suele justificar su análisis. En cambio, en países en desarrollo cuando hay un aumento en el ingreso de los usuarios que normalmente hacen uso de transporte público, se podría presentar una tendencia por adquirir un vehículo, pero este cambio de modo de transporte se deberá más al efecto ingreso que a la existencia o no de una carretera de cuota.

En general se consideran como usuarios potenciales de una carretera de cuota a aquellos individuos que ya tomaron la decisión de utilizar el automóvil y resulta poco probable que los usuarios que ya han tomado la decisión de usar transporte público, decidan usar el automóvil, incluso cuando se dispone de uno.

En áreas urbanas donde el transporte público suele constituir una alternativa efectiva en comparación con usar las vías congestionadas, es posible que algunos individuos que disponen de vehículo decidan usar la nueva vía de cuota; sin embargo, se suele aceptar que, en términos de la generación de ingresos, el impacto es poco significativo.

- Cambio en la hora del viaje

En ciudades congestionadas, los usuarios pueden tener probablemente razones para viajar más temprano o más tarde a manera de evitar la congestión. Sin embargo, referente a los ingresos captados por los concesionarios de infraestructura de cuota, el impacto es poco porque el aumento en ciertos períodos se compensa con una disminución de viajes en otros períodos del día, en consecuencia, el impacto en términos de ingresos es nulo.

Por otro lado, la aplicación de distintos valores de peaje para períodos pico y no pico para el caso de algunas autopistas urbanas, sí puede tener un efecto en la elección de la hora de viaje. En estos casos, es posible que además de ser necesario modelar la captación de vehículos en distintos períodos del día, además sea necesario aplicar algún tipo de modelo de demanda elástica para estimar los viajes generados por cambios en la hora de viaje.

- Tráfico inducido

Son viajes que antes se hacían hacia otros destinos (redistribución) o viajes nuevos, pueden ser por un aumento en la frecuencia de viajes a consecuencia de un aumento en la actividad económica o a cambios en los patrones de localización de los usos del suelo.

La demanda inducida es uno de los elementos más difíciles de modelar en cualquier proyecto de transporte. En algunos casos de proyectos de cuota, la demanda inducida es una componente importante de la proyección total de los ingresos y tiene un impacto relevante en la evaluación socioeconómica del proyecto.

- Cambio de destino aprovechando la accesibilidad

Los proyectos de infraestructura de cuota pueden generar impactos muy significativos que mejoran la accesibilidad y disminuyen tiempos de viaje entre orígenes y destinos, por lo tanto, es latente que se produzcan tanto cambio de ruta, así como de modo de viaje, además de cambios entre orígenes y destinos, por ejemplo, el caso de un túnel o un puente que permiten unir zonas que no estaban conectadas debido a la presencia de un río, un lago o una montaña. Todo lo anterior se cumple cuando la nueva alternativa no sólo supone una mejora de las

condiciones de viaje con respecto a las rutas alternativas, sino que constituye una alternativa completamente nueva.

- Generación de viajes (aumentos en las frecuencias de viajes)

Si la nueva infraestructura de cuota (carretera, puente, túnel, etc.) permite una reducción muy significativa de los tiempos de viaje entre un origen y destino, ésta podría detonar la generación de viajes, algunos ejemplos pueden ser: los viajes del trabajo al hogar pueden duplicarse para volver a comer o algún asunto importante, así en lugar de realizar un par de viajes el día, se realizarán cuatro mediante el uso de la nueva alternativa, otro ejemplo puede ser el caso de un viaje a la playa que se realizaba una vez al mes pero que a través de una nueva carretera suburbana de cuota se reduce la distancia y el tiempo de viaje detonando que el viaje se realice múltiples veces al mes.

Para el operador de la infraestructura es importante la evaluación desde el punto de vista de los ingresos, además de otros beneficios de tipo socioeconómico. Ignorarlo puede dar lugar a una subestimación de las proyecciones de demanda e ingreso.

1.6.2 Cambios a largo plazo

- Cambios en el uso del suelo adyacente a la carretera

La construcción de nueva infraestructura carretera con cobro de cuota puede generar cambios en los usos de suelo, porque podría facilitar el desarrollo económico de la zona mediante la aparición de centros de trabajo como parques industriales, centros comerciales, gasolineras, entre otros y también dando acceso a los lugares que probablemente eran inaccesibles anteriormente, esto puede suceder sobre todo en proyectos interurbanos.

Estos efectos son difíciles de pronosticar, pues todo está correlacionado con la dinámica urbana y económica de la región o ciudad. Para la estimación de tráfico que puede ser generado y captado por una nueva carretera de cuota, debe efectuarse un análisis de expectativas de crecimiento económico dentro del área de estudio.

En la actualidad se tienen modelos integrados que tratan de predecir el impacto que las mejoras en el sistema de transporte producen en el uso del suelo. Sin embargo, los resultados que se obtienen no se encuentran completamente comprobados, no obstante, estos modelos son usados en planificación urbana y regional, y no para proyectar los ingresos de carreteras de cuota.

Capítulo 2. El modelo clásico del transporte

2.1 La demanda por transporte

La demanda de transporte es muy diferenciable ya que se pueden identificar la realización de viajes provocados por distintos propósitos: estudiar, trabajar, recreación, compras, entre otros. La demanda de transporte puede identificarse según el momento en el día en el que se realiza, por ejemplo, suele haber más viajes en las horas pico (periodos de máxima demanda) que en los periodos valle (o fuera de punta).

También se puede diferenciar el transporte de carga según el tipo de carga que se transporta o si el camión circula vacío. Así, existen varias maneras de caracterizar la demanda de transporte y su clasificación, lo cual dificulta el análisis posterior en el intento de predecir o evaluar un plan de transporte. Una característica fundamental de conocer es que la demanda de transporte es una demanda derivada, lo cual implica que una persona no viaja por el simple hecho de viajar, más bien los viajes se producen por la necesidad de hacer una actividad en otro lugar distante. Por lo tanto, entender las necesidades económicas de la ciudad es fundamental para poder predecir su estructura de viajes.

Otra característica de la demanda radica en el dinamismo, es decir, la concentración de viajes se realiza en ciertos periodos del día, pues la mayor parte del tiempo es dedicado a las actividades obligatorias y de duración más larga como estudiar y trabajar; el tiempo para realizar viajes es mucho menor.

Durante las horas pico, una vez que se han generado los viajes en la ciudad, los usuarios deben compartir la infraestructura, dando lugar a congestión y mayores tiempos de viaje. Dependiendo de la estructura de actividades y viajes de una ciudad, es posible que se presenten más periodos durante el día en los que se concentren mayor cantidad de viajes, como puede ser a la hora de la comida y en particular cuando las personas regresan a sus hogares al finalizar la jornada de trabajo o de estudios.

Un atributo más de la demanda consiste en la localización espacial; en el transcurso del día habrá sitios de la ciudad que generen viajes y otros que atraigan viajes, en la hora pico matutina las zonas residenciales tenderán a generar viajes, es decir, a originar viajes, de igual manera las zonas comerciales o laborales tenderán a atraer viajes, siendo así el lugar de destino de los viajes.

Finalmente, al presentarse las horas pico, se produce un desbalance en el uso de las alternativas y en la infraestructura. (Raveau, Ortúzar , & Rizzi, 2017)

2.2 La oferta de transporte

El transporte es un servicio intangible (o inmaterial) que permite desplazarse de un lugar a otro para llevar a cabo actividades específicas. Los viajes requieren un recurso fundamental que es el tiempo de viaje, ir de un lugar a otro requiere invertir tiempo para viajar que puede incrementarse en tiempo a bordo de un vehículo, tiempo de espera, tiempo de caminata, tiempo por demoras (que pueden ser producto de externalidades como la congestión o los accidentes). La oferta de transporte no es acumulable, lo que quiere decir que cualquier asiento que no sea ocupado para realizar un viaje en un autobús, un tren o un avión, no se puede guardar para un viaje posterior, cualquier cantidad de oferta que no se utilice, se pierde. La oferta de transporte tiene tres componentes fundamentales:

- Infraestructura: corresponde a las obras físicas en la ciudad como calles, autopistas, veredas, ciclovías, pistas de aterrizaje y despegue de los aeropuertos, estaciones de tren, estaciones de metro, etc.
- Equipos: son los vehículos que circulan sobre la infraestructura, pueden ser autos privados, taxis, autobuses, incluso metros, bicicletas, y el modo de transporte caminata.
- Operación: reglas que determinan cómo la infraestructura y los equipos interactúan; éstos pueden ser los semáforos, algún tipo de tarificación, prohibiciones de accesos a vehículos a ciertas áreas de la ciudad en ciertos periodos del día, etcétera.

Una característica que dificulta el análisis de transporte es la interrelación entre los tres componentes anteriores:

- Un organismo de obras públicas a nivel nacional puede estar a cargo de la producción de infraestructura y construcción de autopistas.
- los vehículos para transporte público en particular, como autobuses, metro y tranvías, pueden ser administrados por un ente del sector privado, (operador privado) y
- la operación, en el caso de regulación de semáforos puede estar a cargo de una entidad pública local como un municipio

Por tanto, esta interrelación de tres partes debe ser positiva para realizar una operación eficiente del sistema del transporte. La toma de decisiones eficiente e informada es fundamental para el análisis de políticas de transporte, porque los proyectos para incrementar la oferta de transporte pueden ser de gran envergadura y requieren años para realizarse. La cantidad de recursos en

términos monetarios constituyen un desafío para las autoridades que deben tomar la decisión en el presente de construir una nueva infraestructura que estará en operación cinco años después. (Raveau, Ortúzar , & Rizzi, 2017)

2.3 Externalidades en el transporte

El concepto externalidad considera que las necesidades de un viajero pueden afectar a otras personas, así, cada viaje tiene asociado un costo interno y un costo externo.

- El costo interno es el que percibe cada viajero, su tiempo de viaje, su tiempo de espera, o su tarifa
- El costo externo es aquel que no perciben los viajeros, son otras personas las que incurren en ellos.

Para el caso del transporte los efectos externos suelen ser negativos, se pueden identificar varios tipos de externalidades:

- Al momento de anexar sistemas de transporte, la principal externalidad negativa suele ser la congestión, ésta ocurre en periodos pico de alta demanda, principalmente cuando la concentración de viajes implica un aumento en los tiempos de viaje de todos los individuos. En consecuencia, una decisión individual de realizar un viaje tiene un impacto sobre las personas con las que se comparte la infraestructura.

Es posible encontrar también otros tipos de congestión en los sistemas de transporte, asociados a la concentración de viajes, en el transporte público se puede observar congestión en los tiempos de espera, ya que, si un usuario se encuentra esperando en una estación de autobús para abordar y éste llega completamente lleno a la parada, este no se podrá abordar, por lo tanto, tendría que esperar el siguiente autobús por lo que el tiempo de espera se ve afectado. Otro efecto importante es la comodidad que experimentan las personas al viajar en vehículos con alto nivel de ocupación.

- Las emisiones de gases contaminantes y otros tipos de material articulado; la contaminación ambiental tiene efectos muy dañinos sobre la salud de la población, no solo de aquellos que realizan los viajes.
- Otro tipo de contaminación asociada al transporte es la acústica, el ruido generado por los vehículos al circular, afecta a la población residente en las inmediaciones de las calles y autopistas.

- Finalmente, otra externalidad asociada al transporte son los accidentes. Los efectos negativos de los accidentes viales son claros: por un lado, se generan costos (pérdidas económicas) y afectaciones importantes en la productividad de los individuos ya sea que estén involucrados o no necesariamente ya que pueden generar congestión vehicular en el momento subsecuente al siniestro; por otro lado, se pueden tener lesionados y en el peor de los casos, víctimas fatales. La gravedad de un accidente vial depende de algunos factores, se pueden identificar dos principalmente:
 - i. Los agentes involucrados: la colisión entre dos automóviles tiene consecuencias diferentes a la colisión entre un automóvil y un peatón o un ciclista.
 - ii. La velocidad a la que se encuentran los agentes involucrados al momento de ocurrir el accidente.

Para poder evaluar los efectos de una política de transporte respecto a cambios en el bienestar de la sociedad, es necesario hacer una valorización monetaria para cada externalidad asociada. Es importante y necesario encontrar:

- Un valor monetario para el tipo de viaje de las personas, relacionados a cambios en la congestión.
- Un valor monetario para la reducción de riesgo de accidente vial, por ejemplo, el beneficio de evitar una muerte prematura relacionada a accidentes, en particular a eventos fatales.
- Un valor monetario para los beneficios de la reducción de distintos tipos de contaminación.

Es posible extraer esos valores monetarios de las disposiciones a pagar por parte de la población, para poder reducir las externalidades de transporte. (Raveau, Ortúzar , & Rizzi, 2017)

2.4 Generalidades de modelación

Un modelo es esencialmente una representación de la realidad de manera tal de obtener una abstracción que permita mayor claridad conceptual acerca de la misma. Reduciendo su variedad y complejidad a niveles que permitan especificarla de forma adecuada para el análisis.

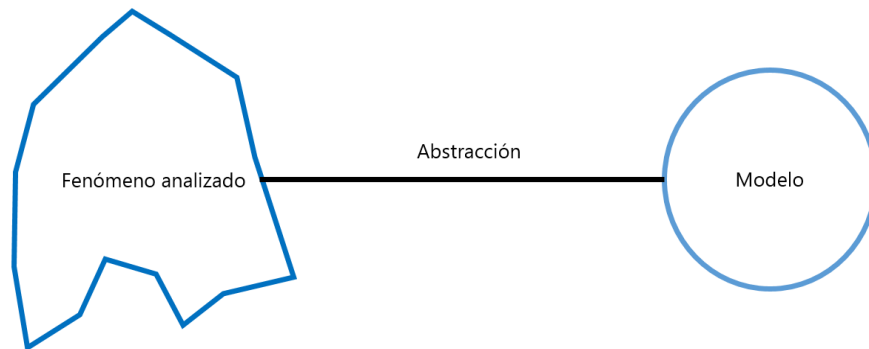


Fig. 10 Generalización conceptual de un modelo. Fuente: Curso en línea “Introducción a los modelos de demanda de transporte”, 2017

Por lo tanto, pueden existir varios tipos de modelos:

- Modelos físicos: son adecuados para tratar ciertos problemas físicos, pero están limitados a problemas de diseño, un ejemplo puede ser una maqueta en arquitectura suele ser un modelo físico típicamente; y en el área de ingeniería hidráulica un modelo de canales.
- Modelos abstractos: en ellos la situación real se representa por símbolos en lugar de mecanismos físicos. Son más útiles para el planificador pues trasladan su atención desde aquellos aspectos tridimensionales del diseño a la representación de las relaciones funcionales y procesos básicos de cambios en los sistemas analizados. Los modelos abstractos son mucho más comunes que los modelos físicos.

Dentro de los modelos abstractos, una clase muy importante son los modelos matemáticos, en éstos las relaciones postuladas se formalizan en series de ecuaciones que contienen dos tipos de variables importantes:

- Las variables exógenas, también llamadas variables independientes o explicativas, cuyo valor numérico se determinan fuera del modelo. Y se pueden dividir a su vez en variables de política, que están bajo el control del modelador y en variables adicionales. En última instancia serían las causas del fenómeno bajo estudio.
- Las variables endógenas o dependientes, su valor resulta de la operación del modelo.

El uso de modelos es de mucha ayuda en el desarrollo y experimentación teórica, en la práctica, uno de los problemas frecuentes y más limitantes es la información, pues los modelos por más sencillos que sean, requieren gran cantidad de datos.

Para la generación de un modelo no existe una formulación o claridad exacta de un proceso, no obstante, los profesionales que trabajan con modelos saben que consiste en un proceso esencialmente iterativo, por lo que cada etapa podrá ir sugiriendo nuevas ideas o mejorar las anteriores. Existe una serie de aspectos importantes al considerar cómo se debe formular o especificar un modelo:

- ¿Con qué propósito se construye el modelo?
- ¿Qué variables se deben incluir y cuáles de éstas están bajo el control del modelador?
- ¿Cómo se trata el tiempo?
- ¿Qué teoría se está representando en el modelo?
- ¿Qué técnicas estadísticas y matemáticas están disponibles para construirlo?
- ¿Qué métodos existen para calibrar el modelo, y posiblemente cómo probarlo, es decir validarlo en la práctica?

Un problema en la modelación de transporte es la validación, ¿cómo saber si el modelo estimado es adecuado de la realidad que se tiene?

- El modelo debe tener una estructura causal adecuada, debe haber lógica, entre las variables que explican y las explicadas
- Los datos del año base, es decir, aquellos datos estimados cuando se estima el modelo, y aquello que se usa para calibrarlo, originalmente debe replicarse en forma adecuada, porque si el modelo no replica al menos los datos del año base, entonces está mal planteado. Para verificar lo anterior existen técnicas estadísticas y metodologías de bondad de ajuste, por ejemplo, en el caso de un modelo de regresión lineal se puede comprobar con el R cuadrado, el test T, entre otros.
- Finalmente debe haber constancia en el tiempo de los parámetros.

La disponibilidad de información es un tema básico, es clave para decidir qué enfoque de modelación se debe utilizar. En el estado del arte en modelación, interesan factores como la riqueza conceptual de los modelos, la facilidad de tratamiento matemático y computacional y la disponibilidad de buenos algoritmos para resolver los sistemas de ecuaciones resultantes, pues en ocasiones son muy complicados. Cabe mencionar que es muy importante para hacer un estudio adecuado, saber cuáles son los recursos disponibles para el estudio, lo cual incluye financiamiento, datos, instalaciones computacionales, software y personal calificado en tareas de modelación. En consecuencia, el tiempo disponible para realizar el estudio y un buen nivel de conocimiento son elementos indispensables. (Raveau, Ortúzar , & Rizzi, 2017)

2.5 Nivel de detalle deseado en la modelación de transporte

De manera previa a la realización de un estudio de transporte, es necesario tomar en consideración, aspectos prácticos relacionados al nivel de detalle del estudio para poder hacer la elección del tipo de encuesta más apropiada; diseñar una encuesta no es fácil, requiere experiencia y análisis profundo del modelador, tomando en cuenta restricciones para estudios de transporte como las siguientes (Raveau, Ortúzar , & Rizzi, 2017):

- Duración del estudio: determinar qué cantidad de tiempo y trabajo se deben dedicar a la etapa de recolección de información; se debe balancear el estudio respecto de las distintas etapas, de modo que la recolección de datos e información no consuma gran parte del presupuesto, lo que podría suceder en un estudio sin debida planeación.
- Horizonte de predicción: saber qué tan a futuro se debe predecir; se presentan dos problemas asociados a esta restricción:

- i. el primero es si la predicción planeada es muy cercana, no se tendrá el tiempo necesario para ejecutar un estudio, en consecuencia, se deberán usar técnicas diferentes y se requerirá otra clase de información.
 - ii. Segundo, en estudios estratégicos, se requieren predicciones a veinte o más años al futuro, lo que conlleva un gran error asociado que no se conocerá sino hasta veinte años más tarde, por tanto, el plan debe ser flexible y con capacidad de adaptación para que el proceso de seguimiento y reevaluación sea exitoso.
- Límites del área de estudio: no necesariamente se debe delimitar el área a los límites políticos como colonias, municipios o estados. Es conveniente saber la diferencia entre área de interés y área de estudio en detalle. Generalmente el área de interés es más grande que el área de estudio, se espera que en un par de décadas ésta última se desarrolle y crezca.
 - Recursos del estudio: saber cuánto personal será necesario para el estudio y qué nivel de capacitación requerirá dicho personal, qué facilidades tecnológicas y computacionales podrán estar disponibles y qué limitaciones tendrán las mismas.

El nivel de detalle o solución a utilizar en un estudio de transporte debe ser resuelto por el analista, existen tres importantes decisiones que éste debe tomar en cuenta:

- El sistema de planificación
- La definición de la Red
- Los distintos periodos de análisis

2.6 Zonificación

Para poder analizar y modelar los viajes de cualquier ciudad, ésta se debe dividir en zonas homogéneas en cuanto al uso de suelo y composición de la población, es recomendable que esas zonas sean compatibles con otras divisiones administrativas, especialmente con zonas para poder hacer uso de otras fuentes de información disponibles. El propósito es facilitar la identificación de zonas que generan y atraen los viajes sobre todo durante los periodos pico del día laboral.

La zonificación corresponde a la acción de fraccionar físicamente la ciudad (conceptualmente), no es necesario dividir el área de estudio en zonas de igual tamaño; la cantidad de zonas en las que debe dividirse el área depende de dos factores:

- El carácter del estudio, ya que en un estudio estratégico se elegirán menos zonas y más grandes, por otro lado, en un estudio más minucioso o detallado, se deberían tener una mayor cantidad de zonas de menor tamaño.

- La cantidad de zonas dependerá de los recursos disponibles, ya que un número mayor de zonas implica una mayor exactitud, y por lo tanto es más caro desde cualquier punto de vista.

Es importante mencionar que, en la modelación de transporte, la zonificación supone que las actividades de una zona se encuentran en un centroide, con base a esto, los viajes de la ciudad iniciarán y finalizarán en los centroides de las zonas correspondientes y deben ser de un tamaño que no produzca grandes errores.

Habiendo definido la zonificación, se continúa a definir la Red Vial en la cual se efectúan los viajes; la Red vial es la oferta de infraestructura y se caracteriza de forma jerárquica, es decir clasificando en Autopistas (de cuota generalmente), Carreteras libres (federales y estatales), Avenidas y Calles.

- i. Red vial primaria: compuesta por las autopistas urbanas de gran capacidad, las principales avenidas correspondientes a los corredores estructurales de la ciudad
- ii. Red vial secundaria: conformada por calles de menor capacidad que brindan conectividad local entre distintas zonas de la ciudad.

Si la jerarquización de la red vial es muy detallada, se logra una representación muy cercana a las condiciones reales, pero el sistema es más costoso y difícil de usar; la red vial está compuesta también por ejes de transporte público, como las líneas de metro o autobús, ciclovías y andadores peatonales.

La definición del número de periodos de análisis a utilizar depende del tipo de proyecto analizado y nivel de precisión requerido para efectuar el estudio, la cantidad de periodos definirá el costo y duración del estudio, el objetivo de periodizar es encontrar un número limitado de periodos que logren representar válidamente las condiciones de operación del sistema analizado. Para estimar los impactos de un proyecto se deben predecir las condiciones de operación en la red estratégica que representa el área de estudio. Generalmente las condiciones de operación varían con los usos, frecuencias y capacidades y a su vez éstos varían cada día, semana, mes o año, por lo tanto, no es conveniente hacer predicciones con valores promedio de las variables, más bien es necesario distinguir periodos diferentes y homogéneos, para poder caracterizar las condiciones de oferta y comportamiento de la demanda de manera correcta. (Raveau, Ortúzar , & Rizzi, 2017).

2.7 Información típica requerida para la modelación de transporte

Cuando ya se cuenta con el cordón externo que delimita el área de interés, tiene que hacerse una zonificación del área, a fin de tener zonas que permitan representar eventualmente los viajes

de manera espacial, en términos de sus orígenes y destinos. La información básica para la modelación es la siguiente:

- Inventario de la infraestructura de transporte, conocimiento de la red de transporte para poder codificar de alguna forma específica, por ejemplo, las calles.
- Inventario de servicios existentes, sistemas colectivos como metro o tren subterráneo, igualmente autobuses, taxis, en general todos los servicios que operan en la ciudad deben estar introducidos en la modelación.
- Tener información sobre usos de suelo, ya que los modelos de transporte hacen una asociación, por ejemplo: viajar de un hogar a un lugar de trabajo requiere saber dónde están ubicados los lugares de trabajo, los lugares para hacer compras, las oficinas, las escuelas, etcétera.
- Aforos de tráfico, en éstos se contabilizan los vehículos que pasan por puntos de control determinados
- Datos socioeconómicos de la población, dependiendo del ingreso, sexo, edad de las personas ya que pueden comportarse de manera diferente; este tipo de información se obtiene a través de encuestas.

Las encuestas en hogares proporcionan información, más precisa para la modelación, efectuar encuestas en hogares es un procedimiento costoso y relativamente complejo en el proceso de recolección de información. Por lo tanto, existen otro tipo de encuestas que pueden realizarse en oficinas y en la vía pública.

- Encuestas de preferencias reveladas: son una observación del comportamiento real de las personas, por lo tanto, se debe acudir a donde se encuentran las personas y observar qué es lo que están haciendo.
- Encuestas de preferencias declaradas: se hace una selección de personas, es decir, se toma una muestra, y mediante el planteamiento de alternativas hipotéticas se recaba información sobre lo que harían las personas ante tales opciones. Como ejemplo el planteamiento de una nueva autopista, un nuevo libramiento, o un nuevo transporte que aún no existe pero que se implantará en el futuro. Este tipo de encuestas ha tomado más importancia en años recientes. (Raveau, Ortúzar , & Rizzi, 2017)

2.8 Encuestas de Preferencias Reveladas

Son métodos en las cuales se trata de observar el comportamiento real de las personas (Raveau, Ortúzar , & Rizzi, 2017), dentro de este tipo las más importantes son:

1. Encuestas Origen – Destino

Realizadas en hogares, generalmente son más caras y más difíciles de efectuar ya que requieren que las personas tengan la disponibilidad de colaborar desde sus hogares proporcionando la información que se les solicite, para realizar el trabajo de modelación. Estas encuestas cubren todos los viajes realizados por todas las personas del hogar y son muy útiles para estimar diversos modelos:

- Modelos de generación de viajes, para predecir cuántos viajes se hacen en el hogar dependiendo del tipo de personas que lo habitan,
- modelo de partición modal de viajes, para saber cómo eligen las personas su modo de transporte,
- distribución de longitudes de viajes, mediante la encuesta origen - destino se puede saber cuánto viaja y de qué forma viaja cada integrante del hogar.

2. Encuestas de Interceptación

Se realizan deteniendo a cierta cantidad de personas en los diferentes modos de transporte, puede ser a automovilistas que se detienen en un semáforo a través de la ayuda de un policía debidamente enterado y dispuesto a ayudar en el estudio; subirse a algún modo de transporte como un autobús o un tren para entrevistar gente; entrevistar en un estacionamiento a la gente que acaba de llegar en automóvil; en un aeropuerto entrevistando a gente que va a viajar por avión. En estos casos se obtiene información menos detallada que la obtenida de las encuestas en hogares, pues sólo se obtendrá información sobre el viaje interceptado y un poco de información socioeconómica como:

- Origen y destino de las personas
- El propósito del viaje
- Datos como el sexo, la edad, posiblemente el ingreso económico

Este tipo de encuestas son muy útiles para generar matrices de generación de viajes, mediante diferentes puntos de control dentro del área urbana pero específicamente aquella área definida previamente por el cordón externo, dándose una muy buena cobertura de todos los viajes en la ciudad. Además, también permiten conocer las longitudes de viajes de los encuestados. Para las encuestas en hogares probablemente la muestra debería ser más grande para lograr el mismo resultado de comportamiento.

3. Aforos

Técnica que consiste en contar pasajeros y vehículos en la red de transporte, los principales datos o información obtenidos mediante aforos son:

- tasa de ocupación de los vehículos
- flujos por tipo de vehículo

Datos complementarios de las encuestas:

- información sobre los usos de suelos, la diferenciación de los tipos de suelos, como oficinas, comercios, escuelas, residencias.
- información de empleos y otros indicadores que puedan dar idea sobre qué tan atractiva es la zona en cuanto a atracción de viajes
- niveles de servicio de los distintos modos de transporte, es decir, el tiempo de viaje, el costo de viaje, el tiempo de espera, etcétera

En resumen:

Las encuestas en hogares son muy importantes para los modelos de generación y atracción de viajes, ofrecen un conocimiento importante en cuanto a las tendencias espaciales como la tasa de motorización, éstas entregan información importante para construir una matriz de distribución de viajes y también entregan información sobre partición modal incluyendo los modos de transporte no motorizado.

Por otro lado, las encuestas de interceptación son importantes para construir la matriz de distribución de viajes; los aforos son importantes para saber cuál es el nivel de tráfico en la red y para poder validar eventualmente el modelo con datos anteriores; los otros estudios son necesarios para los modelos de partición modal y para los modelos de asignación de viajes (ver Fig. 11)

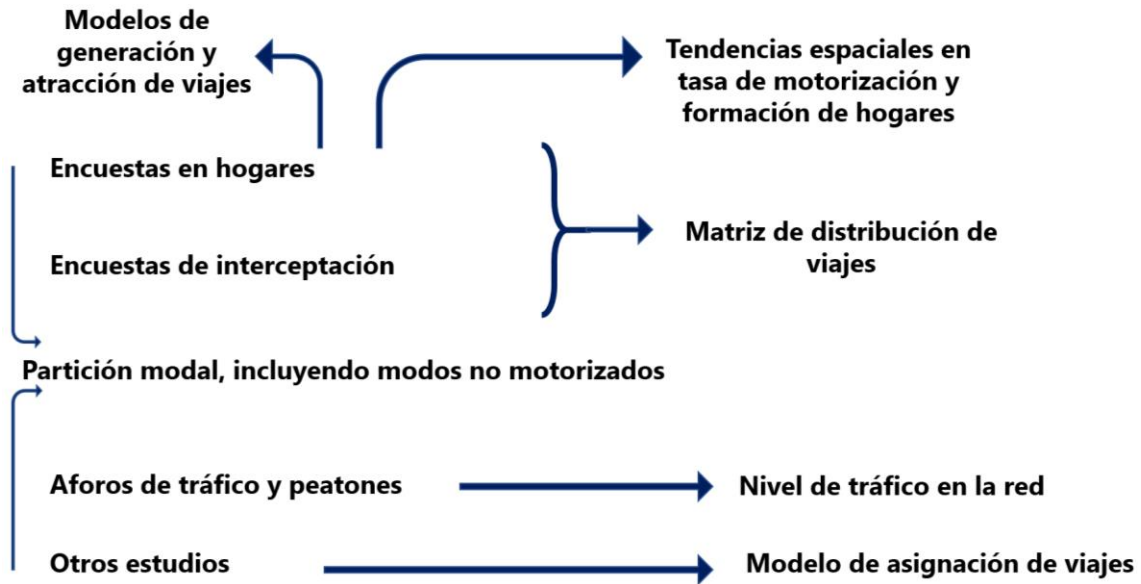


Fig. 11 Organigrama de las EPR (Encuestas de Preferencias Reveladas). Fuente: Curso en línea “Introducción a los modelos de demanda de transporte”, 2017

2.9 Encuestas de Preferencias Declaradas

En este tipo de encuestas se proponen a las personas de una muestra, una serie de situaciones hipotéticas, de las cuales deben realizar una elección, se trata de encontrar cuál es el comportamiento en relación a esas situaciones hipotéticas.

La forma de efectuar la encuesta tiene ventajas, una vez que se ha reclutado a la persona para que acepte ser entrevistado de esa manera, se le pueden preguntar varias cosas, así se pueden recopilar múltiples respuestas por cada persona encuestada.

A diferencia de las encuestas de Preferencia reveladas, las encuestas de Preferencia Declaradas se caracterizan por no tener errores de medición, porque se les presenta a las personas una situación caracterizada con datos que no tienen error de medición. Además, se pueden obtener datos de variables muy complejas de medir o muy difícil de observar en la práctica, como la comodidad o la confiabilidad, en las encuestas de preferencias declaradas se puede definir una comodidad de manera clara y poder pedir a los encuestados que consideren ese factor al momento de hacer sus selecciones.

Las encuestas de preferencias declaradas permiten analizar qué podría pasar con una alternativa que no existe en la actualidad, como un tren de alta velocidad, un nuevo libramiento o cualquier

obra de infraestructura de transporte, y obtener datos de si los encuestados elegirían entre las nuevas opciones o las alternativas existentes ya disponibles.

Los problemas recurrentes en la recopilación mediante este tipo de encuestas consisten principalmente en sesgos potenciales:

- Sesgo de afirmación, la persona encuestada consciente o inconscientemente puede tratar de decir la respuesta que cree que el encuestador busca, en lugar de responder sinceramente, éste trata de contestar algo que considera que le parece bien al encuestador. Este sesgo no es tan frecuente, pero puede presentarse.
- Sesgo de racionalización, se presenta cuando el usuario en una encuesta trata de racionalizar el uso del automóvil contra el uso de transporte público, es decir, que justifica su uso de manera coherente manifestando sus razones y exaltando el uso de este.
- Sesgo de política, se presenta cuando el encuestado responde que sí usaría una nueva alternativa de las opciones hipotéticas presentadas, aun pagando un peaje para ahorrar tiempo, pero en la realidad sólo lo haría en situaciones de emergencia.
- Sesgo de no restricción, se presenta si el encuestado elige entre un grupo de alternativas hipotéticas la opción más esperada, pero en la realidad no podría usar esa alternativa por cuestiones obligadas de su vida laboral y/o personal.

El comportamiento de los encuestados en la vida real puede ser diferente respecto al comportamiento que ellos afirman que tendrán, por lo tanto, este es el tipo de sesgo más importante en ese tipo de encuestas, no se tiene seguridad si la gente se comportaría de alguna manera cuando en efecto ocurra la implementación del nuevo modo o la nueva infraestructura. Existen tres formas de hacer encuestas de preferencias declaradas:

1. Elecciones: se le presentan al encuestado sencillamente dos o más alternativas, descritas claramente, ya sea de manera electrónica o impresa y el encuestado mirando cada uno de los atributos o variables que conforman dichas alternativas, elige la que le parece mejor
2. Ranking: se presentan al encuestado dos a más alternativas igualmente hipotéticas y en lugar de elegir alguna, se le pide que las ordene de mejor a peor o viceversa, es decir el encuestado establece una jerarquía, su principal ventaja es que se obtienen las preferencias del usuario de manera ordenada, lo que suele ser información importante y útil para la modelación.
3. Escalamiento: se plantean dos alternativas al encuestado, en lugar de pedir que diga cuál es la opción que más le gusta, se le pide que, usando una escala semántica, (si definitivamente elegiría una de las alternativas, probablemente elegiría una de ellas o definitivamente elegiría la otra alternativa) así el encuestado establece una puntuación que permite recolectar información respecto a la seguridad con la que el encuestado está eligiendo.

En general las Encuestas de Preferencias Declaradas tienen la ventaja de ofrecer:

- Mayor cantidad de respuestas por individuo
- Tratar atributos o variables que no son fáciles de obtener en la práctica
- Tratar alternativas que no existen en la realidad

(Raveau, Ortúzar , & Rizzi, 2017)

2.10 El modelo clásico de transporte

Para la formulación de un modelo se necesita la definición de un fenómeno a través de una variable o un grupo de variables que deben ser explicados, y por otro lado la definición de un conjunto de variables explicativas que supuestamente determinan las características del fenómeno que se debe analizar.

En el ámbito de transporte algunos fenómenos que interesaría analizar son:

- número de viajes producidos y atraídos por zona, por propósito y por categoría
- la posibilidad de usar un modo de transporte determinado
- flujos en los arcos de una red específica

Para explicar lo anterior se podría hacer uso de variables como características socioeconómicas de los individuos, niveles de servicio de los modos de transporte, etcétera.

Además de servir como explicativos, los modelos de transporte son utilizados especialmente para la predicción de comportamientos futuros. La calibración de dichos modelos enfrenta un conflicto entre los requerimientos para la explicación y para los de predicción, para lograr una buena modelación se requiere la habilidad de resolver el conflicto entre ambos objetivos. (Raveau, Ortúzar , & Rizzi, 2017)

El modelo secuencial de las cuatro etapas plantea la hipótesis que los individuos efectúan secuencialmente una serie de elecciones que caracterizan sus desplazamientos, con base en algunos atributos personales y del sistema de transporte. Dichas elecciones reflejan la relación con sus decisiones de viajar (generación de viajes) hacia un destino (distribución de viajes) en algún modo de transporte (partición modal) y mediante una ruta específica (asignación).

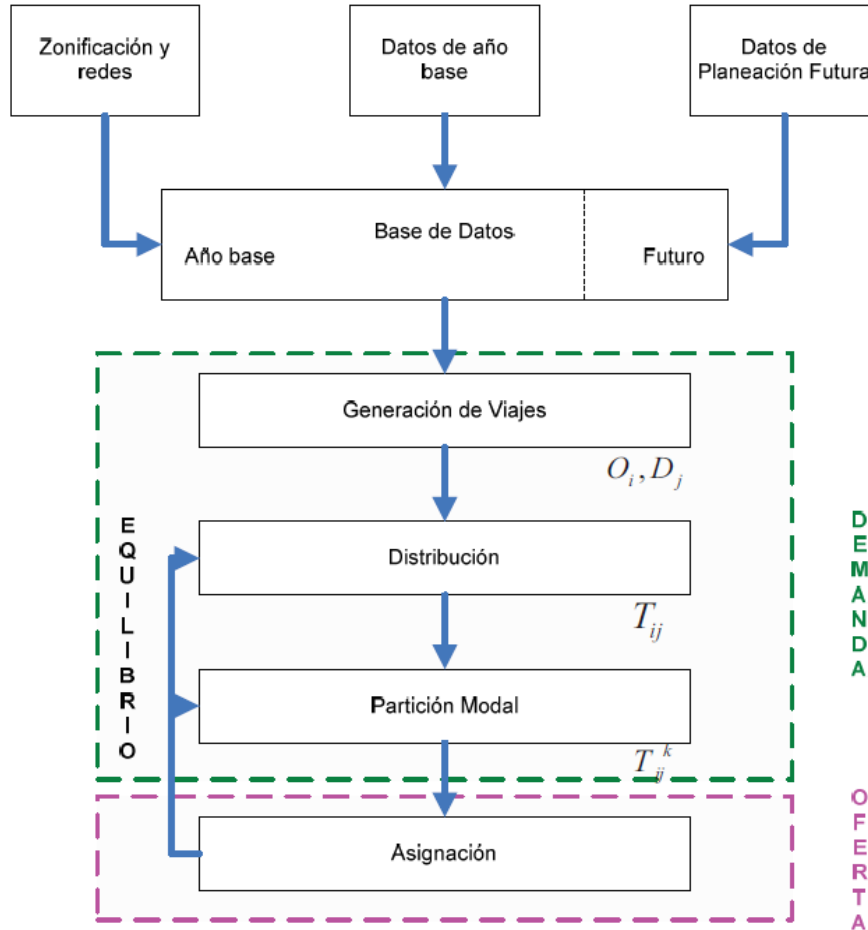


Fig. 12 Diagrama conceptual del modelo de transporte clásico secuencial de las cuatro etapas. Fuente: Ortúzar, 2008 citado por (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2010)

El modelo general consta de un conjunto de submodelos que reflejan las distintas etapas de la demanda y de la oferta de transporte. La definición pone especial énfasis en la calidad de cada uno de estos submodelos porque de ello depende la bondad del modelo general.

- El modelo de generación determina, a base de la información socioeconómica y de población, los viajes producidos (O_i) y los viajes atraídos (D_j) por cada una de las zonas de análisis en que se divide el área de estudio.
- El modelo de distribución construye una matriz de viajes (T_{ij}) entre parejas origen-destino de zonas.
- El modelo de partición modal divide los viajes entre los distintos modos de transporte disponibles (T_{ij}^k).

- Finalmente, las matrices de viaje por modo son asignadas a las redes correspondientes, obteniéndose de esta manera los flujos por arcos. Ortúzar, 2001 citado por (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2010)

Generación de viajes, distribución de viajes, elección de hora de viaje, partición modal y elección de ruta, conforman la *Demanda de viajes*.

La asignación de viajes es el proceso de hacer efectivo los viajes sobre una red de transporte, sobre una red física de transporte, así aparece con relevancia el concepto de *oferta*, la interacción entre la demanda y la oferta de transporte y el concepto de equilibrio del usuario.

2.10.1 Categorización de la demanda

Un modelo de demanda tiene por objetivo explicar y predecir las decisiones de los individuos, es decir, la generación, distribución y partición modal de sus viajes, no obstante, para permitir una mejor explicación, es necesario categorizar la demanda.

En los submodelos de Distribución de viajes y Partición modal de viajes la primera estratificación de la demanda es por motivo o propósito del viaje:

- Trabajo
- Estudio
- Otros

Por otro lado, para los submodelos de Generación y Atracción de viajes se podría tener una desagregación más detallada porque los viajes basados en el hogar de ida, de retorno o no basados en el hogar, tienen diferentes variables explicativas; por último, en cuanto a la Asignación de viajes, los modelos no distinguen distintos motivos de viaje.

El nivel socioeconómico del usuario es la característica más relevante en el ámbito de Demanda de Transporte, resulta muy complicada la categorización por cada individuo así que lo más usual en la práctica es hacerlo por hogares que habitan dichos individuos, así las variables que se usan para poder categorizar los hogares son:

- Ingreso familiar y
- Tasa de motorización

El número de categorías de demanda es determinante para definir las dimensiones del modelo, los requerimientos de información, calibración y calidad de los resultados obtenidos, aunque en la práctica es recomendable una mayor desagregación de categorías, esto debe evaluarse con respecto a la disponibilidad de información y recursos necesarios para la modelación.

Con base en lo anterior, se podría establecer que una adecuada categorización de los hogares podría suponer al menos tres niveles de ingresos: bajo, medio y alto, y dos niveles de tasa de motorización: sin auto y con auto.

Si existe un gran número de hogares que posean más de un auto, es recomendable desagregar la variable posesión de vehículo para poder hacer un análisis más detallado, con el fin de estratificar la demanda de transporte en diferentes categorías cruzadas de ingreso y tasa de motorización.

En algunos casos podría efectuarse la agregación de categorías extremas, es decir, cuando se obtuvieron escasas observaciones de una categoría específica en la muestra, no necesariamente por problemas de muestreo o número de encuestas, sino porque existen muy pocos hogares que presentan las características de la categoría.

Es recomendable que las categorías definan rangos de ingreso que puedan representar grupos con comportamientos diferentes desde un punto de vista útil para la modelación de demanda de transporte. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2010)

2.10.2 Modelo clásico de cuatro etapas

Para operar el modelo de transporte se requieren como datos de entrada los vectores origen-destino de viajes para cada período de análisis, clasificados por propósitos de viaje y por categorías de demanda. Estimar esos vectores es el objetivo de los modelos de generación/atracción.

En el mejor de los casos debería estimarse un vector de orígenes y un vector de destinos por cada propósito y categoría de demanda, sin embargo en la práctica la clasificación por categorías de demanda no siempre es posible, porque éstas se definen a partir de los niveles de ingreso y tasa de motorización de los hogares, la categorización de los orígenes (producciones de viajes) es fácil de hacer cuando los viajes se originan en el hogar, lo cual es una característica de la mayoría de los viajes en el período punta de la mañana y una proporción importante en los otros períodos. Por otro lado, durante esos mismos periodos la mayoría de los viajes se efectúan hacia lugares diferentes del hogar, por lo que la categorización de los destinos (atracción de viajes) resultaría arbitraria.

Con base en lo anterior el modelo sugerido supone que los orígenes son clasificables por propósito **p**-categoría **n** y los destinos son en cambio, clasificables sólo por propósitos de viaje **p**. De esta manera el modelo de transporte recibe como datos de entrada:

- Un vector Origen **i** por cada propósito de viaje y por cada categoría de demanda $\{O_i^{pn}\}$ y
- Un vector Destino **j** por cada propósito de viaje en la que todas las categorías de demanda están agrupadas $\{D_j^p\}$

Se debe cumplir que:

$$\sum_i \sum_p \sum_n O_i^{pn} = \sum_i \sum_p D_j^p$$

Donde:

O_i^{pn} = Número de viajes generados en la zona **i**, de la categoría **n** con propósito **p**

D_j^p = Número de viajes atraídos por la zona **i**, con propósito **p**

Por practicidad metodológica las generaciones de viajes (orígenes) son modeladas independientemente de las atracciones de viajes (destinos), los resultados deben ser consistentes. En la práctica el modelador tiende a ajustar las atracciones a las generaciones de viajes, por la existencia de mayor desarrollo conceptual de los modelos de generación. Dicho ajuste es posible mediante el cálculo de un factor de corrección para cada propósito de viaje:

$$f_p = \frac{\sum_i \sum_n O_i^{pn}}{\sum_i D_j^p}$$

A continuación, se multiplica el factor por los componentes del vector de destinos del propósito correspondiente, para obtener los valores ajustados:

$$D_j^p = f_p D_j^p$$

Para la explicación de la Generación de viajes se hace uso de dos tipos de modelos:

- Análisis por categorías, si bien estos modelos son conceptualmente más adecuados, su ámbito de aplicación se reduce a aquellos viajes originados en el hogar.
- Regresión lineal, estos modelos no son especialmente adecuados para explicar la generación de viajes, en casos como las atracciones de viajes y las generaciones de viajes no originados en el hogar, suelen ser la única herramienta metodológica para estudiarlos.

La elección de alguno de los anteriores depende de las características de los viajes cuyos orígenes o destinos se desea explicar. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2010).

2.10.3 Modelo de generación de viajes

Las generaciones de viajes más relevantes se pueden diferenciar en tres tipos:

- I. Generación de viajes basados en el hogar de ida. Deben ser estimados mediante modelos de análisis por categorías (AC)
- II. Generación de viajes basados en el hogar de retorno. Se pueden utilizar modelos de regresión lineal múltiple (RLM) para su estimación
- III. Generación de viajes no basados en el hogar. Se pueden utilizar modelos de regresión lineal múltiple (RLM) para su estimación

Los orígenes de una zona pueden ser expresados como sigue:

$$O_i^{pn} = O_{i(bhi)}^{pn} + O_{i(bhr)}^{pn} + O_{i(nbh)}^{pn}$$

Donde:

O_i^{pn} = Número total de viajes con propósito p , categoría n en la zona i .

$O_{i(bhi)}^{pn}$ = Número de viajes basados en el hogar de ida (bhi).

$O_{i(bhr)}^{pn}$ = Número de viajes basados en el hogar de retorno (bhr).

$O_{i(nbh)}^{pn}$ = Número de viajes no basados en el hogar (nbh).

La presente distinción metodológica es importante por las siguientes razones:

- La importancia de cada tipo de viaje depende del periodo de la modelación, los viajes basados en el hogar de ida se realizan principalmente en el periodo pico de la mañana
- La generación de los viajes basados en el hogar de ida es explicada por las variables socioeconómicas asociadas al hogar del viajero
- La generación de viajes no basados en el hogar y basados en el hogar de retorno puede ser explicada por variables asociadas a las actividades que se llevan a cabo en esas zonas.

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2010)

Generación de viajes basados en el hogar de ida (bhi)

Los viajes basados en el hogar de ida, para el propósito p y categoría de usuarios n $\{O_{i(bhi)}^{pn}\}$, se calcula utilizando el método de Análisis por Categorías (AC), con la siguiente fórmula:

$$O_{i(bhi)}^{pn} = H_i^n t^{pn}$$

Donde:

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

H_i^n = Número de hogares en la zona i , correspondiente a la categoría de hogares n

t^{pn} = Tasa de viajes por propósito p y de hogares de categoría n

Para la operación de este modelo se necesita conocer el número de hogares por categoría en cada zona, datos que pueden ser estimados con base en información socioeconómica independiente, normalmente censos poblacionales. También se requiere conocer la distribución de hogares por categoría tanto en el año base de análisis como en cada uno de los cortes temporales futuros. Después el problema es reducido a encontrar las tasas de generación de viajes para cada categoría de hogar y propósito, lo cual se realiza mediante modelos de análisis por categorías, que determinan dichas tasas de generación partiendo de una muestra de hogares, dividiendo para cada categoría ingreso-tasa de motorización, el número de viajes observados de un propósito por el número de hogares en la muestra.

Para determinar las tasas de generación mencionadas se puede realizar mediante dos marcos conceptuales: Análisis por Categoría Simple (AC) y Análisis de Clasificación Múltiple (ACM), cada uno tiene ventajas y desventajas. En la práctica se utiliza AC simple ya que se ha comprobado que el ACM sistemáticamente sobrestima los viajes generados, en las categorías de más altos ingresos y motorización, sesgando los pronósticos que las utilizan.

Para la estimación de modelos de generación de viajes con propósito p de los hogares de la categoría n . La tasa simple AC (t^{pn}), se calcula como:

$$t^{pn} = \frac{O_{i(bhi)}^{pn}}{H_i^n}$$

Al estimar las tasas de viajes pueden resultar no ser lo que se intuía, es decir, que no sean crecientes según nivel de ingreso y motorización, por esto es factible que para evitar este problema se deben agregar categorías para efectuar los cálculos.

Generación de viajes basados en el hogar de retorno (bhr)

Estos viajes deben ser modelados con regresión lineal múltiple (RLM) a nivel zonal, el Análisis por categorías no puede ser usado porque el origen de los viajes no es el hogar y por lo tanto no se puede considerar el número de hogares como una variable explicativa. Este tipo de viajes son poco probables en periodo punta de la mañana y son más frecuentes en hora no pico.

Para la modelación de este tipo de viajes se requiere hacer uso de variables explicativas asociadas con el uso de suelos y actividades de la zona, las variables explicativas del modelo de regresión lineal múltiple serán casi las mismas que se usarían por los modelos de regresión lineal múltiple de la atracción de viajes. La diferencia radica en que la generación de viajes debe clasificarse por categoría de demanda para lo cual se plantean dos alternativas:

- Calibrar un modelo RLM por categoría, es la opción más deseable pero su uso y grado de confiabilidad está limitada por el número de viajes observados en cada categoría de demanda. Por lo tanto, se pueden presentar problemas de calibración y dificultades para obtener modelos de RLM estadísticamente robustos.
- Calibrar un modelo RLM que no distingue categorías y después aplicar factores que representen adecuadamente la proporción de cada tipo de usuarios, esta alternativa requiere conocer el porcentaje de viajes basados en el hogar de retorno, generados por zona de acuerdo a la clasificación de demanda, los datos son difíciles de obtener o en caso contrario pueden obtenerse por una Encuesta Origen Destino existente.

Generación de viajes no basados en el hogar (nbh)

En este caso debe usarse modelación con regresión lineal múltiple (RLM) a nivel zonal ya que el método de Análisis por Categorías no se puede aplicar.

Las variables explicativas requeridas son aquellas asociadas con los usos de suelo y actividades de una zona, en este contexto serán estas mismas variables que se utilizarían en el modelo de regresión múltiple de atracción de viajes. La generación de viajes debe ser clasificada por categoría de demanda, en consecuencia, debe calibrarse un modelo de RLM para cada categoría, lo que puede representar un problema para la calibración porque en el periodo pico de la mañana el número de viajes no originados en el hogar suele ser muy pequeño, posteriormente

estos viajes deben ser diferenciados por propósito y categoría, se intuye que es difícil obtener un modelo de RLM estadísticamente robusto.

2.10.3.1 Modelos de atracción de viajes

La estimación de la atracción de viajes en periodo fuera de punta es posible teniendo presentes dos consideraciones importantes:

1. Para los viajes atraídos basados en el hogar de ida (bhi) y viajes no basados en el hogar (nbh) las variables explicativas corresponden a equipamientos por zona dedicados a cada actividad y no lo hogares, ya que ninguno de estos viajes tiene por destino el hogar. Debe ser calibrado un modelo de regresión lineal a nivel zonal para cada propósito y periodo de análisis definidos, haciendo uso de Regresión Lineal Múltiple.
2. Para modelar la atracción de viajes basados en el hogar de retorno (bhr), dado que el destino del viaje es el hogar la única variable explicativa sería el número de hogares por zona. Para la modelación de estos viajes se puede usar regresión lineal simple (RLS) y también se pueden considerar modelos de tasas mediante Análisis por categorías (AC).

Para el caso del periodo punta de la mañana, los viajes de este tipo son escasos, por lo que no es recomendable su separación. La Atracción total de viajes resulta de la suma de los resultados obtenidos por ambos modelos:

$$D_j^p = \theta_o + \sum_k \theta_{jk} X_{jk} + \varepsilon_j$$

Donde:

D_j^p = Número de viajes con propósito p , atraídos por la zona j .

θ_k = Parámetro de calibración.

X_{jk} = Variables explicativas (promedios zonales).

ε_j = Error de la estimación para la zona j .

Estos modelos estiman el número de viajes atraídos por una zona asumiendo una relación lineal de esta variable con el equipamiento existente en la zona, en términos de las actividades relevantes según el propósito de viaje:

- Viajes con propósito trabajo. Son atraídos por actividades que ofrecen empleos como el comercio, las oficinas, servicios e industria.

- Viajes con propósito estudio. Son atraídos por la presencia de planteles educativos (número de matrículas por nivel de educación: básica, media y superior)
- Viajes con otros propósitos: son atraídos por actividades recreativas, servicios médicos, viajes de compras, trámites, entre otros. Suele incluirse como variable explicativa el total de hogares existentes en una zona

En los modelos de atracción de viajes es posible determinar el número de viajes atraídos por zona para cada periodo y propósito, pero no es posible hacerlo para cada categoría de demanda, en palabras diferentes, las atracciones de viajes son modeladas a nivel zonal, por lo tanto, solo serán explicadas por periodo y propósito, pero no por categoría socioeconómica. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2010)

2.10.3.2 Síntesis de los modelos de generación y atracción de viajes

Tabla 3 Resumen de métodos a utilizar en los modelos de atracción y generación de viajes. Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2010)

Tipo de viaje	Generación	Atracción
Basado en el hogar de ida (bhi)	Tasas AC(1)	RLM(2)
Basado en el hogar de retorno (bhr)	RLM(1)	RLS(3) Tasas AC(2)
No basados en el hogar	RLM(1)	RLM(2)

Donde:

- Tasas AC(1). Modelos que usan Análisis por Categoría Simple, para estimar Generación de viajes basados en el hogar de ida (bhi). En este caso el origen es el hogar y la variable explicativa son hogares según categoría.
- RLM(1). Modelo Regresión Lineal Múltiple para explicar Generación de viajes basados en el hogar de retorno (bhr) y no basados en el hogar (nbh). Como el origen de los viajes no es el hogar, no se usa como variable explicativa el número de hogares
- RLM(2). Modelo de Regresión Lineal Múltiple para explicar la Atracción de viajes basados en el hogar de ida (bhi) y no basados en el hogar (nbh). Ya que el destino de estos viajes no es el hogar, no se usa como variable explicativa el número de hogares
- RLS(3). Regresión Lineal Simple para explicar la Atracción de viajes basados en el hogar de retorno (bhr). Puesto que el destino de estos viajes es el hogar, suele utilizarse la variable explicativa número de hogares
- Tasas AC(2). Modelos de Tasas de atractividad, explican la Atracción de viajes basados en el hogar de retorno (bhr). Se utiliza la variable explicativa destino pues éste es hacia el hogar.

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2010)

2.10.3.3 Modelo de distribución de viajes

La forma funcional del modelo gravitacional de Distribución de viajes es el siguiente:

$$T_{ij}^{pn} = A_i^{pn} O_i^{pn} B_j^p D_j^p f(c_{ij})$$

Donde:

T_{ij}^{pn} = Número de viajes entre el par origen destino (i,j) para el propósito **p** y categoría **n**

O_i^{pn} = Representa orígenes según propósito **p** y categoría **n**

D_j^p = Representa los destinos según propósito **p**

A_i^{pn} y B_j^p son factores de balance en orígenes y destino

$f(c_{ij})$ = es una función de costo de viaje que tiene uno o más parámetros para calibrar. Esta suele ser llamada "función de disuasión" ya que implica el desincentivo para viajar, como la distancia o el tiempo o costos. Algunas formas comunes de esta función son las siguientes:

$f(c_{ij}) = \exp(-\beta c_{ij})$	Función exponencial
$f(c_{ij}) = c_{ij}^{-n}$	Función potencial
$f(c_{ij}) = K c_{ij}^{-n} \exp(-\beta c_{ij})$	Función combinada o tipo gama

Donde:

c_{ij} = tiempo o costo generalizado entre un par origen destino (i,j)

$n > 0$, $\beta > 0$, $K > 0$: parámetros a calibrar. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2010)

2.10.3.4 Modelo de partición modal

Un modelo de Partición Modal divide la matriz de viajes resultante de la Distribución de viajes en tantas matrices como modos de transporte existan disponibles a los usuarios y será necesario un modelo de partición modal para cada categoría de demanda, propósito de viaje y periodo de análisis.

Los Modelos de Partición Modal o de Elección discreta, constituyen gran parte de las aplicaciones actuales en el estudio del transporte. Estos modelos se enfocan en simular el proceso de elección de un individuo que enfrenta un conjunto de alternativas discretas de elección; estos modelos tienen asociada la hipótesis de que la probabilidad de que un individuo elija una alternativa determinada del conjunto de opciones es función de las características socioeconómicas del individuo y de la atractividad de cada opción. En este contexto, el usuario de categoría n , para viajar desde un origen hasta un destino específico, dispone de un conjunto finito y discreto A^n de modos de transporte o alternativas; la elección de una de las alternativas $m \in A^n$, depende de las características del usuario y de los atributos de los modos disponibles. Se define una función de utilidad asociada a cada una de las alternativas disponibles y se asume que el usuario elegirá la que le aporte una mayor utilidad. Generalmente esta función de utilidad se expresa con una formulación lineal en los parámetros:

$$U_{ij}^{pnm} = \delta^{pnm} + \sum_k \theta_k^{pnm} X_k^{pnm}$$

Donde:

- X_k^{pnm} : representa los atributos de los viajeros de propósito p , categoría n y modo m ; usualmente esta expresión incluye como atributos del modo a sus variables de servicio (tiempo de viaje, tarifa, etcétera) y como atributos del usuario a su ingreso, nivel de estudios, etcétera.
- θ_k^{pnm} : son coeficientes que representan el peso que los usuarios de propósito p , categoría n y modo m , asignan a cada variable incluida en la función de utilidad.
- δ^{pnm} : corresponde a una constante modal que representa ciertas características específicas que el modo m tiene para los usuarios de propósito p y categoría n , y que no están representadas en el resto de la función de utilidad del modo. Para la estimación de los coeficientes en la práctica, se debe fijar en valor cero la constante específica o modal de una de las alternativas del conjunto de opciones, que servirá de referencia, así el resto de las constantes específicas o modales serán relativas a la mencionada alternativa de referencia.

La función de utilidad debe incluir un término observable y un término aleatorio que refleja las variables desconocidas y por lo tanto no observables por el modelador tales como ciertas características subjetivas en la elección modal de los usuarios como la comodidad, privacidad, gustos, entre otros. Con base en lo anterior:

$$U_{ij}^{pnm} = V_{ij}^{pnm} + \varepsilon_{ij}^{pnm}$$

Donde:

- U_{ij}^{pnm} : Función de utilidad completa de la alternativa m para los usuarios de propósito p y categoría n .
- V_{ij}^{pnm} : Parte observable de la función de utilidad.
- ε_{ij}^{pnm} : Parte no observable (aleatoria) de la función de utilidad.

Puesto que lo que se trata de simular es el comportamiento de los individuos, para el término aleatorio ε_{ij}^{pnm} debería suponerse una distribución normal y podría derivarse el modelo Probit de partición modal, no obstante, la distribución normal con una complejidad matemática hace que la aplicación sea muy difícil para más de tres alternativas.

Por otro lado, si se supone una distribución Gumbell para el término aleatorio, es posible derivar en el modelo Logit Multinomial de partición modal:

$$P_{ij}^{pnm} = \frac{\exp(U_{ij}^{pnm})}{\sum_k \exp(U_{ij}^{pnk})}$$

Donde:

- P_{ij}^{pnm} : es la probabilidad de que un usuario del propósito p y categoría de usuario n , elija el modo m para viajar entre el par origen-destino (i,j)
- U_{ij}^{pnk} : Función de utilidad de viajar en el modo k (m pertenece a k), entre un par origen-destino (i,j) para un propósito p y categoría n .

La hipótesis de que los términos aleatorios asociados a cada alternativa modal son independientes e idénticamente distribuidos, es una condición implícita que permite la derivación de este modelo, caso contrario, no se podría formular o no tendría la forma que se ha planteado. Así esta condición implica que las alternativas modales deben ser percibidas por los usuarios de manera diferenciada, ya que en grandes ciudades cuando existen alternativas o modos de transporte parecidos entre sí o cuando es necesario considerar alternativas multimodales en la partición modal, el resultado del modelo puede dar malos resultados por la correlación que tienen las diferentes alternativas.

Para tratar el problema de correlación entre alternativas existe el modelo Logit Jerárquico (HL) el cual agrupa las alternativas correlacionadas y explica la elección modal como un proceso escalonado de decisiones. En la práctica, tanto el modelo Logit multinomial (MNL) como el modelo Logit jerárquico (HL) son los más utilizados en la modelación de transporte.

Finalmente, habiendo definido la probabilidad de que un usuario con propósito p, categoría n y modo m para viajar entre un par (i,j), el número de viajes en ese modo se obtiene multiplicando la probabilidad obtenida por alguno de los modelos mencionados anteriormente por el número de viajes en ese par, lo que resulta en:

$$T_{ij}^{pnm} = T_{ij}^{pn} P_{ij}^{pnm}$$

Que es una matriz de viajes por cada modo entre cada par origen – destino. A continuación, se debe asignar las matrices de viajes a las redes correspondientes a cada modo. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2010)

2.10.3.5 Asignación

Asignación transporte privado

El proceso consiste en asociar la oferta y la demanda, a través de un proceso iterativo hasta alcanzar el principio de equilibrio. El equilibrio se obtiene cuando el costo de operación (tiempo) es igual para todos los caminos alternativos sobre la red para cada par origen – destino. Se supone que los usuarios tienen los comportamientos siguientes:

- Los usuarios son individuos racionales e intentan maximizar su utilidad personal (minimizar sus costos)
- Tienen conocimiento perfecto de las condiciones de operación de la red en cualquier momento

En la asignación por equilibrio, el tiempo de viajes se calcula como la suma del tiempo del auto sobre los enlaces y los tiempos en los giros. El costo generalizado se modifica cuando en un enlace el usuario tiene un costo adicional, por ejemplo, algún peaje. Se puede expresar como **tiempo+peaje * peso**, en la cual el peso es un parámetro de calibración (inversa al valor del tiempo que depende de cada estrato de viajero).

Al dar inicio al proceso de asignación es necesario precargar la red con los volúmenes del transporte público, éstos se asignan de forma previa a los enlaces mixtos (los que comparten transporte privado y transporte público) en autos equivalentes, con la finalidad de considerar la congestión que aporta el transporte público.

En la práctica se suele recomendar el uso del Método de Asignación de Equilibrio del Usuario (UE) multimodal multiclase, éste es encontrado en los diferentes softwares de planeación de transporte disponibles en el mercado.

Aspectos adicionales a considerar:

- Funciones de demora (volumen/capacidad) en los enlaces
- Funciones de demora en las intersecciones
- Puntos de semaforización en la red vial y reducción de capacidad de acuerdo al ciclo

Los criterios para detener o parar la asignación son:

- Por número de iteraciones
- Relative gap
- Algún criterio específico de cada software

Asignación transporte público

El concepto de ruta puede ser generalizado como una estrategia óptima, en el ámbito del transporte público el usuario puede escoger un conjunto de rutas factibles para llegar a su destino, abordando el vehículo que llegue primero y descender en una parada o estación específica, esto basado en el tiempo esperado de viaje desde la parada hasta su destino, este proceso se repite hasta que el usuario llegue a su destino final.

La red de transporte público tiene varios modos de transporte, cuando el usuario espera en la parada éste puede elegir otro conjunto de líneas factibles de otros modos diferentes para llegar a su destino. La ruta óptima es la que minimiza el tiempo total de viaje o Costo Generalizado (CG). Los tiempos considerados incluyen el de espera en el vehículo, y el usado para a caminata, lo cual puede ser incluido en la siguiente ecuación:

$$CG = TV + pw t_{espera} + pc t_{caminata} + ptrans + pt T_a$$

Donde:

CG :	Costo generalizado.
TV :	Tiempo de viaje dentro del vehículo de transporte público.
pw :	Peso del tiempo de caminata (a calibrarse).
t_{espera} :	Tiempo de espera del usuario a la ruta o rutas.
pc :	Peso del tiempo de caminata (a calibrarse).
$t_{caminata}$:	Tiempo de caminata (en el origen y en el destino).
$ptrans$:	Peso del transbordo (a calibrarse)
pt :	Factor para convertir la tarifa en minutos
T_a :	Tarifa total del viaje

El tiempo de espera depende de la frecuencia combinada de las rutas factibles en una parada específica; el tiempo de espera en una parada donde hay un par de rutas A y B y cada una de ellas tiene un intervalo de paso, éste se puede formular como:

$$t_{espera} = \frac{\lambda}{\frac{1}{Intervalo_A} + \frac{1}{Intervalo_B}}$$

Donde λ es el factor de tiempo de espera, y es un parámetro para modelar percepciones del tiempo de espera diferentes o también diferentes distribuciones de tiempos de paso de los vehículos. La probabilidad de elegir una ruta está formulada por el intervalo combinado de las rutas factibles en determinada parada. La probabilidad de utilizar la ruta A puede ser escrita como sigue:

$$P_A = \frac{\frac{1}{Intervalo_A}}{\frac{1}{Intervalo_A} + \frac{1}{Intervalo_B}}$$

Con el fin de poder realizar una comparación, se recomienda el uso de los métodos de asignación como:

1. Estrategia óptima (Emme3)
2. Pathfinder (TransCAD)
3. Headway-based Assignment (Visum)
4. Otros softwares de planeación

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2010)

2.10.4 Limitaciones del modelo clásico de transporte de cuatro etapas

A lo largo de cuatro décadas el problema de modelación del Transporte fue resuelto progresivamente para lograr resultados más satisfactorios o convenientes, surgiendo la metodología planteada anteriormente y que se conoce como enfoque clásico, que establece que el problema de transporte consiste en un proceso compuesto por etapas o mejor dicho, un proceso secuencial en el que se desarrollan diferentes submodelos: generación-atracción de viajes, distribución, reparto modal y asignación de tráfico a la red; conceptualmente la elección de la hora de viaje se ha agregado en tiempos recientes. Dada una relación funcional que intenta representar el fenómeno objeto de estudio, dichos submodelos requieren como datos de entrada, variables de naturaleza agregada, es decir que están relacionadas con el comportamiento conjunto de un determinado grupo de individuos, mismas que son utilizadas para estimar variables dependientes de tipo continuo (p.ej. el número de viajes generados entre dos zonas).

El modelo clásico de transporte y sus submodelos, conocidos como de “primera generación” ha sido el más difundido y aceptado para el análisis del problema general del transporte, aunque ha sido criticado por razones como su poca flexibilidad, poca precisión, costos elevados y débil orientación para la toma de decisiones de políticas a implementar (Ortúzar & Willumsen, 1994) citado por (Ortúzar & Román, 2003). Por lo tanto, el uso de estos modelos actualmente suele estar limitado a la predicción y planificación a gran escala.

Los modelos desagregados o de “segunda generación” surgen para superar las deficiencias del modelo con enfoque clásico de los años 70s. Autores como Domencich y McFadden (1975) (citado por Ortúzar, 2003) los denominaron modelos de comportamiento porque no están basados en una visión descriptiva de la demanda, sino que su objetivo es representar el comportamiento de los individuos explícitamente, reflejando la demanda a nivel individual o mejor dicho demanda desagregada. En consecuencia, se entiende el problema de modelación de demanda en Transporte como resultado de una serie de decisiones tomadas por cada individuo, enfrentado a un conjunto de alternativas y de ellas elegirá la que maximice su utilidad, dadas algunas restricciones como el tiempo, el costo, entre otras.

Con base en todo lo anterior, es preciso considerar un enfoque analítico alternativo al modelo clásico respecto del comportamiento del usuario. (Ortúzar & Román, El problema de modelación de demanda desde una perspectiva desagregada: el caso del transporte, 2003)

2.11 Enfoques para la estimación de la demanda de transporte

- *Enfoque de Preferencias Reveladas*

El uso del Enfoque de Preferencias Reveladas se inició en la década de los 70s y hasta los 80s, los modelos de demanda se basaban en datos observados de las decisiones que los usuarios tomaban de los sistemas de transporte, el seguimiento a las elecciones de los usuarios en sus viajes diarios, sus reacciones a los cambios en las tarifas, frecuencias de viaje, tiempo de recorrido, oferta de rutas, etcétera. Mediante este enfoque se obtienen medidas agregadas del comportamiento de los usuarios del transporte como matrices origen-destino por modo de transporte, cuotas porcentuales de participación de los distintos modos en el movimiento de pasajeros, viajes promedio por persona a la semana, valores promedio de posesión de auto, entre otros.

Estas observaciones obtenidas generalmente a través de las respuestas de los usuarios (de encuestas sobre las decisiones que ya tomaron o que suelen tomar al usar los sistemas de transporte), contadores mecánicos o electrónicos, boletos usados en el transporte y otros, no pueden dar información detallada sobre características del usuario (sexo, edad, nivel de ingreso)

que podrían ser de ayuda en la modelación de las decisiones de los viajeros. La recolección de este tipo de datos tiene asociadas algunas limitaciones, Ortúzar (2000) citado por (Quintero Moreno, 2011), se refiere a las siguientes:

- El costo de las encuestas Origen-Destino debe cubrir un gran número de entrevistados.
 - La influencia en la decisión del usuario que ejercen factores como la calidad del servicio o la comodidad que no son medibles directamente, es difícil de detectar.
 - Imposibilidad de conocer las características de las alternativas que no fueron escogidas
 - Aparición de fuertes correlaciones entre las variables explicativas más relevantes (tiempo y costo de viaje) que impiden desarrollar buenos modelos de pronóstico, debido a la escasa variabilidad que tienen estos atributos tomados independientemente.
 - Dificultad para obtener datos para la estimación de elecciones que podrían hacer los usuarios ante nuevos servicios de transporte que se encuentran en su fase de planeación o que aún no existen y no operan. (Quintero Moreno, 2011)
- *Enfoque de Preferencias Declaradas*

Es el enfoque alternativo al mencionado anteriormente, aparecieron en la literatura de transporte a fines de los años 70s; con éste se puede experimentar con diferentes escenarios para la elección de alternativas hipotéticas de transporte, que se presentan al entrevistado para poder conocer sus preferencias al respecto sobre alternativas que aún no se implementan pero que podrían ser de su interés, o también pueden ser situaciones reales en un sistema de transporte en operación.

Las respuestas del usuario en estas encuestas pueden ser ordenando las opciones planteadas (desde la más deseada hasta la menos atractiva), dando una calificación a cada opción (para intensificar su elección) o eligiendo la opción más atractiva y conveniente sobre todas las presentadas. Mediante este enfoque se solucionan algunas limitaciones de las preferencias reveladas, la cantidad de entrevistas requeridas es menor, se pueden investigar las preferencias de servicios de transporte futuros y es posible recopilar la influencia que tienen en las elecciones de los individuos, factores que no pueden ser medidos con facilidad como: preferencia de un servicio porque sigue una ruta escénica, o con poca congestión; la seguridad o el confort del viajero.

Los siguientes elementos constituyen el esquema general del enfoque de preferencias declaradas:

- Se basa en las respuestas que los entrevistados dan a planteamientos de cómo actuarían ante diversas opciones ofrecidas por el sistema de transporte.

- Cada opción se presenta como un paquete de atributos del viaje, como podrían ser: la tarifa, el tiempo de viaje, la seguridad, la comodidad, el número de transbordos, entre otros.
- La encuesta plantea las opciones hipotéticas de manera que el efecto de cada atributo individual del servicio pueda estimarse, para lo que se utilizan técnicas de diseño experimental que ayudan a manejar las variaciones de los atributos con independencia estadística
- El planteamiento de las opciones hipotéticas del servicio se hace de modo que el entrevistado las entienda claramente, le sean realistas y cercanas a su experiencia diaria del sistema de transporte.

Sobre las limitaciones que presentan las encuestas de preferencias declaradas ya se han mencionado en la sección 2.9 y corresponde a sesgos como:

- Respuestas poco realistas por un exagerado optimismo
- Sesgo de afirmación, el entrevistado responde lo que el entrevistador desea o espera recibir
- Sesgo de racionalización, donde el entrevistado da respuestas no realistas en un intento de racionalizar sus acciones
- Sesgo de política, cuando el entrevistado responde lo que piensa que podría apoyar decisiones políticas que él piensa que resultarán de la encuesta.

(Ortúzar, 2000) citado por (Quintero Moreno, 2011)

Sin embargo, con el transcurso del tiempo ya en los años 80, estas limitaciones fueron superadas considerablemente debido a refinamientos en las técnicas estadísticas aplicadas en las encuestas de preferencias declaradas, pues se obtuvieron buenos resultados sobre pronósticos basados en respuestas de los entrevistados mediante este tipo de encuestas. Dichas mejoras fueron: una mejor organización de las encuestas, uso de métodos de diseño experimental, lo cual aseguró que las variaciones en los atributos de las opciones presentadas al usuario fueran estadísticamente independientes unas de otras, esto es conocido como un diseño ortogonal.

Con el mejoramiento de la metodología se han obtenido pronósticos adecuados de las preferencias de los usuarios del sistema de transporte, con respecto a:

- Modo de transporte usado
- Ruta
- Frecuencia de servicio
- Hora de inicio de viaje
- Motivo de viaje
- Ubicación física
- Tipos de boletos
- Operador del servicio
- Tipo de vehículo

2.11.1 Enfoque de elección discreta

El fundamento central del enfoque de elección discreta es que 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 ese sistema. Los tipos de elecciones que puede realizar un usuario son:

- Modo de transporte (automóvil, autobús, taxi)
- Ruta a utilizar
- motivo del viaje (ir de compras, ir al cine, ir a la escuela)
- Hora de salida

La estimación de la demanda de transporte requiere el uso de un modelo que represente de manera razonable, el proceso de toma de decisiones de los usuarios, ante las opciones que tiene para viajar. Si dicho modelo es adecuado, los usuarios que se asignen a las diferentes opciones pueden ser sumados para obtener estimaciones agregadas del uso que tendrá cada una de esas opciones de viaje. Para constituir un modelo de elecciones de los usuarios se requieren tres elementos básicos:

1. Identificación de las opciones de viaje disponibles y conocidas por el usuario
2. Identificación de variables que influyen en la decisión de viajar, relacionadas con el sistema de transporte como el tiempo de viaje, costo del servicio, número de transbordos, etcétera. Y variables socioeconómicas que caracterizan al usuario como el sexo, edad, ingreso, posesión de automóvil.
3. Un modelo matemático que represente las elecciones del usuario en función de las variables mencionadas en el punto 2.

Las preferencias efectuadas por el usuario en sus elecciones, enfrentado a un conjunto de opciones, dependen de los atributos de las opciones y las características del usuario, por lo tanto, siendo la elección del usuario una manifestación de sus preferencias, es conveniente dirigir la modelación hacia ese propósito en particular. El marco teórico adecuado para este fin es la Teoría de Utilidad, que surgió en el área de la economía y se basa en una postura antigua del comportamiento humano, la cual establece que el valor de una decisión depende de la utilidad generada por la decisión, y en palabras simples es la cantidad de bienestar que proporciona o la cantidad de molestia que ésta evita, con base en la decisión tomada.

En el ámbito del transporte, el usuario buscará siempre maximizar la utilidad que puede derivar de las distintas opciones que enfrentan al tomar una decisión (Quintero Moreno, 2011).

Capítulo 3. Modelos de elección discreta

3.1 Introducción a modelos de elección discreta

En el capítulo anterior ya se han mencionado que existen dos tipos de modelos de demanda:

- **Modelos agregados:** este tipo de modelos entregan números o proporciones, pero de manera conjunta, como el caso del número de viajes entre un origen y un destino, o el caso de la proporción que viaja en cada modo de transporte.
- **Modelos desagregados:** en estos modelos lo que interesa es obtener una probabilidad obtenida de manera individual, es decir, desde el punto de vista de cada una de las personas y no de manera grupal.

Algunas de las ventajas que tienen los modelos desagregados de demanda son:

- Hacen un uso más eficiente de la información, porque al utilizar datos de una persona es posible efectuar un análisis con más detalle y variabilidad que cuando se usa información de un grupo.
- Se puede tener acceso a toda la variabilidad inherente a la información correspondiente a muchas personas
- Típicamente existe una menor probabilidad de sesgo por la correlación que suele existir entre unidades agregadas

Se espera que los modelos desagregados de demanda al considerar información más detallada de los individuos, presenten una mejor estabilidad tanto en el tiempo como en el espacio, es decir, si un modelo es estimado en la actualidad y se quiere reaplicar en otro momento futuro, es probable que los resultados obtenidos por el modelo sean aún vigentes, en cambio si se hace con unidades agregadas, es más probable que el uso del modelo ya no sea adecuado en el futuro; asimismo si se transfiere el uso de un modelo de una ciudad a otra que podría ser no tan parecida, al trabajar con datos desagregados se espera que las preferencias individuales y los comportamientos de las personas sean más estables.

Generalmente, al trabajar con modelos desagregados es posible incorporar mayor cantidad de variables de nivel de servicio en la ecuación; en los modelos agregados al trabajar con un Costo generalizado se pueden tomar en cuenta variables como el tiempo de viaje, el tiempo de espera, el tiempo de caminata y el costo o tarifa; en modelos desagregados además de las variables

anteriores se pueden agregar variables latentes como comodidad, seguridad, confiabilidad y es más sencillo agregar variables asociadas al nivel socioeconómico de cada una de las personas.

Al hacer uso de modelos de demanda de transporte desagregados típicamente se trabaja con elecciones de alternativas discretas, puede aplicarse a:

- Modelos de elección del destino de viaje, distribución.
- Modelos de elección del modo de transporte, partición modal.
- Modelos que obtienen la ruta más frecuente que siguen los usuarios, modelos de elección de ruta.

(Raveau, Ortúzar , & Rizzi, 2017)

3.2 Enfoque determinístico en la modelación de las elecciones discretas

La modelación de demanda de transporte se fundamenta en que los flujos de pasajeros en el sistema de transporte son el resultado de elecciones de los pasajeros como pueden ser: el modo de transporte, la ruta, el destino o la hora de salida para efectuar el viaje.

El principio de maximización de la utilidad de los usuarios que eligen conforme a sus preferencias requiere del concepto de *función de utilidad del usuario*, que es una función matemática cuyo valor numérico depende de los atributos de la opción de viaje por considerar y también de las características del individuo que decide. La función de utilidad refleja el manejo de las preferencias del usuario, dado que tiene la propiedad de que su valor numérico para la opción de viaje "a" es mayor que su valor numérico para la opción de viaje "b", por lo tanto, el individuo preferirá la opción "a" sobre la "b", y viceversa, es decir la función de utilidad tendrá un valor mayor evaluada en "b" que evaluada en "a". Entonces la función de utilidad describe las preferencias del individuo que elige una opción de un conjunto finito de alternativas disponibles. La aplicación de la Función de Utilidad requiere definir algunos elementos:

- i. El conjunto de opciones disponibles **A**, que contiene las opciones de viaje "j" conocidas y disponibles para el usuario, (automóvil, taxi, autobús, etcétera). Cada opción "j" del conjunto **A** tiene asociado un conjunto de atributos **X_j** que la determinan (tiempo de viaje, costo, comodidad, etcétera).
- ii. El conjunto de atributos **S** del individuo que hace la elección y que son relevantes para la toma de decisiones: edad, sexo, ingreso anual, posesión de automóvil, etcétera.

Con base en la maximización de la utilidad, se busca una función **U** que depende de los atributos de las alternativas del conjunto **A** y de los atributos **S** del individuo que toma la decisión de viaje, así para cualquier par de opciones "j" y "k" del conjunto **A** se establece la relación:

$$U(X_j, S) > U(X_k, S)$$

Lo cual significa que el usuario prefiere la opción "j" y no la "k", por lo tanto, elegirá "j" si debe escoger entre las dos; en el caso de que el usuario deba elegir entre más opciones dentro del conjunto de alternativas **A**, éste elegirá la opción "j", sólo si se cumple la siguiente relación:

$$U(X_j, S) > U(X_k, S)$$

Para todas las opciones **k** en **A**.

Para que la Función de Utilidad (X_j, S) sea consistente, debe ser la misma para todas las opciones en **A**, obteniendo valores numéricos diferentes para los distintos atributos X_j de las opciones en **A**. Si los valores para dos atributos X_j y X_k resultan ser iguales, habrá indiferencia en la elección de las dos opciones. Por otro lado, para una opción "j" dada, el valor numérico de (X_j, S) debe depender únicamente de los atributos X_j y **S** de la propia opción y del individuo, y no depender de los atributos de otras opciones en **A**.

Normalmente se tienen dos atributos del viaje: el costo y el tiempo de traslado. Una característica básica de los usuarios es su ingreso anual; en el mejor de los casos el usuario desea tener bajo costo y tiempo de viaje corto, pero en la realidad estos dos atributos no suelen coincidir para los modos de transporte. Generalmente, en la expresión matemática que describe a la función de utilidad, el tiempo y el costo tienen asociados signos negativos que indican la inconveniencia de estos atributos. Por otra parte, con respecto al ingreso del usuario se puede deducir que los individuos con mayores ingresos percibirán menos inconveniencia en el costo del viaje.

La evaluación de la función de utilidad permite visualizar la dependencia entre las preferencias y las elecciones de los viajeros con los atributos del viaje mismo y de las características socioeconómicas de los viajeros; también permite hacer pronósticos de las reacciones de los usuarios enfrentados a cambios de los atributos en las opciones de viaje.

Cabe mencionar que el valor numérico que es obtenido mediante la función de utilidad no es relevante para identificar la 'intensidad' con la que los individuos prefieren a una opción en particular. La elección del usuario depende únicamente 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 (Horowitz et al, 1986) citado por (Quintero Moreno, 2011). En consecuencia 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 usuario para esas opciones; cualquier función matemática que represente numéricamente el orden de 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, por lo tanto habría muchas funciones de utilidad que podrían ser usadas para un contexto específico de decisión del usuario.

Para el propósito de la modelación de la demanda de transporte lo que interesa saber es el comportamiento de grupos agregados de usuarios en el sistema de transporte, en este enfoque determinístico, para aprovechar los resultados de la modelación de las elecciones individuales a través de la función de utilidad, lo que debe hacerse es evaluar las preferencias de estos individuos y sumar sus contribuciones en los grupos que sean de interés para la modelación. (Quintero Moreno, 2011)

3.2.1 Problemas que presenta el “enfoque determinístico” en la modelación de las elecciones discretas

La suposición del enfoque determinístico en el cual la modelación asume un comportamiento idéntico de los usuarios cuando se enfrentan a las opciones de viaje y tienen exactamente los mismos atributos y características socioeconómicas, no es del todo real, porque se ha encontrado que al observar el comportamiento de dos viajeros identificados con los mismos atributos de viaje, clasificados con las mismas características socioeconómicas y enfrentados a una decisión ante un mismo conjunto de opciones, éstos eligen de modo diferente, incluso un mismo individuo enfrentado a lo antes mencionado respecto de las opciones de viaje, pero en diferentes ocasiones, elige de manera distinta. Algunas razones para explicar estos sucesos son:

- i. Que individuos idénticos aparentemente, con características socioeconómicas y enfrentados a los mismos atributos de las opciones de viaje, tienen gustos diferentes o tienen una percepción diferente de los atributos.
- ii. Que el modelo de las opciones de viaje construido no tenga toda la información necesaria de las opciones de viaje.
- iii. Que el modelo desconozca la totalidad de las características socioeconómicas de los viajeros, que sean relevantes para la elección.

Kanafani (1983) citado por (Quintero Moreno, 2011) establece otras tres razones básicas para explicar por qué los usuarios pueden mostrar variaciones en sus elecciones que podrían parecer contradictorias:

- Los usuarios que realizan las elecciones de viaje no siempre siguen reglas de decisión racionales, adicionalmente su idiosincrasia y creencias no pueden conocerse detalladamente en un modelo determinista de elecciones
- El modelador tratando de pronosticar las elecciones de los usuarios, no puede incluir en la función de utilidad la totalidad de factores que podrían influir en la decisión del usuario. Y aun cuando esto se pudiera efectuar, resultaría una función muy complicada que no sería de uso práctico.
- Difícilmente los individuos que toman las decisiones de viaje podrían tener información perfecta sobre el sistema de transporte y las opciones disponibles.

En cuanto a la información utilizada para construir modelos de elección basados en el principio de maximización de la utilidad, Horowitz et al (1986) citado por (Quintero Moreno, 2011) reconoce cinco limitaciones:

- 1) La omisión de variables relevantes para la modelación de la utilidad. Si en los modelos de utilidad no se incluyen todas las variables importantes para explicar las preferencias del viajero, el modelo desarrollado puede resultar no adecuado.
- 2) Errores de medición de los atributos de viaje. Surgen si la información que constituye el modelo de utilidad no es lo suficientemente precisa.
- 3) Variables proxy. Son datos que por sí mismos no serían de interés para la modelación, sin embargo, dada una considerable correlación con alguna variable que, si es de interés y que no puede medirse directamente, se usa como referencia en la modelación.
- 4) Diferencias relevantes entre los viajeros. La diferenciación socioeconómica de los viajeros en los modelos de utilidad es posible de obtener fácilmente, sin embargo, existen otras diferenciaciones relevantes que son difíciles de medir entre los viajeros.
- 5) Variaciones diarias 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 las actividades cotidianas de los individuos, pero en la vida real se suelen presentar situaciones donde los usuarios deben alterar sus preferencias y por lo tanto también sus elecciones de viaje.

Con base en todo lo mencionado, los modelos de elección deterministas no pueden pronosticar adecuadamente cuando se presentan limitaciones que contribuyen a la aparición de variaciones en la elecciones que los viajeros hacen de sus opciones de viaje, en consecuencia, la modelación de las elecciones se extiende hacia un contexto de probabilidad, en el cual es posible manejar la falta de información precisa para describir por completo atributos de las opciones y características socioeconómicas de los usuarios. (Quintero Moreno, 2011).

3.3 Enfoque probabilístico en la modelación de las elecciones discretas

Los modelos de utilidad aleatoria describen las preferencias de los viajeros en términos de probabilidad, en consecuencia, no pronostican la opción elegida por el usuario, sino que calcula las probabilidades de elegir cada una de las opciones. La forma básica de un modelo de utilidad probabilística U es la siguiente:

$$U = V + e$$

Donde:

- V** = parte de utilidad determinista, también llamada sistemática, calculada con los atributos de las opciones para elegir y las características de los viajeros
- e** = término de error que representa una variable aleatoria que cuenta para las diferencias observadas en el modelo determinista.

Las cuatro características básicas para que un modelo de elección probabilístico sea adecuado para efectuar pronósticos de las elecciones de los usuarios son:

- i. La probabilidad de elegir una opción debe depender de las componentes deterministas de utilidad de todas las opciones disponibles para el usuario. Así que la opción por elegir es la de mayor utilidad total y depende de los valores relativos de utilidades totales en todas las opciones.
- ii. La probabilidad de que una opción sea elegida debe aumentar si su componente determinista de utilidad aumenta, y disminuir cuando la componente determinista de cualquier otra opción distinta aumenta.
- iii. El modelo de utilidad aleatoria debe manejar conjuntos de opciones de cualquier número de alternativas, y debe poder aplicarse al caso en el cual se aumentan o reducen opciones o alternativas.
- iv. El modelo debe ser de fácil comprensión y uso en la práctica, para ser difundido entre posibles interesados en la planificación del transporte.

Adicionalmente algunas propiedades importantes de los modelos probabilistas son las siguientes (Ortúzar y Willumsen, 1994) citado por (Quintero Moreno, 2011):

- Hacen un uso más eficiente de la información, porque al utilizar datos de una persona es posible efectuar un análisis con más detalle y variabilidad que cuando se usa información de un grupo.

- Se puede tener acceso a toda la variabilidad inherente a la información correspondiente a muchas personas
- Un modelo de utilidad aleatoria puede contener varias variables explicativas, para cada una de las cuales se estimarán coeficientes. Además, ofrece la oportunidad de calcular utilidades marginales de los atributos representados en las variables, que es útil para conocer su importancia relativa y en algunos casos la tasa de sustitución de un atributo por otro, como el valor de tiempo del usuario.
- Con base en que estos modelos obtienen probabilidades de elección de las opciones, es posible estimar situaciones específicas como el porcentaje esperado de viajeros que usarán cierta alternativa, sumando las probabilidades de su elección en el conjunto de usuarios.

3.4 Teoría de la utilidad aleatoria

En la Teoría de la Utilidad Aleatoria se hacen los siguientes supuestos:

- Los individuos tienen información completa, es decir perfecta, acerca de todas sus alternativas disponibles.
- Los individuos son seres racionales, por lo tanto, eligen siempre la mejor alternativa, esto es, construyen de forma compensatoria una cifra única de mérito que se llamará Utilidad. La utilidad de una alternativa tiene signo contrario al costo generalizado pues en este caso es una utilidad y dependerá de una serie de elementos que conforman los atributos de una alternativa como pueden ser tiempo de viaje, tiempo de espera, tiempo de caminata, costo del viaje y pueden agregarse variables como comodidad, seguridad, confiabilidad y variables que expresan las características socioeconómicas de los individuos tales como ingreso, tasa de motorización, edad y sexo.
- Con base en los atributos del punto anterior, los individuos construyen una utilidad y la prioridad es maximizar la utilidad para decidir cuál es la alternativa que eligen.
- Los individuos actúan de forma determinística cuando eligen de entre un conjunto de opciones que pueden tener disponibles.

Por otro lado, desde el punto de vista del modelador, quien tiene la labor de observar el sistema, no tiene información perfecta ni completa de lo que todos los individuos consideran al efectuar su elección, de esta manera, el modelador tiene presente que, en ocasiones, los individuos eligen lo que no parece lógico pero que puede ser observado fácilmente, así entonces postula que existe una utilidad:

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

Donde:

U_{iq} = utilidad aleatoria de la alternativa i para el individuo q que está compuesta de dos términos:

V_{iq} = utilidad sistemática, representativa o determinística, conformada por todos aquellos atributos que el modelador tiene acceso a observar, y

ε_{iq} = es una componente de error que ayuda a explicar ciertas situaciones extraordinarias que los individuos pueden cambiar en sus maneras de viajar; por ejemplo, el caso de un usuario que podría usar metro, pero por fobia a los túneles, éste hace uso de auto privado.

Como consecuencias de que los individuos escojan la alternativa que maximiza su utilidad, es que para todas las alternativas que están disponibles para el individuo, llamado conjunto $A(q)$ se debe de cumplir que la utilidad de la alternativa i que es la elegida, es mayor o igual a la utilidad de todas las alternativas restantes que tenía disponibles.

$$U_{iq} \geq U_{jq} \quad \forall j \in A(q)$$

Y desde el punto de vista del modelador:

$$\begin{aligned} V_{iq} + \varepsilon_{iq} &\geq V_{jq} + \varepsilon_{jq} & \forall j \in A(q) \\ \varepsilon_{iq} - \varepsilon_{jq} &\geq V_{jq} - V_{iq} & \forall j \in A(q) \end{aligned}$$

El problema reside en que los errores son elementos aleatorios, errores que tienen una cierta distribución de probabilidad cuyo valor es desconocido, por lo tanto, no existe certeza de que la expresión pueda ocurrir. Por tal motivo estos modelos son probabilísticos.

Lo único que puede ser planteado es la probabilidad de que el individuo q escoja la alternativa i , como:

$$P_{iq} = Pr \{ \varepsilon_{iq} - \varepsilon_{jq} \geq V_{jq} - V_{iq} \quad \forall j \in A(q) \}$$

Lo que dependerá de la distribución de probabilidad de las componentes de error ε_{iq} ; Si se conoce una función de probabilidad conjunta para los ε_{iq} :

$$P_{iq} = Pr \{ \varepsilon_{iq} - \varepsilon_{jq} \geq V_{jq} - V_{iq} \quad \forall j \in A(q) \}$$

Y se puede expresar como un conjunto de integrales que dicen que para ε_{iq} la variabilidad esta entre $-\infty$ a ∞ y para cada uno de los ε_{jq} la variabilidad estará entre $-\infty$ y el valor $\varepsilon_{iq} + V_{iq} - V_{jq}$:

$$P_{iq} = \int_{\varepsilon_{iq}=-\infty}^{\infty} \int_{\varepsilon_{1q}=-\infty}^{\varepsilon_{iq} + V_{iq} - V_{1q}} \int_{\varepsilon_{2q}=-\infty}^{\varepsilon_{iq} + V_{iq} - V_{2q}} \dots \int_{\varepsilon_{nq}=-\infty}^{\varepsilon_{iq} + V_{iq} - V_{nq}} f(\varepsilon_{iq}, \varepsilon_{1q}, \varepsilon_{2q}, \dots, \varepsilon_{nq}) d\varepsilon$$

En la cual $f(\varepsilon_{iq}, \varepsilon_{1q}, \varepsilon_{2q}, \dots, \varepsilon_{nq})$ es la función de probabilidad conjunta, la cual debe ser especificada si se quiere traspasar de la complicada integral múltiple a una expresión más sintética y sencilla de resolver. (Raveau, Ortúzar , & Rizzi, 2017)

3.5 Introducción al modelo Logit Multinomial

La probabilidad de que el individuo q escoja la alternativa i , puede ser planteada como:

$$P_{iq} = Pr \{ \varepsilon_{iq} - \varepsilon_{jq} \geq V_{jq} - V_{iq} \quad \forall j \in A(q) \}$$

Si se supone una distribución de probabilidad como la Distribución Gumbel (conocida también como valor extremo tipo 1), está sujeta a dos parámetros:

- La moda (η)
- Factor de escala ($\lambda > 0$)

Y la media de la función de distribución Gumbel está dada por la expresión:

$$m = \eta + \frac{\gamma}{\lambda}$$

En la que γ es la constante de Euler ($\sim 0,577$)

Si se grafica la función de distribución Gumbel y se superpone para hacer una comparación con la distribución normal, se puede observar que ambas resultan ser parecidas, aunque la distribución Gumbel aparece un poco desfasada hacia el lado izquierdo.

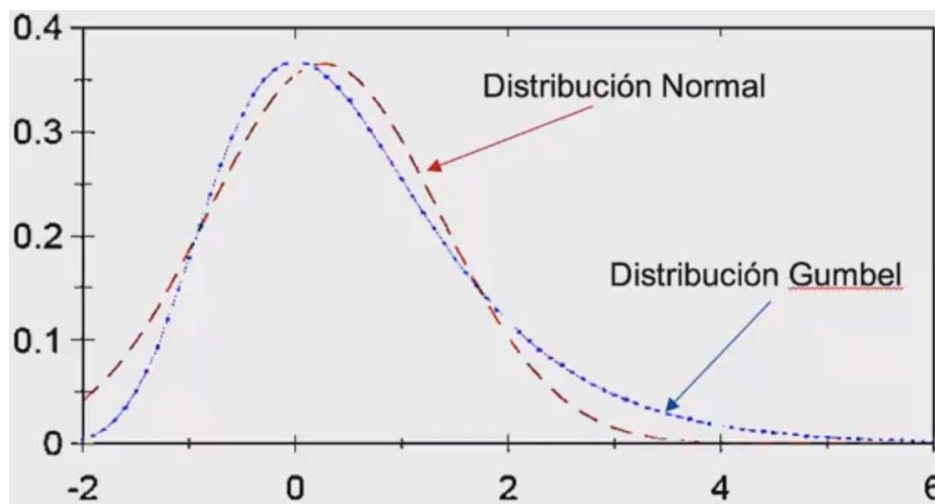


Fig. 13 Gráficas de las distribuciones normal y Gumbel, Fuente: (Raveau, Ortúzar & Rizzi, 2017)

Si se considera que estas distribuciones sean independientes e idénticamente distribuidas se puede llegar al Modelo Logit, es decir:

Si ε_{iq} distribuye Gumbel de manera IID, con media 0 y varianza σ^2 se tiene un Modelo Logit:

$$\varepsilon \sim iid \text{ Gumbel} \left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \Sigma = \begin{pmatrix} \sigma^2 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & \sigma^2 & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & \sigma^2 \end{pmatrix} \right)$$

Si una distribución es IID (independiente e idénticamente distribuida) significa que en la matriz de la derecha (matriz de covarianza de la función de distribución Gumbel) existen ceros fuera de la diagonal principal lo que quiere decir que es independiente, es decir no hay dependencia o correlación entre las distintas alternativas y en la diagonal principal todas las varianzas σ^2 son las mismas, no hay heteroscedasticidad (variabilidad de la varianza), es decir es un modelo independiente e idénticamente distribuido, idénticamente significa que todas las varianzas y por tanto todas las desviaciones estándar son las mismas para todas las utilidades.

Cabe mencionar que se hace la suposición de que la distribución de los errores tiene media 0; en general todos los modelos suponen que la media de los errores es igual a un valor 0. Si se aplica esta distribución Gumbel IID a la expresión para el cálculo de la probabilidad P_{iq} se llega al modelo Logit:

Probabilidad de elegir la alternativa i:
$$\frac{\exp(\lambda \cdot V_{iq})}{\sum_{j \in A(q)} \exp(\lambda \cdot V_{jq})}$$

La forma de este modelo Logit, en lugar de ser una expresión complicada con una integral múltiple muy compleja, se expresa de manera más sencilla y es la razón entre la exponencial de λ por la utilidad determinística o representativa, entre la sumatoria de todas las alternativas que están disponibles en el conjunto de elecciones $A(q)$ de la misma expresión, exponencial de $\lambda \cdot V_{jq}$

La expresión resulta ser algo sencilla, es posible resolverla y se puede implementar en una hoja de cálculo, es por esto que el modelo ha tenido gran importancia práctica y uso durante décadas. λ Es el factor de escala y es inversamente proporcional a la desviación estándar desconocida de la distribución a partir de la expresión:

$$\lambda = \frac{\pi}{\sqrt{6}\sigma}$$

Por lo tanto, tener a λ implica de alguna forma a las utilidades representativas V divididas entre la desconocida desviación estándar, pero esto trae consigo problemas de identificabilidad.

La probabilidad de elegir una alternativa en una elección logit binaria, o sea entre dos alternativas se podría graficar como sigue:

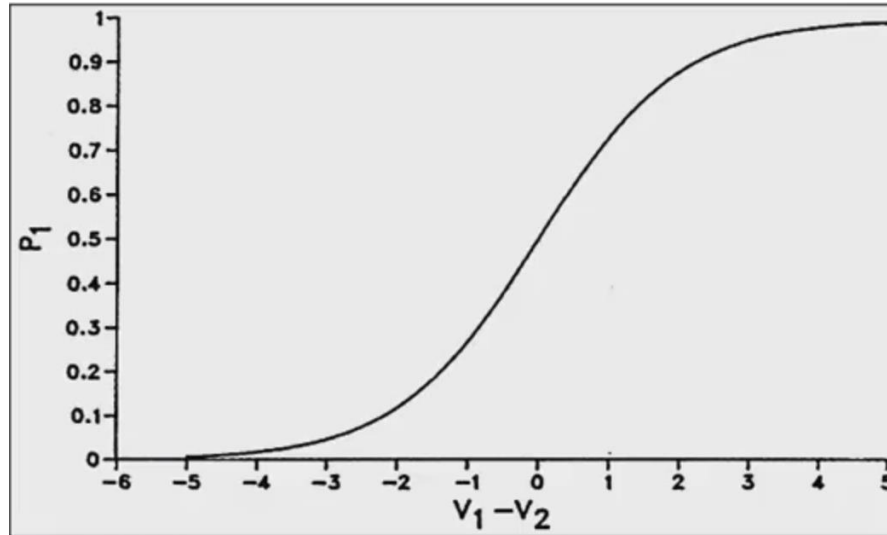


Fig. 14 Comportamiento de la función Logit Binomial para obtener las probabilidades de elección entre dos alternativas, Fuente: Coursera en línea “Introducción a los Modelos de Demanda” Universidad Católica de Chile, (Raveau, Ortúzar & Rizzi, 2017)

La curva tiene forma de S, es asíntota en 0 hacia la izquierda y asíntota en 1 hacia la derecha, y si V_1 es igual a V_2 en el punto 0 se obtiene una probabilidad de 0.5 Esta función no es fácil de graficar cuando existen más de dos alternativas en el conjunto de elecciones. (Raveau, Ortúzar, & Rizzi, 2017).

3.6 Características del Modelo Logit Multinomial

La fórmula que entrega la probabilidad de los modelos Logit es:

$$P(i) = \frac{\exp(\lambda \cdot V_{iq})}{\sum_{j \in A(q)} \exp(\lambda \cdot V_{jq})}$$

Esta probabilidad depende del factor de escala y de la utilidad sistemática. Cuando se estima un modelo Logit de elección discreta lo que se estima es el producto del factor de escala por la utilidad sistemática.

Como existen infinitas combinaciones del factor λ y la utilidad sistemática V_{iq} que arrojan el mismo valor, no es posible identificar ambos. Por lo tanto, la convención que se debe adoptar es suponer que el valor que corresponde al factor de escala λ es igual a 1.

Con respecto a la utilidad sistemática V_{iq} ésta dependerá de los atributos que corresponden a cada una de las alternativas disponibles X y por otro lado a las características de las personas Z , la siguiente es una función de utilidad sistemática

$$V_{iq} = \sum_k \theta_{ik} \cdot X_{ikq} + \sum_r \theta_{ir} \cdot Z_{rq}$$

Donde una parte de utilidad responde a las características del bien que el consumidor quiere elegir y otra parte corresponde a características del propio consumidor. Las variables que comúnmente son más utilizadas en las funciones de utilidad sistemática son, desde el punto de vista de las variables que caracterizan a las alternativas del transporte, se suelen considerar variables comunes como:

- Tiempo de viaje, tiempo de espera, tiempo de acceso, tiempo de caminata
- Los costos de viaje, se puede considerar alguna otra variable como el confort
- Ingreso, sexo, años de educación, desde el punto de vista de las variables que caracterizan a las personas

Las variables explicativas que entran en la función de utilidad sistemática pueden ser de dos tipos:

- Genéricas: comparten el mismo coeficiente en todas las alternativas
- Específicas: aparecen solamente en una alternativa o puede ser una misma variable pero que tiene un coeficiente diferente en cada una de las alternativas

Se pueden incluir también constantes modales para cada alternativa de transporte, es importante establecer que una de las constantes tiene que ser igual a 0. (Raveau, Ortúzar , & Rizzi, 2017)

3.7 Propiedades del modelo Logit Multinomial

Sea la función de utilidad:

$$V_j = \theta_j + \theta_t t_j + \theta_c C_j$$

Dónde: t = Tiempo de viaje, C = Costo

La utilidad sistemática de la alternativa j es igual a una constante específica más el tiempo de viaje multiplicado por el coeficiente del tiempo de viaje más el costo del viaje multiplicado por el coeficiente del costo de viaje.

La Tasa Marginal de Sustitución entre costo y tiempo de viaje es:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\frac{\partial V}{\partial t}}{\frac{\partial V}{\partial C}} = \frac{\theta_t}{\theta_C}$$

Se deriva la función de utilidad sistemática respecto del tiempo de viaje y se deriva también con respecto al costo de viaje y se efectúa el cociente entre la primera derivada y la segunda derivada, en este caso particular, dado que la función de utilidad sistemática es lineal en el tiempo de viaje, y es lineal en el costo de viaje, resulta un cociente del coeficiente que acompaña el tiempo de viaje entre el coeficiente que acompaña el costo de viaje, en otras palabras, la tasa marginal de sustitución entre costo y tiempo de viaje es igual a $\frac{\theta_t}{\theta_C}$.

La tasa marginal de sustitución entre costo y tiempo de viaje entrega el Valor Subjetivo de los ahorros de tiempo de viaje o simplemente el 'Valor del Tiempo de Viaje'.

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\frac{\partial V}{\partial t}}{\frac{\partial V}{\partial C}} = \frac{\theta_t}{\theta_C}$$

Este concepto es muy relevante en modelación, pues significa cuánto están dispuestos los usuarios de transporte a pagar, por reducir su tiempo de viaje en un minuto. Algunas propiedades sobresalientes del modelo Logit son:

- Es estimado mediante una muestra aleatoria.
- Considera una constante específica para cada alternativa disponible (excepto para una alternativa de referencia para la cual la constante se hace 0), entonces reproduce la proporción de mercado que corresponde a cada alternativa.

El modelo Logit es sencillo y poderoso a la vez, permite:

- Predecir comportamiento ante cambios en el sistema de transporte
- Determina "el valor del tiempo" que es un parámetro clave en la evaluación social de proyectos de transporte

No obstante, el modelo Logit tiene limitaciones, dos de las limitaciones más relevantes son:

- No permite correlación entre alternativas
- No permite tratar la variabilidad en los gustos

(Raveau, Ortúzar , & Rizzi, 2017)

3.8 El modelo Logit Binomial

El modelo Logit binomial o binario tiene en cuenta sólo dos opciones o alternativas de elección, por lo cual es considerado el caso particular más simple del Modelo Logit Multinomial. Si se consideran las componentes sistemáticas de la utilidad para las dos opciones mencionadas como V_1 y V_2 , el modelo más general para determinar la probabilidad de que la opción **1** sea elegida es:

$$P(1) = \frac{1}{1 + e^{-\beta(V_1 - V_2)}}$$

En la cual β es un parámetro de calibración para el modelo. Gráficamente se puede emplear la siguiente figura para mostrar los valores de la diferencia correspondiente a $V_1 - V_2$, cambiando algunos valores para el parámetro β

De esta manera si la diferencia $V_1 - V_2 = 0$ la utilidad para ambas opciones (1 y 2) resulta ser la misma, es decir toma un valor de 0.5 equivalente al 50 %; considerando que la diferencia $V_1 - V_2$ toma valores positivos cada vez mayores entonces la probabilidad para la opción 1 tiende a acercarse a 1 o 100% lo que indica su mayor preferencia respecto de la opción 2 y viceversa, si la diferencia $V_1 - V_2$ toma valores cada vez más negativos, la probabilidad de elegir la opción 1 disminuye y se aproxima o tiende a valor 0.

El modelo Logit Binomial pronostica mayor probabilidad de elegir la opción 1 cuando ésta mejora su utilidad o si la opción 2 disminuye la suya. Lo cual concuerda con la suposición de que los usuarios buscan maximizar sus utilidades. (Quintero Moreno, 2011)

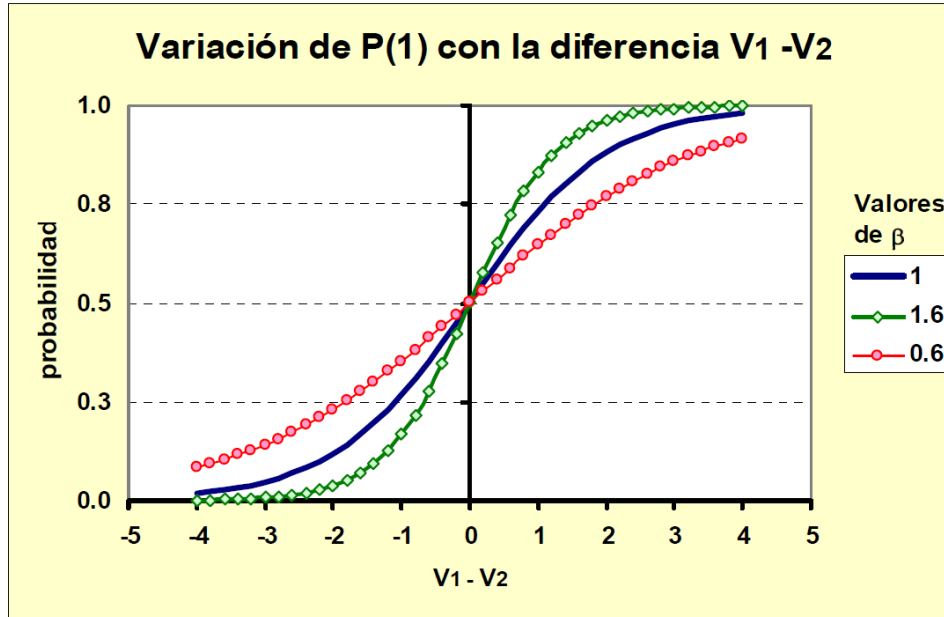


Fig. 15 Comportamiento de la función Logit Binomial para obtener las probabilidades de elección entre dos alternativas, variando el valor de B. Fuente: “Modelos de elección discreta en la estimación de la demanda de transporte” (IMT, 2011)

3.9 Contexto estadístico de los modelos de respuesta binaria

Una regresión es una función o curva que se ajuste lo mejor posible a los datos basados en una muestra, con el fin de poder estimar situaciones que aún no han sido observadas. El modelo de regresión se construye para predecir el valor medio de una variable aleatoria de interés, (en el campo de Transporte podrían ser los kilómetros que viaja el usuario) cuando se conocen los valores de otras variables definidas como explicativas como el costo de viaje, el tiempo de viaje, el ingreso del usuario, el número de transbordos, entre otros.

Los modelos de respuesta binaria consideran una variable respuesta Y dicotómica, es decir, que puede tomar dos valores:

$Y = 1$, el caso de interés

$Y = 0$, al caso contrario

Una variable Y , con estos atributos, tendría una distribución de Bernoulli de esperanza

$$E[Y] = P[Y = 1] = p \quad \text{Donde } p \in (0,1)$$

Al considerar una variable explicativa X , la cual se asume que servirá para predecir el resultado de la variable Y con mayor exactitud, la distribución de la variable respuesta Y también sigue una distribución de Bernoulli con esperanza:

$$E\{Y|X = x\} = P\{Y = 1|X = x\} = p(x)$$

Y varianza

$$\text{Var}\{Y|X = x\} = p(x)(1 - p(x))$$

En este caso se llega a la dependencia de la variable respuesta respecto de la variable explicativa. En consecuencia a lo anterior, se busca un modelo de la forma:

$$Y(x) = F(\alpha + \beta x) + \epsilon(x)$$

Donde $\epsilon(x)$ sean variables aleatorias independientes de esperanza nula y α y $\beta \in \mathbb{R}$ parámetros. Lo que se puede expresar también como:

$$p(x) = F(\alpha + \beta x)$$

Donde F es una función de distribución estrictamente creciente que a su vez puede ser expresada de la siguiente forma:

$$F^{-1}(p(x)) = \alpha + \beta x$$

3.9.1 Problemas en los modelos de probabilidad lineal

En la aplicación práctica del modelo planteado anteriormente, suelen existir ambigüedades e inconsistencia. Así, suponiendo el caso para una variable aleatoria respuesta Y en términos de una variable explicativa aleatoria X , el modelo a considerar según lo descrito sería:

$$Y(x) = \alpha + \beta x + \epsilon(x)$$

Donde los errores son variables aleatorias no observables, independientes, con esperanza cero y con distribución de Bernoulli con los valores siguientes:

$$\begin{aligned} (1 - (\alpha + \beta x)) \text{ Si } & Y = 1 \text{ con probabilidad } p(x) \\ -(\alpha + \beta x) \text{ Si } & Y = 0 \text{ con probabilidad } (1 - p(x)) \end{aligned}$$

Dado que $\epsilon(x)$ tiene esperanza nula, se tiene:

$$E[\epsilon(x)] = p(x) - (\alpha + \beta x) = 0$$

En consecuencia, se tiene un modelo de regresión lineal con la forma:

$$E\{Y|X = x\} = p(x) = \alpha + \beta x$$

El cual es llamado Modelo de Probabilidad Lineal, sin embargo, el hecho de que una probabilidad dependa de una variable que no está acotada, presenta un conflicto con su definición. Los problemas principales son los siguientes:

- i. En cualquier situación, las probabilidades siempre toman cualquier valor comprendido entre 0 y 1, sin embargo, en el modelo de probabilidad lineal, según el valor de la variable X y de los parámetros que la acompañan, se obtiene un rango mucho más amplio de valores posibles. Por lo tanto, el modelo será efectivo tan sólo sobre un conjunto de valores acotados.
- ii. No se cumple la condición de homocedasticidad, porque la varianza de la variable respuesta no es constante sobre los valores observados de la variable explicativa
- iii. Dado que Y no tiene distribución normal, no es posible utilizar las distribuciones muestrales de los estimadores de mínimos cuadrados ordinarios para hacer inferencia sobre el modelo
- iv. El modelo lineal implica variaciones iguales de la probabilidad de respuesta frente a variaciones iguales de la variable explicativa; por lo tanto, carece de realismo, porque los cambios producidos en X deberían tener menos impacto sobre p cuando la probabilidad de respuesta esté próxima a cero o a uno, que cuando esté próxima a 0.5

Con base en las dificultades numeradas, se plantea ajustar un modelo no lineal que implique una relación entre x y $p(x)$, que sea curvilínea, monótona y acotada entre cero y uno. En los modelos de regresión logística las funciones logaritmo y exponencial eliminan los problemas que ocasiona un modelo lineal.

El modelo Logit resuelve las limitaciones del modelo de regresión lineal, acotando la probabilidad de respuesta entre 0 y 1, y asigna probabilidad de 0.5 cuando la diferencia entre utilidades sistemáticas $V_i - V_j = 0$, lo cual refleja la situación en la que al usuario le es indiferente elegir entre una opción u otra, en un caso binario. (Quintero Moreno, 2011)

3.10 Introducción de una nueva alternativa

La planeación de los sistemas de transporte tiene como punto de interés la estimación de las elecciones de los usuarios cuando se introduce una nueva opción de transporte o servicio. Los datos de preferencias reveladas, como se ha mencionado anteriormente, se basan en la observación directa de las acciones de los individuos, y en consecuencia están limitados frente a la situación de una nueva opción que no ha sido observada previamente.

El Modelo Logit permite pronosticar las respuestas de los usuarios ante la puesta en servicio de una opción nueva de transporte, si es que existe la información de las utilidades estimadas de los atributos del nuevo servicio. En la práctica es posible encontrar los porcentajes de las reparticiones en cada opción de transporte, con base en las probabilidades obtenidas mediante el modelo logit.

3.10.1 Las constantes específicas de las alternativas

El modelo Logit obtendrá la misma probabilidad de elección por el usuario, cuando las dos opciones tengan exactamente los mismos valores de utilidad en sus componentes sistemáticas (determinísticas), aunque en la realidad si dos alternativas coinciden en atributos, no significa que sean iguales, ya que factores como seguridad, confortabilidad, vista escénica, etcétera podrían afectar la decisión del usuario, incluso si los atributos principales como ejemplo, tiempo y costo son los mismos.

Resulta lógico que si se desea hacer una diferenciación entre las dos alternativas que coinciden en atributos básicos, se tendría que incluir en la función de utilidad otras variables que representen los atributos que hacen la diferencia, la seguridad, confortabilidad u otras, lo que sería difícil de medir en la práctica. En consecuencia, esta diferenciación se puede efectuar con la adición de un término constante a las componentes sistemáticas de utilidad de las alternativas, estos términos son conocidos como Constantes Específicas de las alternativas.

Cabe señalar que, en la práctica, es conveniente normalizar estas constantes específicas a una sola, asignada a una de las opciones la cual se etiquetará como alternativa base. La adición de constantes específicas a las opciones refina el Modelo Logit y permite una aproximación más realista de las probabilidades de elección del usuario. El signo de las constantes específicas de alternativas y sus valores numéricos indican la presencia de otros factores además del costo y el tiempo que pueden favorecer la elección de la opción. Cuando es operado el modelo Logit incluyendo las constantes específicas en las funciones de utilidad de las opciones, las probabilidades de las opciones son muy distintas que cuando no se agregan. Horowitz et al (1986) establecen que la adición de las constantes específicas para las alternativas tiene el efecto de mejorar la estimación del modelo Logit.

3.11 Determinación de las variables del modelo

La identificación de las variables explicativas que deben incluirse en un modelo Logit de elección discreta, es una tarea básica para que éste sea realista y consistente respecto del planteamiento teórico de la situación de transporte a modelar y las políticas que pueden ser aplicadas en ese

contexto. No es posible establecer una lista universal de variables explicativas que deban estar siempre contenidas en todos los modelos de elección discreta. Según sea el objetivo del modelo, dependerá la selección de variables explicativas adecuadas. En la práctica dicha selección suele basarse en la experiencia y visión del modelador que tiene conocimiento del sistema de transporte analizado, aunque la pertinencia de dichas variables se verifica mediante pruebas estadísticas, de confiabilidad y significación.

Según Horowitz et al (1986) citado por (Quintero Moreno, 2011) en los modelos se debería hacer uso de tres tipos de variables:

1) *Variables de política de transporte.* Variables que deben incluirse en modelos para pronosticar la aplicación de políticas o medidas de control y desempeño de los sistemas de transporte, los pronósticos serán de utilidad si el modelo incluye variables explicativas relacionadas con estas políticas, como podrían ser:

- Elección de modo ante un incremento en la tarifa en el transporte público, o si se implementará una nueva opción más rápida o más ecológica.
- Tarifas de los autobuses
- Tiempos de recorrido y frecuencias de un tren ligero
- Puntualidad de servicio de tranvía (medida como porcentaje de llegadas puntuales a la terminal)

2) *Variables socioeconómicas.* Describen características de los usuarios o de grupos de interés. Variables que son útiles para distinguir los efectos de políticas aplicadas al sistema de transporte, en los distintos segmentos de usuarios. Este tipo de variables corresponden a características de los usuarios mediante atributos incluidos en la función de utilidad. Algunas variables típicas de este tipo son:

- Ingreso promedio anual de los distintos segmentos de usuarios
- Numero de automóviles poseídos
- Edad y sexo de los usuarios

3) Variables que influyen en la elección de las opciones de transporte y que están relacionadas tanto con las variables de política de transporte como de las socioeconómicas, al excluir este tipo de variables se podrían obtener pronósticos equivocados. También sugieren que en las funciones de utilidad de las opciones se incluyan siempre constantes específicas para cada una de ellas, menos aquella que se toma como opción base. Mencionando una variable de este tipo, la posesión de auto es un ejemplo, ya que si en un modelo de elección donde se

incluyen el tiempo y el costo del viaje (variables de política) e ingreso anual del usuario (variable socioeconómica), debido a que existe una fuerte correlación con esta última, omitir la variable posesión de automóvil podría ser una razón de pronósticos equivocados del modelo.

3.12 Definición del conjunto de opciones disponibles

Cuando ya se han identificado las variables adecuadas para usarlas en un modelo de elección discreta, el siguiente proceso es la definición del conjunto de opciones disponibles para la decisión del usuario. El conjunto de opciones será útil para la modelación de elecciones discretas de los usuarios si se cumple lo siguiente:

- I. Que las alternativas sean mutuamente exclusivas para el usuario, en este caso si para llegar de un lugar a otro se usan más de un modo de transporte, para que las opciones sean mutuamente excluyentes, se podría definir una opción compuesta por más de una alternativa.
- II. Que el conjunto de opciones sea exhaustivo. En el caso en el que ninguna de las alternativas es opción para el usuario, se puede definir la opción 'ninguna de las anteriores'
- III. Que el número de opciones sea finito y manejable (Train 2009) citado por (Quintero Moreno, 2011)

Es pertinente mencionar que, en la práctica, en la modelación de elecciones de las opciones de viaje, si se eliminan las opciones que no son tan usadas y en cambio se usan sólo aquellas que tienen una mayor probabilidad de ser escogidas y mayor valor práctico, los resultados obtenidos siguen siendo adecuados. Sin embargo, para la descripción más precisa del conjunto de opciones, se recurre a usar reglas de generación de opciones que permiten excluir con más seguridad algunas de las alternativas, de manera que no se incurra en errores considerables. Algunos puntos importantes son:

- Los datos que se puedan obtener de los usuarios que eligen, ayudan a esclarecer si se considera la opción o no para incluirla en el conjunto de opciones.
- No se tiene un método exclusivo para la determinación del conjunto de opciones para un modelo de elecciones discretas
- La decisión de incluir o no incluir a una opción dada, cambia las evaluaciones de la probabilidad de elegir a las demás opciones, por la propiedad de IAI (independencia de alternativas irrelevantes), se mantiene una proporción entre las probabilidades obtenidas de la elección de las opciones disponibles.

3.13 Estimación de los parámetros de la función de utilidad

Para la modelación de las elecciones de viaje, como ya se ha mencionado anteriormente, se debe proponer una forma de la Función de Utilidad y por otro lado definir un procedimiento adecuado para estimar los valores numéricos de los coeficientes asociados a las variables que se hayan incluido en la fórmula. Es de importancia señalar que, en la práctica, el modelador de un sistema de elecciones de transporte no conoce la estructura o forma específica que tienen las funciones de utilidad asociadas a las distintas opciones.

Los modelos de elección discreta tienen una variable de respuesta que toma tanto valores numéricos 0,1,2... como también valores definidos por una respuesta positiva asociada a un "sí" o negativa denotada con un "no". En el campo del transporte algunas variables respuesta que interesan conocer para la modelación y que definen a la variable dependiente Y son:

Tabla 4 Variables respuesta que pueden ser de interés para la modelación de elecciones discretas. Fuente: "Métodos de elección discreta en la estimación de la demanda de transporte" (IMT, 2011)

Variable respuesta	Y
No. de viajes por semana	0, 1, 2, 3,...
Modo de transporte usado para ir a trabajar	0= no 1=sí
Opinión sobre calidad del servicio	0=muy mala 1=mala 2=regular 3= buena 4=muy buena
Motivo del viaje	1=trabajo 2=estudios 3=compras 4=razón medica

Dado que con base en estos ejemplos de variables respuesta, es difícil hacer análisis estadísticos porque sus valores son etiquetas, especificaciones de rangos y no valores numéricos, en consecuencia, establecer un esquema de regresión claro es complicado, sin embargo, al emplear el marco de referencia de la regresión para construir un modelo de elección en términos de las probabilidades de que esos rangos y etiquetas mencionados puedan ocurrir, se evaluaría:

$$P[\text{evento "k" ocurra}] = P[Y = k]$$

Para el caso específico de un modelo binario, la variable respuesta puede ser $Y=0$ ó $Y=1$, y se supone que la utilidad de las elecciones es una función lineal de los atributos:

$$V = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k$$

La probabilidad en el modelo Logit sería:

$$P[Y = 1] = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k}}$$

La estimación de los parámetros β_k del modelo Logit, no es posible mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios, específicamente por la condición de varianza no constante (heterocedasticidad), en la práctica se usa el Método de Máxima Verosimilitud. (Quintero Moreno, 2011)

3.14 El método de la máxima verosimilitud

El método de la máxima verosimilitud para la estimación de los parámetros de un modelo Logit utilizando los datos de una muestra de la población estudiada, básicamente consiste en encontrar los valores numéricos de los parámetros β_k que hacen que, bajo el modelo propuesto, la probabilidad de observar los valores obtenidos en la muestra sea máxima. Los estimadores del método de máxima verosimilitud son el conjunto de parámetros que generan más frecuentemente la muestra observada.

En diferentes palabras, el método de la máxima verosimilitud se basa en la idea de que, aunque se puede obtener la muestra de varias poblaciones, una muestra específica tiene una probabilidad más alta de haber sido obtenida de una cierta población que el resto.

Para entender el método, se supone un modelo en el cual sólo se debe estimar un solo parámetro β que caracteriza a la población, y se tiene una muestra de n observaciones independientes de una determinada variable x_1, x_2, \dots, x_n sobre las elecciones de los usuarios del sistema de transporte a estudiar. La función de densidad de probabilidad depende en general de los valores x_k de la muestra y también del parámetro β . Esta función de densidad de probabilidad se denota como: $f(x_1, x_2, \dots, x_n; \beta)$ en la cual los valores x_k de la muestra son fijos, por lo tanto, la densidad de probabilidad f dependerá del valor de β .

Con base en que los valores de las n observaciones muestrales se obtuvieron independientemente, la densidad de probabilidad conjunta de la muestra sería como sigue:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n; \beta) = f(x_1; \beta) * f(x_2; \beta) * \dots * f(x_n; \beta)$$

Y es llamada Función de Verosimilitud L (Likelihood function)

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n; \beta) = f(x_1; \beta) * f(x_2; \beta) * \dots * f(x_n; \beta)$$

Según Nelson (2004) citado por (Quintero Moreno, 2011) dado que los valores de las x_k son fijos, el valor de la función Verosimilitud depende del parámetro β , por lo tanto cuando varía el valor de β cambia el valor de L y entre mayor es el valor L , es más verosímil que se obtengan los valores x_k observados en la muestra. Por lo tanto, el método de estimación se centra en encontrar el valor del parámetro β que maximiza L , considerando los valores fijos x_k de la

muestra. En el paso siguiente se plantea un problema de maximización que puede resolverse por algún método de optimización, en este caso específico se deriva L respecto a β y se iguala a 0, con el fin de encontrar los valores críticos β^* que cumplan la condición de primer orden:

$$\frac{\partial L(x_1, x_2, \dots, x_n, \beta^*)}{\partial \beta} = 0$$

Esta derivada parcial indica cómo L depende de los valores x_k y también del parámetro β . Adicionalmente el método de la máxima verosimilitud puede ser usado para modelos en los que se tengan que estimar varios parámetros $B : \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_j$, en consecuencia las condiciones de primer orden serían:

$$\frac{\partial L(X, B)}{\partial \beta_1} = 0 \quad \frac{\partial L(X, B)}{\partial \beta_2} = 0 \quad \dots \quad \frac{\partial L(X, B)}{\partial \beta_j} = 0$$

Donde: $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ y $B = \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_j$,

Con base en el uso de las propiedades de la función logaritmo, es posible reemplazar la derivación de un producto por la derivación de una suma. Y dado que en la ecuación de la verosimilitud L se incluye el producto de las funciones de densidad marginales $f(x_k; \beta)$, el sistema de ecuaciones anterior se puede cambiar ahora incluyendo las derivadas del logaritmo natural de L en lugar de sólo L , y como $\log L(X, B)$ es una función monótona creciente de L entonces habrá un máximo en los mismos puntos donde L tenga máximo:

$$\frac{\partial \log L(X, B)}{\partial \beta_1} = 0 \quad \frac{\partial \log L(X, B)}{\partial \beta_2} = 0 \quad \dots \quad \frac{\partial \log L(X, B)}{\partial \beta_j} = 0$$

Donde: $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ y $B = \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_j$,

Las dos propiedades que deben cumplirse para los parámetros $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_j$ estimados de un modelo son:

- i. Que arrojen estimaciones eficientes, es decir que sean de varianza mínima, en términos estadísticos. Kreyszig (1970) citado por (Quintero Moreno, 2011) estableció que si para un parámetro β_k existe un estimador eficiente, se puede encontrar con el método de máxima verosimilitud.
- ii. Que sean estimaciones insesgadas, lo que implica que su valor esperado coincida con el verdadero valor del parámetro. Es posible que el método de la máxima verosimilitud genere

estimadores sesgados, pero al contar con una muestra considerable, el error suele ser pequeño.

Según Ortúzar y Willumsen (1994) citado por (Quintero Moreno, 2011), al darle solución al sistema de ecuaciones anterior, se obtiene el vector

$$B^* = (\beta_1^*, \beta_2^*, \dots, \beta_j^*)$$

Y éste tiene distribución Normal $N(B, S^2)$, en la cual

$$S^2 = \frac{-1}{E\left(\frac{\partial^2 \log L(X, B)}{\partial B^2}\right)}$$

Si el estimador B resultó sesgado para una muestra pequeña, dado que $-2 \log L(X, B)$ se distribuye asintóticamente como χ^2 con n grados de libertad, en muestras grandes de 500 a 1000 observaciones, el error de sesgo puede asumirse despreciable.

La determinación de los parámetros B^* necesita un proceso iterativo, para el caso del modelo Logit Multinomial lineal en los parámetros, en la función el proceso converge hacia un mismo valor; en consecuencia, se dispone de software comercial para estimar este modelo. (Quintero Moreno, 2011)

3.15 La calidad estadística de la estimación

Los parámetros estimados deben ser analizados para saber si la precisión de la estimación y significancia de los coeficientes son adecuados.

- i. **Precisión de la estimación**, quiere decir determinar el margen de error que tiene la estimación.

Generalmente en la tabla de resultado obtenidos de la estimación, el software empleado entrega un "error estándar" ('Std error') para cada uno de los coeficientes o parámetros estimados. Con base en estos errores estándar, es posible calcular los intervalos de confianza para los estimadores, en el caso de que el modelo haya sido especificado adecuadamente.

En la práctica los intervalos de confianza más usuales son de 95%, 90% y 99%, y para calcularlos se debe hacer una operación aritmética simple en los tres casos mencionados y para cada uno de los parámetros estimados:

- Para un 95% de confianza

$$[\beta_{estimado} + 1.96 * \text{error estándar del } \beta_{estimado} , \beta_{estimado} - 1.96 * \text{error estándar del } \beta_{estimado}]$$
- Para un 90% de confianza

$$[\beta_{estimado} + 1.645 * \text{error estándar del } \beta_{estimado} , \beta_{estimado} - 1.645 * \text{error estándar del } \beta_{estimado}]$$
- Para un 99% de confianza

$$[\beta_{estimado} + 2.575 * \text{error estándar del } \beta_{estimado} , \beta_{estimado} - 2.575 * \text{error estándar del } \beta_{estimado}]$$

ii. **Significancia de los coeficientes estimados**, hace referencia al nivel de contribución que una variable aporta al modelo con su coeficiente asociado, el parámetro calculado debe ser estadísticamente distinto de cero.

Según Ortúzar y Willumsen, se podría cuestionar si el coeficiente β_k calculado es significativamente distinto de cero o no, por una variación estocástica de las variables de la muestra. En consecuencia, se plantea una prueba de hipótesis:

- Hipótesis nula $\beta_k = 0$, lo cual indica que la variable asociada no puede aportar información y por lo tanto debe ser omitida del modelo
Vs
- Hipótesis alterna $\beta_k \neq 0$

a) Criterio de la variable aleatoria "t"

Para la determinación de la prueba de hipótesis, se hace uso de la variable aleatoria "t" (esta no es la distribución t de Student) que surgió en el proceso de estimación de los coeficientes β_k por la maximización de la función Log(L), en la cual se manipularon los datos de la muestra y que resulta tener una distribución normal N (0,1):

$$t = \frac{\beta_k}{\text{Error Estándar de } \beta_k}$$

El estadístico de esta prueba de significancia es la variable "t" que para un nivel de confianza de 95% o un nivel de significación de 5% si

- $t \geq 1.96$ se rechaza la prueba de hipótesis nula $\beta_k = 0$ en consecuencia $\beta_k \neq 0$

- $t < 1.96$ se acepta la prueba de hipótesis nula $\beta_k = 0$ e indica que el coeficiente no aporta información al modelo y es recomendable descartar su variable asociada o incluso cambiar el modelo

En el uso del criterio de significancia mediante la variable aleatoria "t" según Horowitz et al (1986) se sugiere lo siguiente:

- Para la eliminación de una variable de un modelo, si el valor "t" para una variable está comprendido entre $[-1,1]$, en principio debería ser descartada del modelo, sin embargo, antes de tomar la decisión definitiva de omitirla, es conveniente analizar la especificación del modelo para verificar la presencia de errores.
- Si el coeficiente estimado resulta ser significativo debido a un valor asociado de "t" alto, debe verificarse que el signo del coeficiente sea consistente con el atributo de utilidad que explica. A manera de ejemplo: si el atributo es 'costo de viaje', el signo de su coeficiente asociado debe ser negativo; por otro lado, si se trata del atributo 'ahorro de tiempo', el signo de su coeficiente asociado deberá ser positivo

b) Criterio de la χ^2

Es una prueba de significancia basada en la distribución χ^2 , consiste en corroborar si al menos una de las variables incluidas en el modelo influye en la elección del usuario. Para el caso general con k variables, se tiene:

- la hipótesis nula $H_0: b_1 = \dots = b_k = 0$
- la hipótesis alterna $H_1: b_j \neq 0$ para alguna $j \in \{1, \dots, k\}$

El estadístico de prueba es el cociente de verosimilitud:

$$-2Ln \frac{L(b_0^*)}{L(b_0, b_1, b_k)}$$

donde:

- b_0^* es la estimación del parámetro b_0 sin considerar los parámetros restantes (debido a que bajo la hipótesis nula H_0 se supone $b_1 = \dots = b_k = 0$)
- L es la función de verosimilitud

Frecuentemente sucede que la hipótesis nula es rechazada, lo cual indica que el modelo explica mejor los datos al considerar los factores correspondientes a los parámetros $b_1 \dots b_k$ que sin ellos. En la práctica esto es muy poca información sobre el modelo, pues el resultado de la prueba no indica cuáles de estos factores son importantes y cuáles no y que por lo tanto deberían ser eliminados del modelo.

En la práctica, al rechazar la hipótesis global $H_0: b_1 = \dots = b_k = 0$ se procede a efectuar pruebas de manera individual para establecer qué parámetros son estadísticamente iguales a cero, y entonces poder omitirlos del modelo. Para la prueba individual de significancia mencionada, puede usarse la estadística de Wald que bajo la hipostasis nula se distribuye asintóticamente como χ^2 con 1 grado de libertad:

$$Wald = \left(\frac{b_j}{ErrStd(b_j)} \right)^2$$

Los paquetes de software para cálculo de la máxima verosimilitud suelen entregar el resultado de la estadística de Wald, (podría aparecer como "ChiSquare"). Para determinar si se rechaza la hipótesis nula se debe calcular la estadística de prueba con datos observados y posteriormente la probabilidad de obtener ese valor con base en la distribución de la estadística de prueba bajo la hipótesis nula H_0 , en la práctica usualmente se adopta un 5% de significación, así si la probabilidad de observar el valor obtenido es menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula en favor de la hipótesis alterna. Los softwares estadísticos generalmente entregan la probabilidad con el título de 'significancia de la prueba' o 'valor ρ ' y entre más pequeño es el valor de ésta es más seguro el rechazo de la hipótesis nula H_0 y la aceptación de la hipótesis alterna, lo cual conlleva a deducir que los coeficientes β_k estimados, son estadísticamente diferentes de cero y la elección del usuario quedará correctamente explicada por algunos de esos parámetros.

3.16 Comprobación del desempeño de la estimación del Modelo Logit

No se tiene una manera tan definida para la evaluación del ajuste de un Modelo Logit, como es el caso del Método de mínimos cuadrados ordinarios y su coeficiente de determinación R^2 pero existen algunas propuestas de medición de ajuste. Una forma fácil de efectuar la evaluación de un modelo Logit, es mediante una tabla de clasificación:

Tabla 5 Tabla de clasificación genérica para la comprobación del desempeño del Modelo Logit

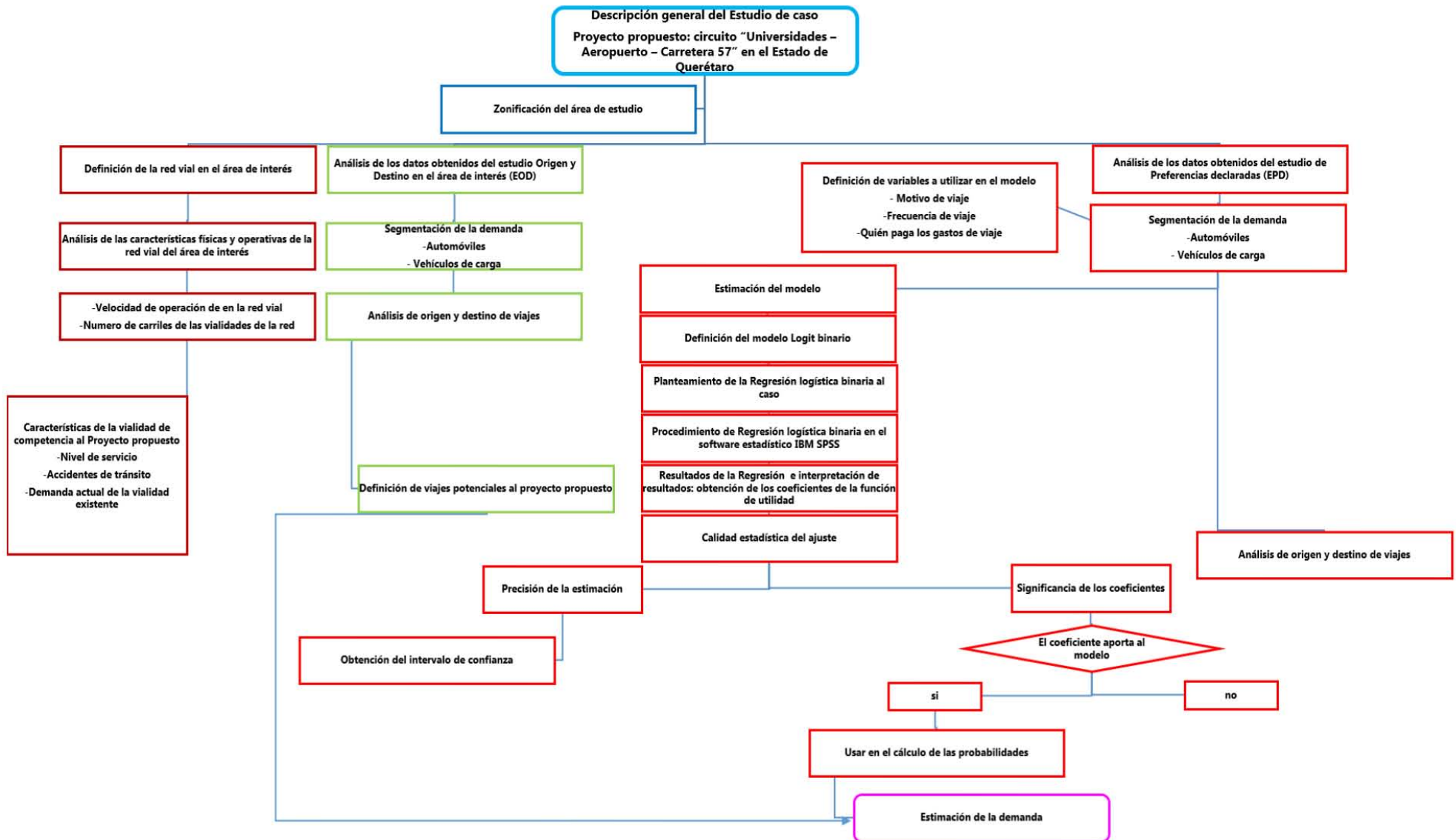
	Predicciones NO	Predicciones SI
Observaciones NO	Número de observaciones predichas como NO y observadas como NO	Número de observaciones predichas como SI y observadas como NO
Observaciones SI	Número de observaciones predichas como NO y observadas como SI	Número de observaciones predichas como SI y observadas como SI

Cuando se tenga un mayor número de predicciones correctas el modelo está mejor especificado.

Capítulo 4. Estudio de caso: Aplicación del modelo Logit Binomial para la estimación de demanda de transporte

Introducción

En esta sección se hace uso de la metodología descrita en el capítulo anterior para una situación en la cual se requiere la estimación de demanda de transporte. A través del estudio de caso se plantea una situación real en la región central de México, específicamente el Estado de Querétaro, donde el gobierno estatal requiere determinar cuántos usuarios de los que conforman la demanda actual de un tramo carretero federal libre (Carretera Federal 57), estarían dispuestos a elegir una nueva alternativa con cobro de cuota (inexistente). Para dar solución a esta cuestión dicotómica, en el campo de modelación de demanda de transporte, se propone abordar el caso desde un enfoque de elección discreta con la idea central de que la demanda que tiene un sistema de transporte es el resultado de las elecciones que hacen los usuarios entre las distintas opciones disponibles para viajar en dicho sistema, en este caso, la elección de la ruta a usar, pues se definen dos opciones para realizar el viaje: la alternativa actual o la alternativa hipotética propuesta, para estimar la demanda de transporte es necesario un modelo que pueda representar de manera razonable, el proceso de toma de decisiones de los usuarios ante dichas alternativas para viajar. Por lo tanto en este capítulo se sigue la metodología correspondiente para conformar dicho modelo, partiendo de la identificación de las opciones de viaje disponibles que serán conocidas por los usuarios quienes tomaran la decisión de viaje, seguido de la identificación de las variables que influyen en la decisión de viaje del usuario, para lo cual se usarán datos de encuestas de Preferencias Declaradas recolectados en campo, en la que se han recopilado las elecciones de una muestra de los usuarios para realizar su viaje, con base en los atributos presentados para la alternativa propuesta y considerando condiciones de la vialidad actual; dichas elecciones, probablemente están directamente relacionada con el nivel socioeconómico de cada usuario encuestado. De la EPD se definen dos segmentos de demanda: usuarios de vehículos particulares y usuarios de vehículos de autotransporte de carga y mediante el análisis de los datos obtenidos de cada segmento de demanda mencionados, se definen las variables que conforman el modelo de regresión logística binaria el cual se resolverá con software estadístico que aplica el método de máxima verosimilitud que permiten obtener los parámetros o coeficientes de la función de utilidad para la alternativa propuesta, finalmente se usará el modelo Logit Binomial, que es la variante más sencilla del modelo Logit Multinomial para obtener las probabilidades de elección de los usuarios de la muestra, y de esta manera



Representación esquemática del Estudio de caso. Fuente: elaboración propia

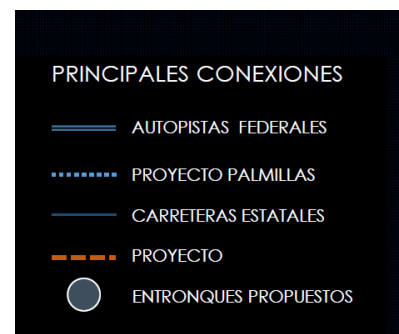
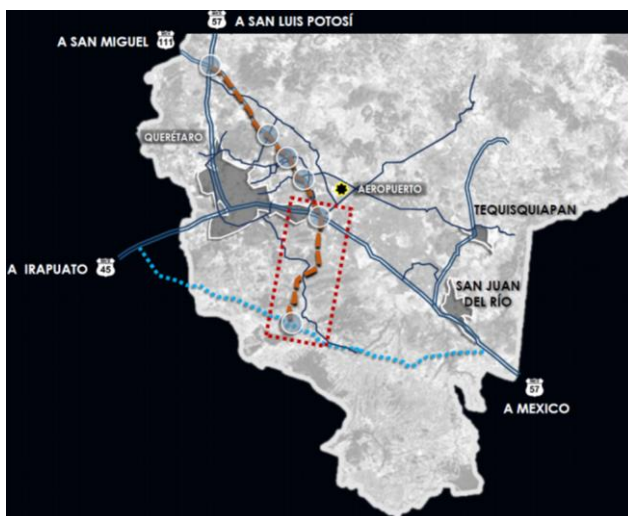
poder determinar la magnitud de viajes potenciales (obtenidos por análisis de EOD), que el tramo propuesto podría capturar en caso de ser puesto en servicio.

4.1 Descripción general del estudio de caso

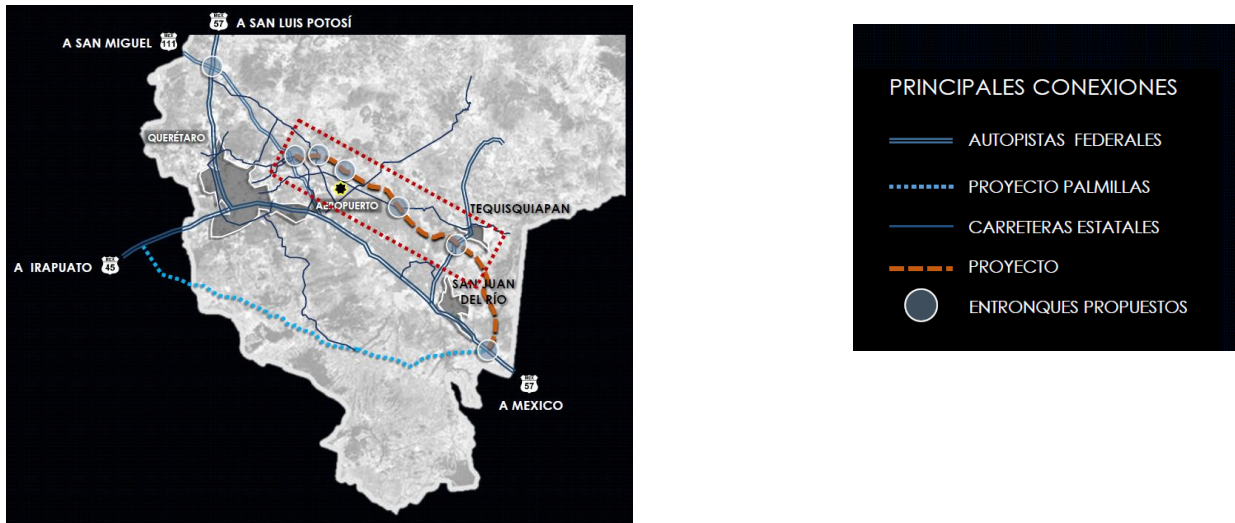
La Comisión Estatal de Infraestructura del Estado de Querétaro ha contemplado un paquete integral de proyectos conformado principalmente por nuevos tramos de carreteras, el propósito principal es incrementar la cobertura de la Red Estatal de Carreteras ayudando al mejoramiento de los niveles de servicio en las carreteras existentes, lo cual significa no solo disminuir tiempos de traslado tanto de pasajeros como de carga en su paso por las zonas urbanas del Estado como Santiago de Querétaro y San Juan del Río, sino también se plantea lograr una mayor conectividad hacia puntos estratégicos como el Aeropuerto Intercontinental de Querétaro, lugares de interés turístico como Tequisquiapan y Bernal, y conectar fácilmente las zonas y parques industriales en la región aledaña. La lista de proyectos propuestos la constituyen en principio tres obras de infraestructura carretera con cobro de cuota, bajo un esquema de concesiones.

- Circuito Palmillas – San Luis Potosí.
- Circuito Palmillas – San Luis Potosí.
- Distribuidor Carretera Federal 57 – Carretera Estatal No. 100.

1. Circuito Palmillas – San Luis Potosí



2. Circuito Universidades – Aeropuerto – Carretera 57



3. Distribuidor Carretera Federal 57 – Carretera Estatal No. 100

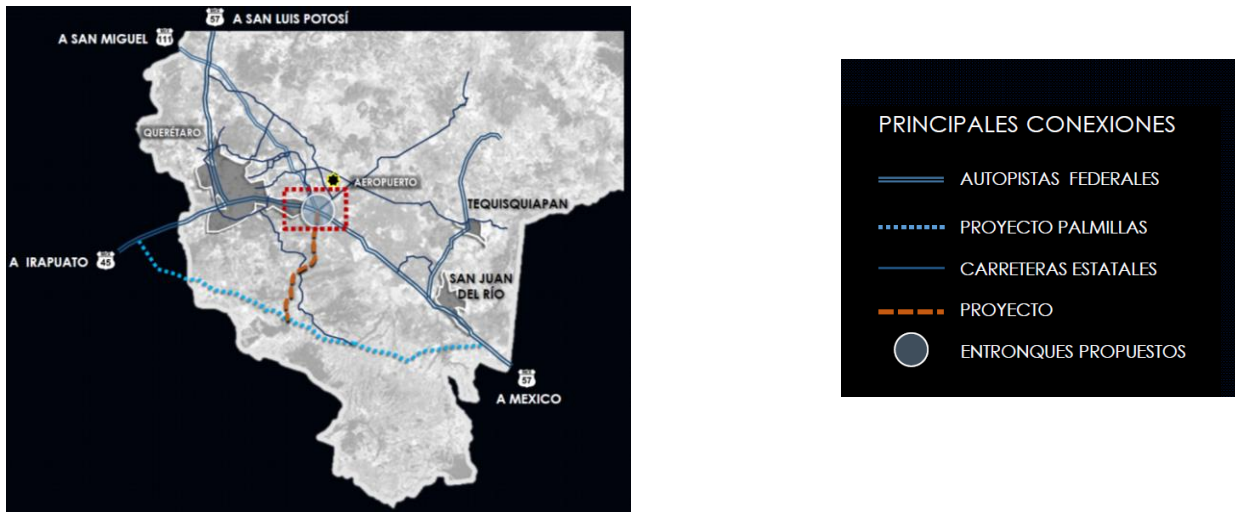


Fig. 16 Proyectos de infraestructura propuestos. Fuente: (Poder Ejecutivo del Estado de Querétaro, 2016)

El estudio de caso aborda particularmente el análisis del Proyecto 2 correspondiente al “Circuito Universidades – Aeropuerto – Carretera 57”, el cual implicaría la adición de una nueva alternativa con cobro de peaje, con 66.1 kilómetros nuevos de carretera con dos carriles de 3.50 metros de ancho por cada sentido de circulación y siete entronques carreteros para accesos y salidas.

4.2 Red vial en el área de interés

El Estado de Querétaro está ubicado sobre el eje carretero que une a la Zona Metropolitana del Valle de México con Nuevo Laredo de Sur a Norte, y de Este a Oeste en la parte intermedia de la unión del Golfo de México con el Océano Pacífico, definiendo una importante conexión con ciudades como Tampico, Guadalajara y Manzanillo, estableciendo en esta región un papel de enlace de grandes mercados.



Fig. 17 Localización del Estado de Querétaro en la región central de México. Fuente: Google Earth, 2017



Fig. 18 Principales ejes troncales carreteros de México. Fuente: (Poon Hung, 2016)

La infraestructura carretera del Estado de Querétaro se compone de 3,346.4 kilómetros de carreteras (Gobierno del Estado de Querétaro, 2016):

- 653.8 km de carreteras federales
- 1,105.0 km de carreteras estatales
- 1,587.7 km de una red de caminos rurales

El estado físico de las carreteras estatales según datos de la Comisión Estatal de Caminos, al año 2015 (Gobierno del Estado de Querétaro, 2016) es:

- 47% en malas condiciones
- 31% en estado regular
- 15% en buenas condiciones
- 7% son terracerías

La distribución por región de la Red Carretera Estatal es (Gobierno del Estado de Querétaro, 2016):

- 427 km (39%) en la región central
- 276 km (25%) en la región sur
- 229 km (20%) en la región semidesierto
- 173 km (16%) en la Sierra Gorda

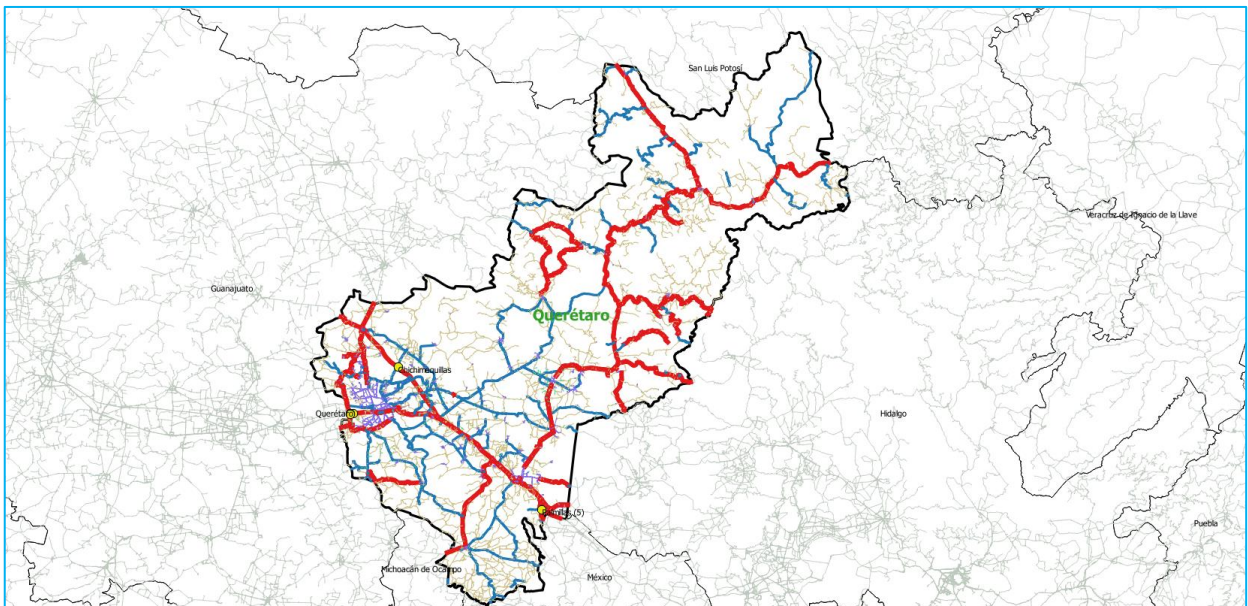


Fig. 19 Infraestructura vial en el Estado de Querétaro: — Carreteras Federales — Carreteras Estatales.
Fuente: Elaboración propia con datos de la RNC, 2016

Por el Estado de Querétaro cruzan las carreteras federales No. 57 y No. 45, ambas corresponden a la espina dorsal carretera de México, en consecuencia, el estado está localizado en una zona de intersección y distribución del tránsito vehicular tanto privado, turístico y de carga hacia el norte del país. Por la red carretera del Estado de Querétaro circulan vehículos provenientes de tres zonas principalmente (Gobierno del Estado de Querétaro, 2016):

- De la Zona Metropolitana del Valle de México.
- Del Norte (San Luis Potosí, Nuevo León).
- Del Occidente del país.

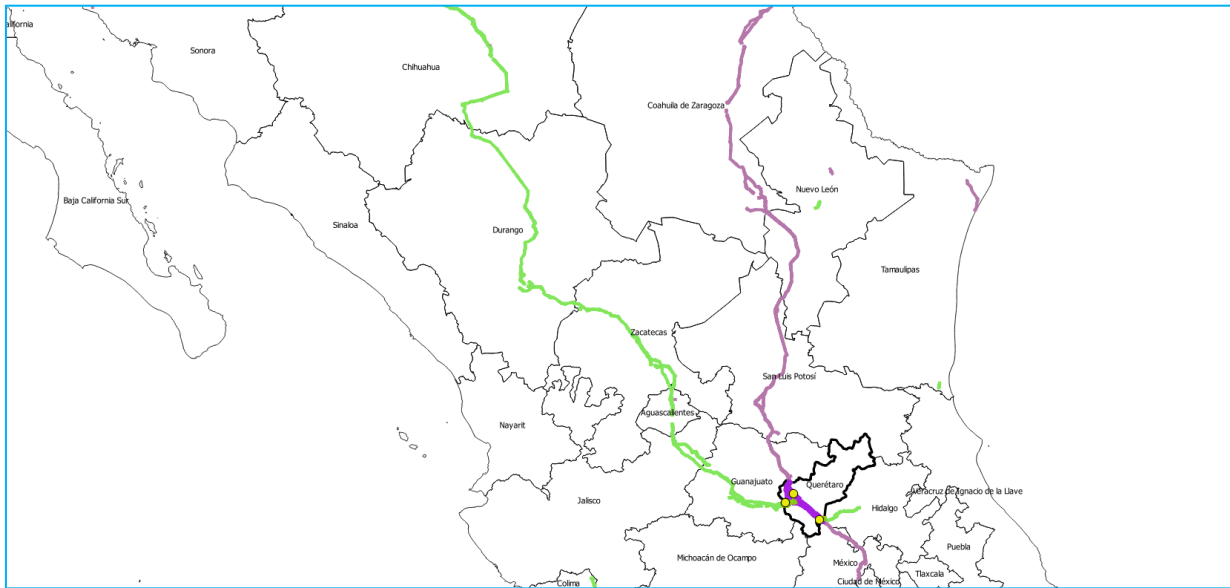


Fig. 20 — Carretera federal No. 57, — Carretera federal No. 45 en sus trayectorias hacia la frontera norte de México. Fuente: Elaboración propia con datos de la RNC 2016 e INEGI

La construcción del libramiento de cuota denominado "Circuito Universidades – Aeropuerto – Carretera 57" que se plantea en este estudio de caso comprende un tramo que conectaría la caseta de cobro No. 5 P.C. Palmillas con el Libramiento Noreste de Querétaro, el cual se encuentra concesionado a Banobras –Farac y operado por CAPUFE.



Fig. 21 Situación actual: Carretera federal libre 57, Libramiento Noreste de Querétaro (cuota).

Fuente: Google Earth, 2017

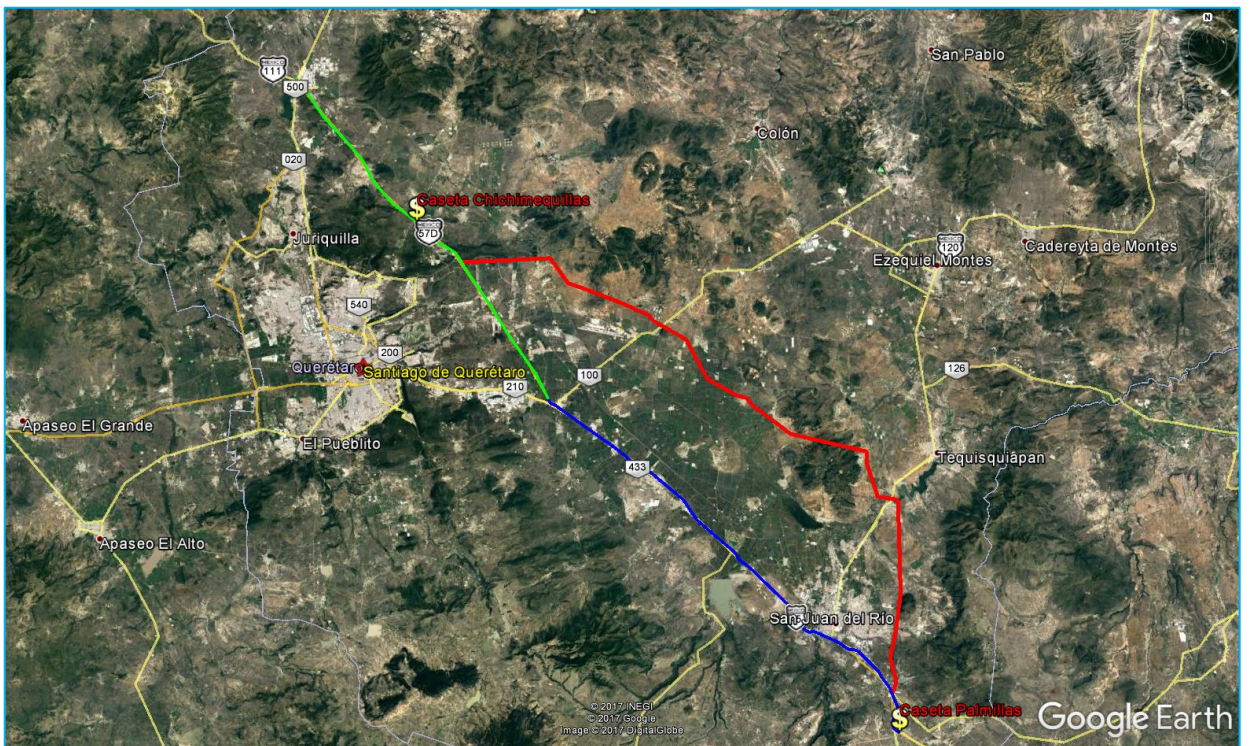


Fig. 22 Situación planteada: Carretera federal libre 57, Libramiento Noreste de Querétaro (cuota),

 Libramiento de cuota planteado (Circuito Universidades – Aeropuerto – Carretera 57). Fuente: (Poder Ejecutivo del Estado de Querétaro, 2016) y Google, 2017

Se pretende la revisión con la SCT de la concesión del Libramiento Noreste (37 km) a favor del Estado de Querétaro lo cual permitiría su modernización y la aplicación del cobro de tarifas en la construcción de nuevos caminos y del libramiento planteado en este caso de estudio.

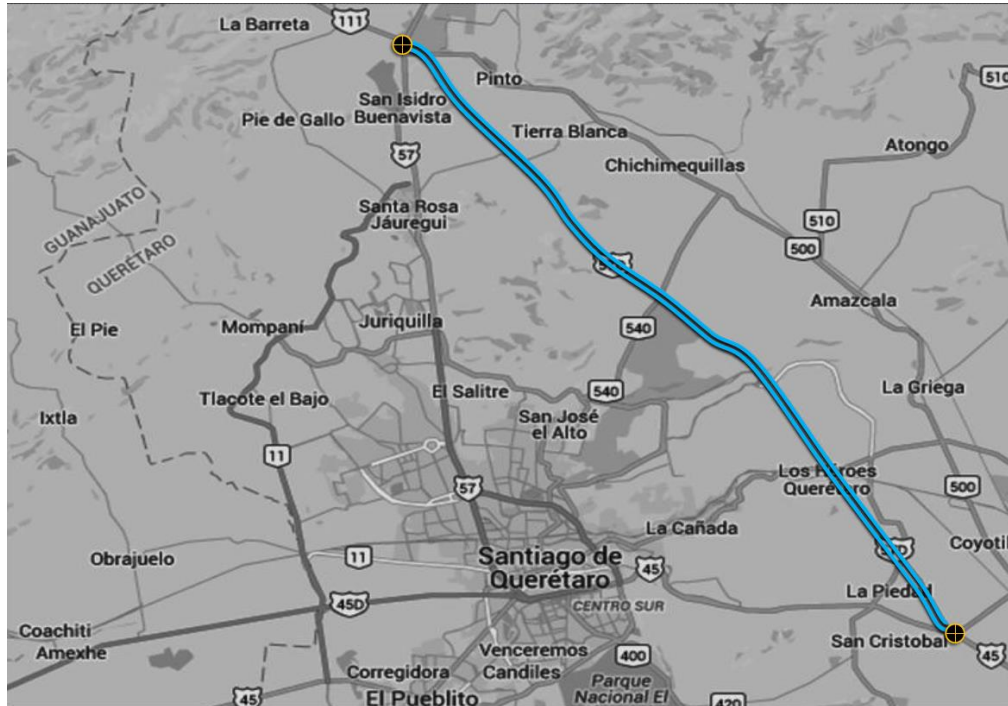


Fig. 23 Libramiento Noreste de Querétaro (Carretera 57D) de cuota. Fuente: (Poder Ejecutivo del Estado de Querétaro, 2016)

Para el análisis, en este trabajo se utilizaron diferentes tipos de datos recopilados tanto en campo como en fuentes de información especializadas como el portal web de la SCT y del INEGI:

- Encuestas Origen – Destino (EOD Carga SCT, 2016).
- Datos viales (SCT, 2006 - 2017).
- Datos de Capacidades y Niveles de Servicio (SCT, 2014 - 2016).
- Datos de Estadísticas de Accidentes de Tránsito (SCT, 2012 - 2017).
- Encuestas de Preferencias Declaradas (EPD) facilitadas por un tercero (Berumen S.A. de C.V. empresa consultora especializada en investigación de mercados, 2017).
- Capas de datos geográficos (INEGI, s.f.).

4.3 Zonificación del área de estudio

“La zonificación es útil para agregar hogares o unidades individuales dentro de porciones manejables de territorio, esto para fines de modelización. Para establecer un sistema de

zonificación primeramente se debe distinguir el área de estudio del "resto del mundo". Algunas consideraciones importantes para realizar una zonificación son:

- En la definición del área de estudio se debe tomar en cuenta el contexto de decisión, la red de transporte (en nuestro caso la red vial) y la naturaleza de los viajes que interesan (si son obligatorios o no, si son de corta o larga distancia, etcétera)
- Estratégicamente el área de estudio debería establecerse en base a que la mayoría los viajes de interés tengan origen y destino dentro de ésta, sin embargo, en la práctica pueden presentarse casos donde la mayoría de los viajes atraviesan el área e interesa establecer una circunvalación o bypass (como es el caso de la nueva alternativa propuesta en este estudio de caso).
- El área de estudio debería ser más grande que el área concreta de interés y debe comprender todos los proyectos de transporte que deban ser considerados. (proyectos de infraestructura carretera en este caso específico)

La región externa al área de estudio generalmente se divide en zonas externas, las fronteras de éstas podrían representar áreas conectadas por arcos de transporte en los que circulen flujos que alimentan al área de estudio.

Por otro lado, el área de estudio debe ser dividida en zonas internas más pequeñas, la cantidad de ellas dependerá de criterios de modelización ya que en algunos estudios se requerirán zonas mucho más pequeñas pudiendo ser necesario representar estacionamientos de vehículos, es decir, los principales generadores/attractores de viajes.

La representación de zonas puede ser posible en un SIG donde se considera como si todos sus atributos se concentraran en un punto específico llamado centroide de zona.

En ciertas ocasiones podría ser conveniente desarrollar un sistema de zonas jerárquico, es decir, en el que las subzonas se agregan en zonas más grandes, que a su vez se agregan en distritos, municipios y finalmente sectores, lo cual facilita el análisis al nivel de detalle requerido para el tipo de decisiones que se deban tomar. "

Con base en la disponibilidad de datos para el presente estudio de caso, el área de interés se definió de la siguiente manera:

Dadas las consideraciones mencionadas anteriormente se realizó la zonificación del área de estudio con base en el nivel de agregación de los datos disponibles sobre los viajes de la encuesta origen destino de la SCT y la red vial. En principio el área geográfica de la zona de

estudio se dividió considerando características socioeconómicas, pero sobre todo identificando la magnitud de generación y atracción de viajes de cada subzona, así como su conectividad a la red vial:

- Se definió una zona interna delimitada por las fronteras del Estado de Querétaro, tomando ventaja de que el proyecto de infraestructura planteado “Circuito Universidades – Aeropuerto – Carretera 57” así como los otros proyectos carreteros propuestos están situados exclusivamente dentro del territorio queretano. A su vez esta área geográfica se dividió en 18 subzonas que corresponden a los municipios que conforman al estado de Querétaro y finalmente desagregando las áreas municipales dividiéndolas en localidades dado que la generación y atracción de viajes es muy diferente incluso dentro de un mismo municipio.
- Se estableció una zonificación externa definida por aquellos estados de la República Mexicana colindantes al Estado de Querétaro y además otros estados encontrados en la EOD que ya sea que generan o atraen viajes o cruzan el área interna de estudio, lo que representa la demanda potencial para el proyecto planteado en el estudio de caso.

ZONIFICACIÓN INTERNA Y EXTERNA DEL ÁREA DE ESTUDIO

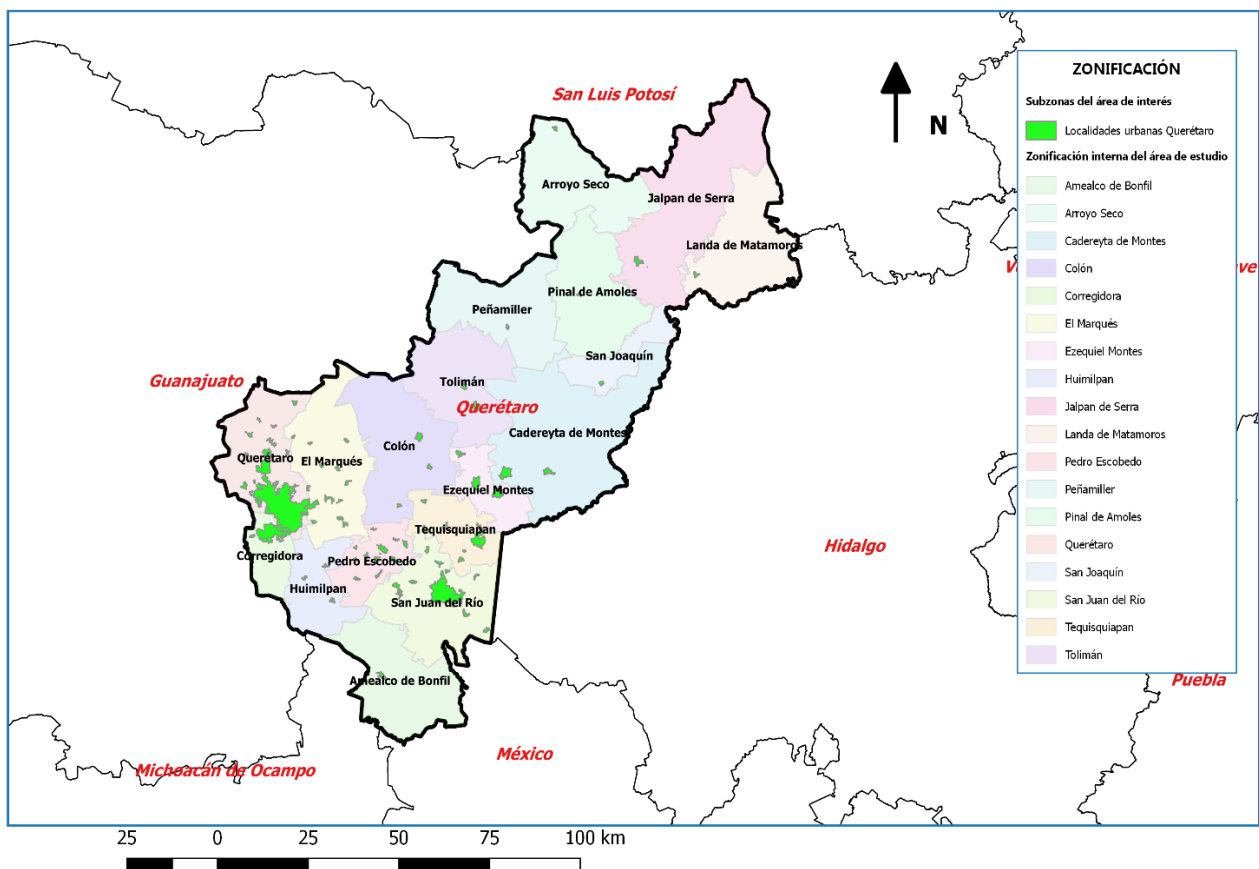


Fig. 24 a) Representación de la zonificación del área de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI, 2017

ZONIFICACIÓN INTERNA Y EXTERNA DEL ÁREA DE ESTUDIO

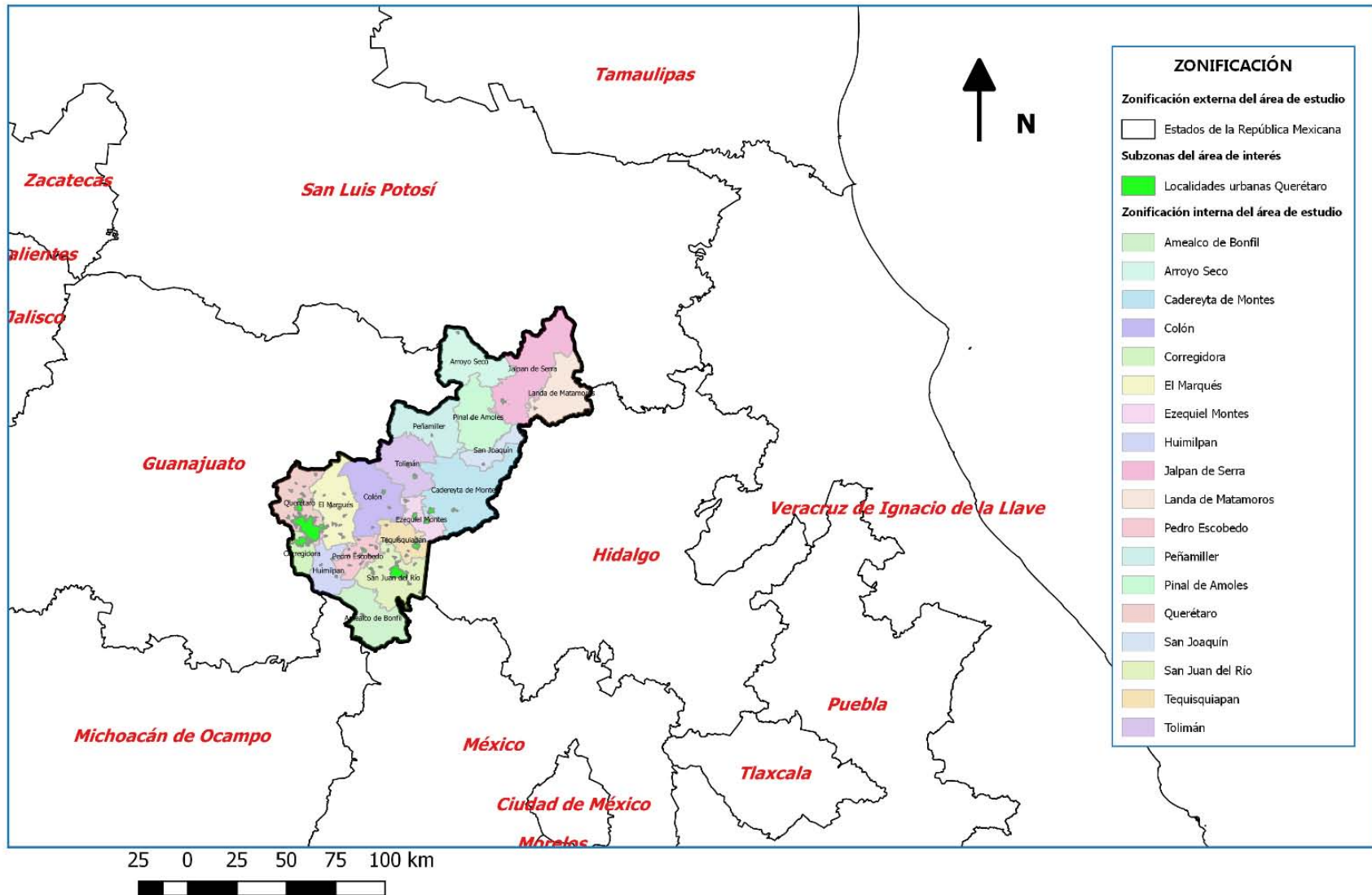


Fig. 24 b) Representación de la zonificación del área de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI, 2017

En el apartado del análisis de la EOD de la SCT (punto 4.9) se detallará la aplicación de esta zonificación, principalmente para indicar la magnitud de viajes de largo recorrido, así como viajes intrazonales en el área de interés.

4.4 Características operativas y físicas de la red vial del área de interés

“La red de transporte representa la parte de la oferta en el proceso de modelización, por lo tanto, es lo que el sistema de transporte ofrece con el fin de satisfacer las necesidades de desplazamiento de los viajeros en el área de estudio” (Ortúzar, 2004).

Para la modelización de un proyecto de transporte como lo es una nueva alternativa carretera de cuota es importante conocer las principales características físicas y operativas de la red vial en el área de interés.

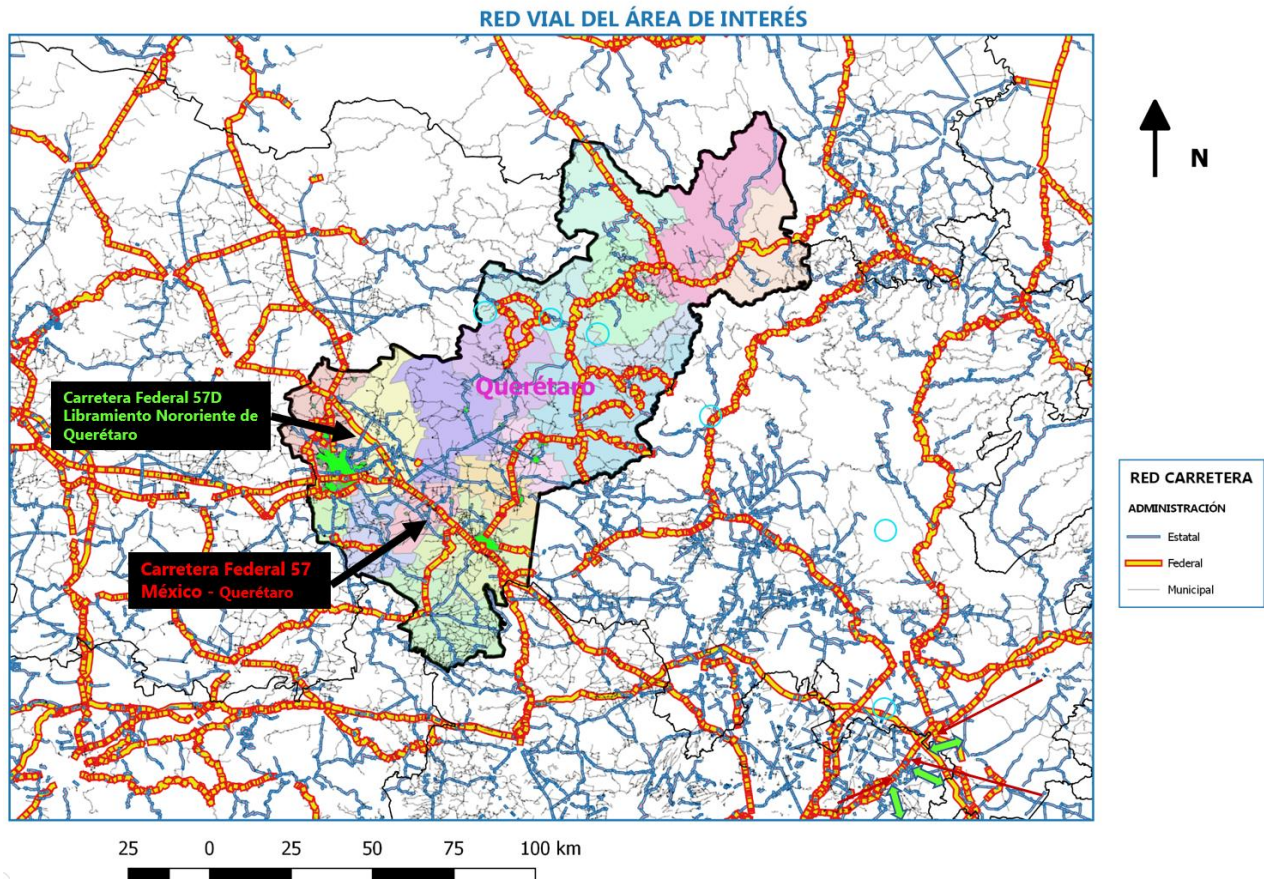


Fig. 25 Representación de la red vial dentro del área de interés, haciendo referencia a la entidad gubernamental que la administra. Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI, 2017

La primera caracterización de las vialidades del área de interés es la diferenciación respecto a la entidad administrativa que las opera, en la figura anterior se puede observar que en el estado de Querétaro existen carreteras que son operadas por organismos de los gobiernos federal, estatal y mayormente municipal. Aunque la troncal más importante que cruza la región conformada por la Carretera Federal 57 y el tramo de la Carretera de cuota 57D es administrada exclusivamente por la entidad federal. El tramo libre de la carretera Federal 57 se define como la principal vía de competencia al proyecto de cuota "Universidades – Aeropuerto – Carretera 57", por lo tanto, se profundiza en el análisis de sus atributos, con el propósito de conocer condiciones físicas y operativas actuales y de esta manera poder contrastar con los beneficios que una nueva alternativa de viaje podría aportar.

El cobro de cuotas en las carreteras que conforman la red vial del área de interés es representada en la siguiente figura, de la cual es importante señalar que la Carretera Federal 57, es decir, la principal vía de competencia al proyecto, no presenta cobro de peaje en el tramo Caseta Palmillas hasta llegar a la Ciudad de Santiago de Querétaro, aunque es notorio que para acceder a este tramo se debe pagar la cuota de la Caseta de cobro No. 5 Palmillas ya que es la continuación de la Autopista México – Querétaro 57D. Por otro lado, el Libramiento Nororiente de Querétaro sí presenta cobro de cuota, el pago se debe efectuar en la Caseta de "Chichimequillas".

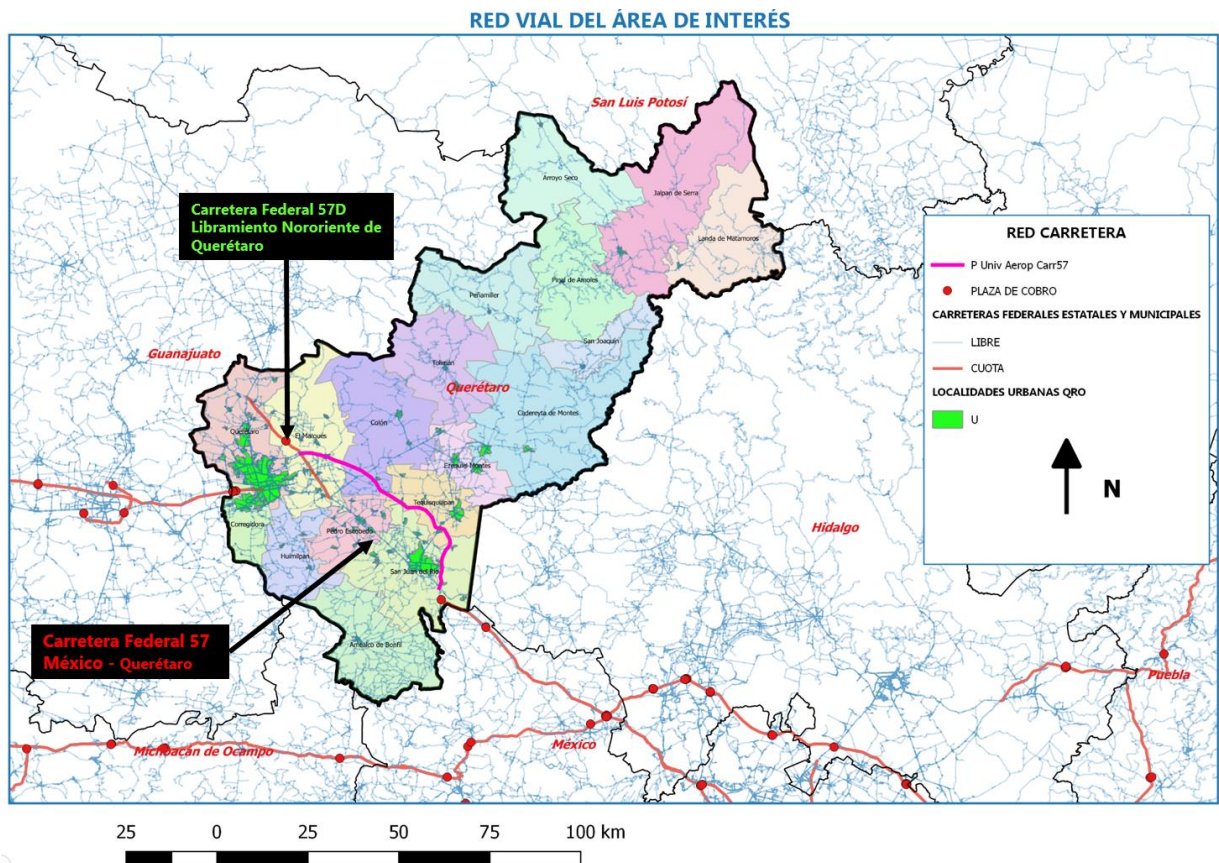


Fig. 26 Representación de la red vial dentro del área de interés, haciendo referencia a las condiciones de peaje o libre de peaje. Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI, 2017

4.4.1 Velocidad de operación en la red vial del área de interés

La velocidad es uno de los principales indicadores utilizados para medir la calidad de la operación a través de un sistema de transporte. El factor más simple que un individuo considera para la selección de una ruta específica para viajar de un origen a un destino conlleva a minimizar demoras lo cual está relacionado directamente con una velocidad sostenida pero adicionalmente que se ofrezca seguridad. (Cal y Mayor R & Cárdenas G., 2007)

En la siguiente figura se muestran las velocidades establecidas en las carreteras de la red vial del área de interés; se puede observar que en la vía de competencia, es decir, la Carretera Federal 57 y el Libramiento Noreste de Querétaro se establecen velocidades de 100 km/h, ya que ambos tramos son parte del sistema troncal carretero del país y son del tipo ET4 que son los ejes de transporte establecidos por la SCT, ya que por sus características geométricas y estructurales permiten la operación de todos los vehículos autorizados con las máximas dimensiones, capacidad y peso. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2015)

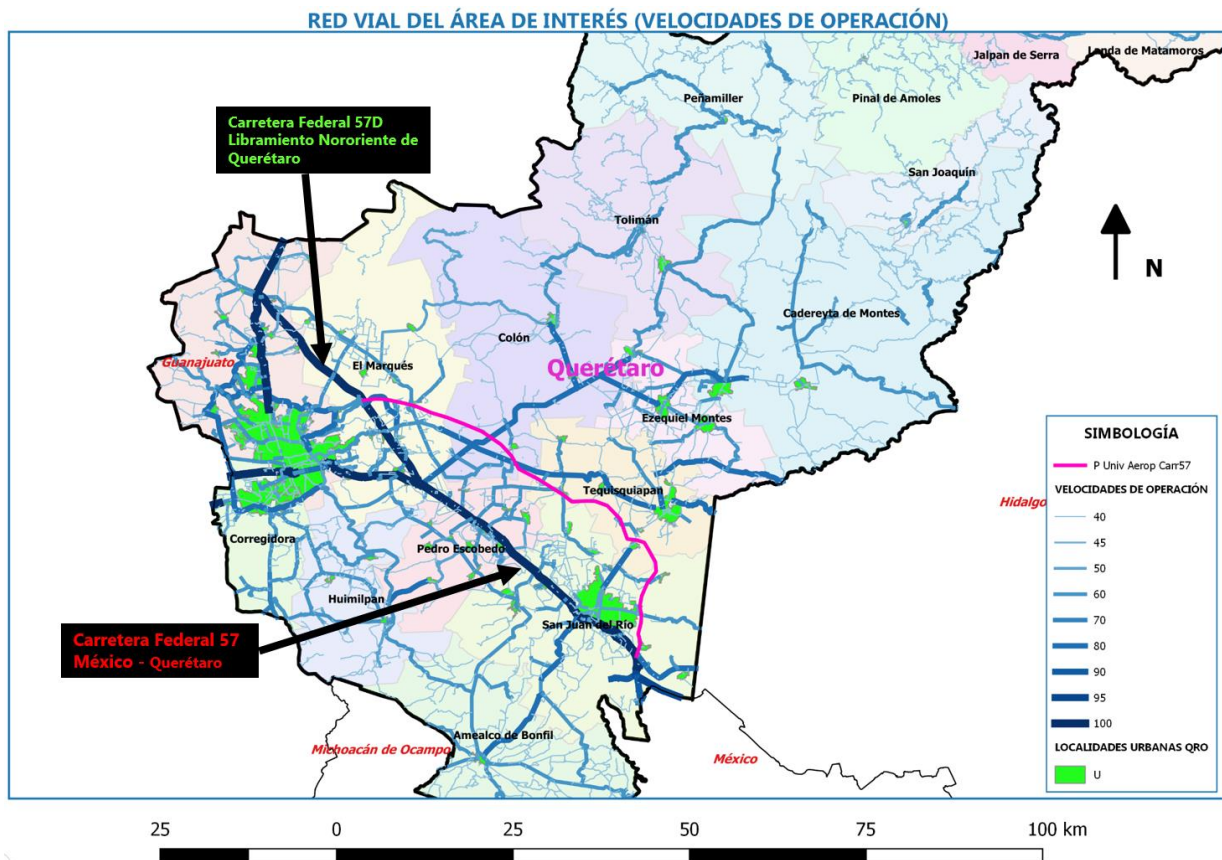


Fig. 27 Representación de la red vial dentro del área de interés, haciendo referencia a la velocidad de operación de las vialidades. Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI, 2017

4.4.2 Número de carriles en las vialidades del área de interés

El cálculo de los niveles de servicio en cada tramo de la red carretera nacional permite orientar el establecimiento de políticas acordes con las necesidades socioeconómicas para la planeación, modernización y la conservación de la infraestructura carretera. Conocer el nivel de servicio asociado a la operación de las carreteras permite establecer su grado de eficiencia a través de una comparación entre la oferta y la demanda de servicio. (SCT - Dirección General de Servicios Técnicos, s.f.)

El número de carriles de una carretera es una característica física que sirve para determinar los niveles de servicio, el siguiente mapa temático permite conocer esta cualidad en cada vialidad dentro del área de interés, pero sobre todo de la vía de competencia, la Carretera Federal 57 que tiene 3 carriles por cada sentido de circulación. También se ha incluido la trayectoria del proyecto “Universidades – Aeropuerto – Carretera 57” en el mapa, el cual tendría dos carriles por cada sentido de circulación.

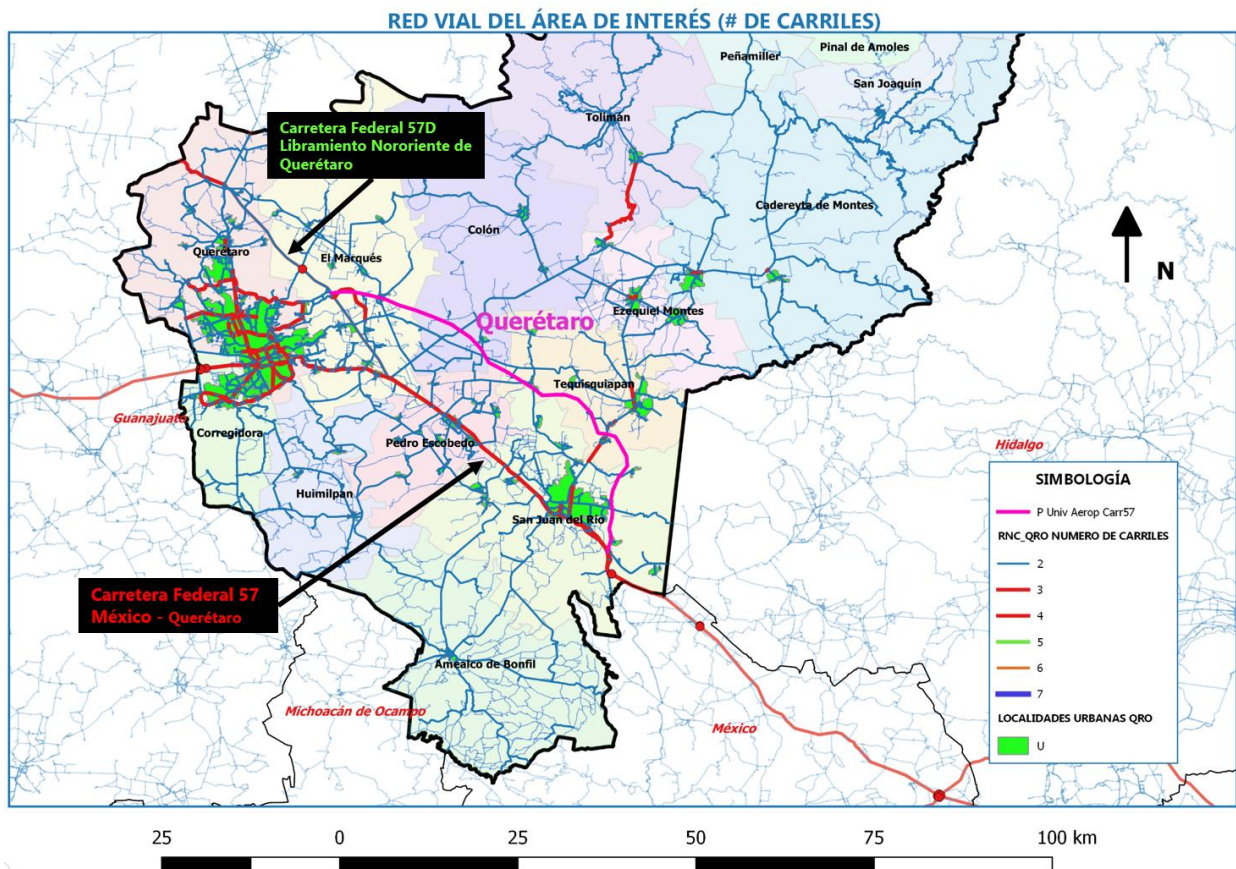


Fig. 28 Representación de la red vial dentro del área de interés, haciendo referencia al número de carriles de las vialidades. Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI, 2017

4.4.3 Nivel de servicio de la vialidad de competencia

Los niveles de servicio de la infraestructura carretera son una medida cualitativa del efecto de una serie de factores: la velocidad, el tiempo de recorrido, las interrupciones al movimiento continuo del tránsito, la libertad de manejo, la comodidad y los costos de operación. Para conocer la capacidad (número máximo de vehículos que pueden circular por una vialidad durante un periodo de tiempo de una hora) y los niveles de servicio que prevalecen en cada tramo de la red carretera, la SCT considera:

- Condiciones establecidas por las características físicas de la vialidad.
- Condiciones que dependen de la naturaleza del tránsito vehicular respecto su magnitud y clasificación vehicular.

Con base en lo anterior se han establecido seis niveles de servicio para identificar las condiciones de operación de una vialidad (Niveles A a F), el nivel de servicio A es el más conveniente, el nivel del servicio E indica la capacidad de la vía, y el F es el nivel de servicio más inconveniente.

Con datos e información obtenida de la SCT se encontró el nivel de servicio obtenido por este organismo, para la Carretera Federal 57 en los años 2014, 2015 y 2016, que resulta ser el Nivel de Servicio F el menos conveniente en la escala de evaluación de la calidad del servicio.

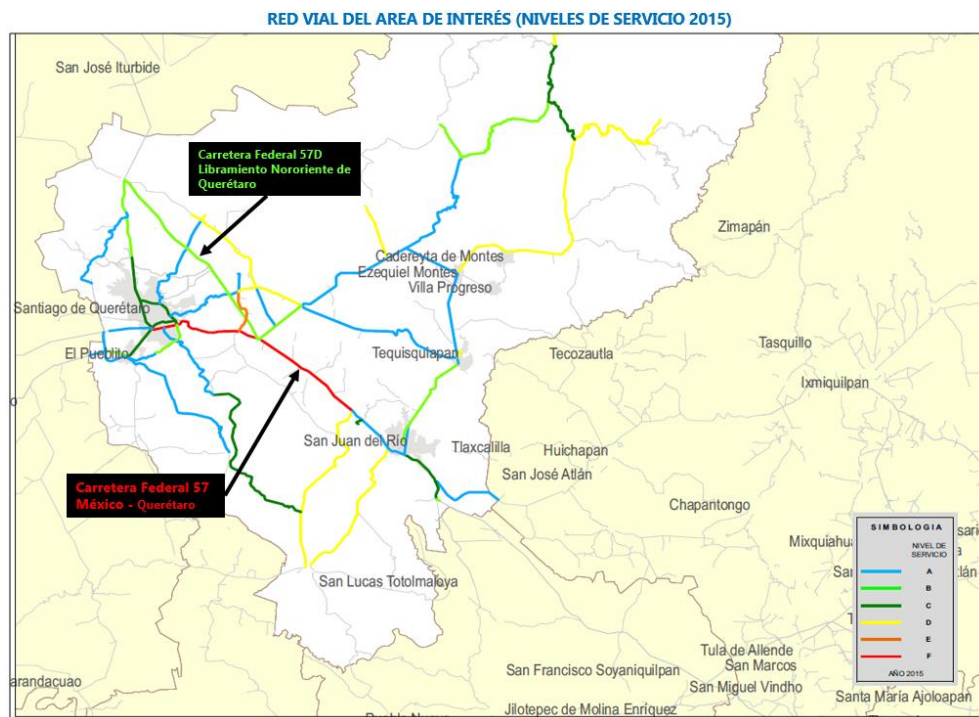


Fig. 29 Representación del nivel de servicio de la red vial dentro del área de interés. Fuente: Niveles de servicio 2015, SCT

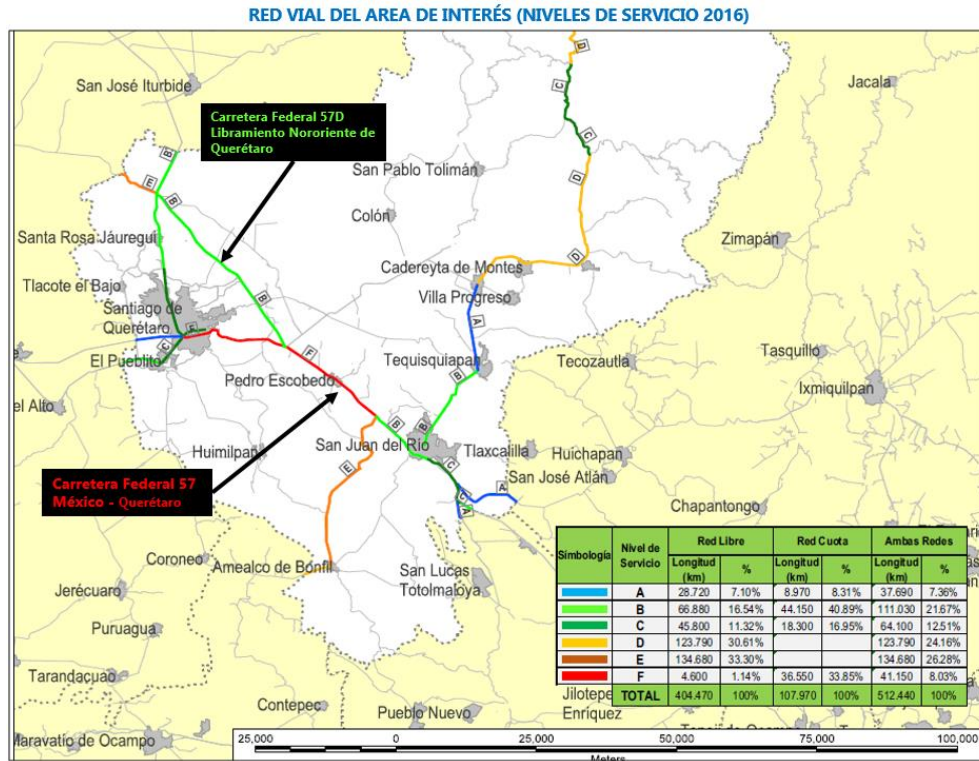


Fig. 30 Representación del nivel de servicio de la red vial dentro del área de interés. Fuente: Niveles de servicio 2016, SCT

El nivel de Servicio F en el tramo carretero describe condiciones de operación que corresponde a flujos forzados, donde los volúmenes son inferiores a los de la capacidad y las velocidades se reducen produciendo posiblemente muchas paradas y demoras debidas a la congestión vehicular.

4.4.4 Accidentes de tránsito en la vialidad de competencia

El problema de tránsito tiene dos consecuencias principales que son la accidentalidad y el congestionamiento, en este sentido, particularizando en el primero de los anteriores, resulta ser un índice muy importante porque de ella derivan grandes pérdidas humanas (ya sean muertos o heridos) y grandes pérdidas económicas. A pesar de que la mayor cantidad de accidentes de tránsito es debida a errores humanos, es verdad que el mejoramiento del sistema vial y los vehículos podría reducir la ocurrencia de los errores mencionados. (Cal y Mayor R & Cárdenas G., 2007)

La recopilación de información sobre accidentes de tránsito en las carreteras del país es llevada a cabo por el INEGI, sin embargo, la SCT efectúa un estudio o análisis anual periódico en el que obtiene diferentes índices para evaluar la magnitud del problema de accidentalidad en la red carretera federal y poder trabajar en soluciones adecuadas.

Una diferenciación de los accidentes de tránsito en las carreteras es su causa, asociada principalmente a: el conductor, peatón o pasajero, el vehículo, el camino, irrupción de ganado, agente natural. Para el análisis de la accidentalidad en la vía de competencia al proyecto propuesto se requirieron los datos históricos disponibles en el portal de la SCT, con base en esto es posible determinar que en los últimos años la ocurrencia de accidentes de tránsito ha ido disminuyendo pues en el 2012 sucedieron 858 accidentes, mientras que para el 2016 la cifra fue de 504, sin embargo, sigue siendo el índice más significativo y el tramo vial más crítico de ocurrencia de accidentes a nivel estatal.

Año	Carretera y Tramo	Longitud de camino	Accidentes				Saldos			Índice de Accidentes
			Total	Con muertos	Sólo con heridos	Equivalentes	Muertos	Heridos	Daños materiales en millones \$	
2012	México - Querétaro (Cuota) Lim. Edos. Méx./Qro. - Querétaro	66.1	280	27	104	858	31	196	19.001	0.177
2013	México - Querétaro (Cuota) Lim. Edos. Méx./Qro. - Querétaro	66.1	254	26	93	754	27	169	19.7195	0.153
2014	México - Querétaro (Cuota) Lim. Edos. Méx./Qro. - Querétaro	66.1	216	17	65	576	20	120	15.7309	0.137
2015	México - Querétaro (Cuota) Lim. Edos. Méx./Qro. - Querétaro	66.1	198	23	62	592	30	107	13.5301	0.32
2016	México - Querétaro (Cuota) Lim. Edos. Méx./Qro. - Querétaro	66.1	158	26	42	504	33	74	14.461	1.052

Nota. Para Accidentes Equivalentes: 1 muerto = 6 accidentes, 1 herido = 2 accidentes

Fig. 31 Accidentalidad 2012-2016 Carretera Federal 57 (vialidad de competencia al proyecto). Fuente: Accidentes de tránsito 2012-2016, SCT

Adicionalmente se realizó un análisis de la frecuencia de la ocurrencia de accidentes de tránsito en este mismo tramo carretero, que de manera similar a lo anterior refleja la disminución de éstos con el transcurso del tiempo, la siguiente tabla presenta los resultados obtenidos:

Tabla 6 Promedio de accidentes diarios 2012-2016. Fuente: Accidentes de tránsito 2012-2016, SCT

Año	Número de accidentes promedio diarios Carretera México – Querétaro 57 Entre Km 146 – 215
2012	2.35
2013	2.07
2014	1.58
2015	1.62
2016	1.38

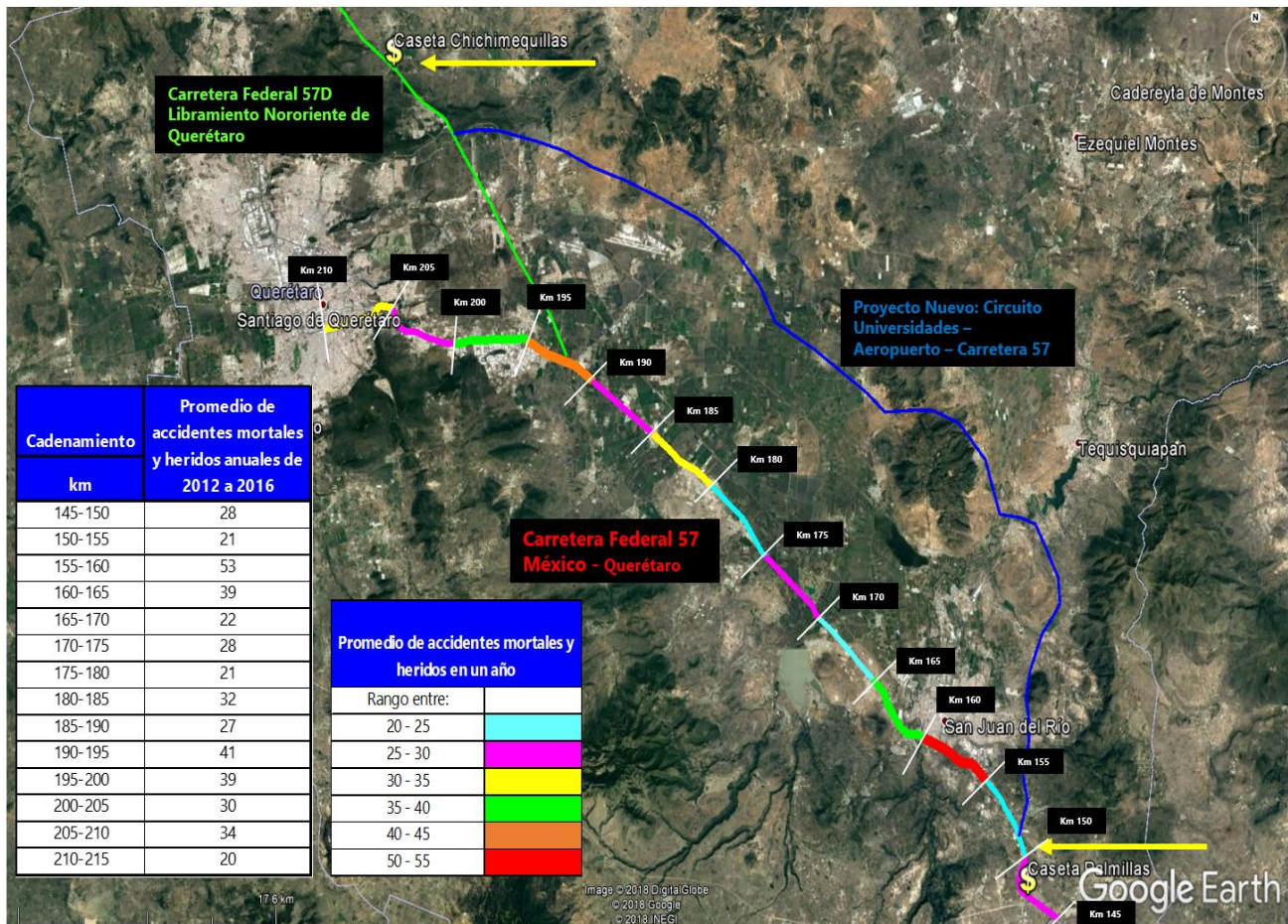


Fig. 32 Mapa temático: Número de accidentes promedio de 2012 a 2016 en los diferentes cadenamientos de la vialidad de competencia. Fuente: Accidentes de tránsito 2012-2016, SCT

El mapa temático anterior representa la magnitud de la ocurrencia promedio anual de accidentes de tránsito entre 2012 y 2016 para los diferentes cadenamientos de la carretera federal 57, tomando en cuenta sólo aquellos accidentes donde se tuvieron pérdidas humanas y/o heridos.

4.4.5 Demanda actual de la infraestructura vial existente

La observación de la demanda actual requiere observaciones origen – destino, aforos vehiculares y mediciones de viaje por la red actual. (Steer Davis Gleave y Transconsult para la SCT, 2006).

Los conteos vehiculares permiten conocer anualmente los volúmenes y la clasificación del tránsito que circula por la red vial de un área específica de interés, en México estos procedimientos son llevados a cabo tanto por organismos del sector privado, pero principalmente por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes con el propósito de profundizar en el conocimiento del transporte carretero nacional. Los datos viales pueden ser consultados abiertamente para usos diversos en estudios de transporte.

El número total de vehículos que pasan durante un periodo (días completos) igual o menor a un año y mayor que un día, dividido por el número de días del periodo, define el volumen de Tránsito Promedio Diario (TPD). De manera general se puede expresar como (Cal y Mayor R & Cárdenas G., 2007):

$$TPD = \frac{N}{1 \text{ Día} < T \leq 1 \text{ año}}$$

Donde N representa el número de vehículos que pasan durante T días. Por lo tanto, el Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA) se formula como:

$$TPDA = \frac{TA}{365}$$

Para conocer el comportamiento del tránsito vehicular (así como su composición y magnitud) sobre las vialidades del área de interés, pero sobre todo en la Carretera Federal 57 que es la vía de competencia al proyecto Universidades – Aeropuerto – Carretera 57, se requirió analizar la información disponible, por lo tanto se han consultado datos históricos de los conteos vehiculares (aforos) llevados a cabo por la SCT en casetas de cobro de peaje y algunas estaciones de aforo temporales seleccionadas:

- Caseta de cobro Palmillas (estación permanente) Carretera Federal 57 México – Querétaro
Carretera Federal 57 Km 148.50
- T. Izq. Acámbaro (estación temporal) Carretera Federal 57 libre México – Querétaro
Carretera Federal 57 Km 170.45
- Caseta de cobro Chichimequillas (estación permanente) Carretera Federal 57D Libramiento Nororiente de Querétaro
Carretera Federal 57D Km 20.32

La siguiente imagen muestra las localizaciones geográficas de los puntos de aforo vehicular enlistados y en la tabla se presentan los volúmenes vehiculares aforados en cada estación y en ambos sentidos de circulación, expresados como TDPA (Transito Diario Promedio Anual) referido en vehículos mixtos, durante un periodo de tiempo considerable (2006 – 2017):

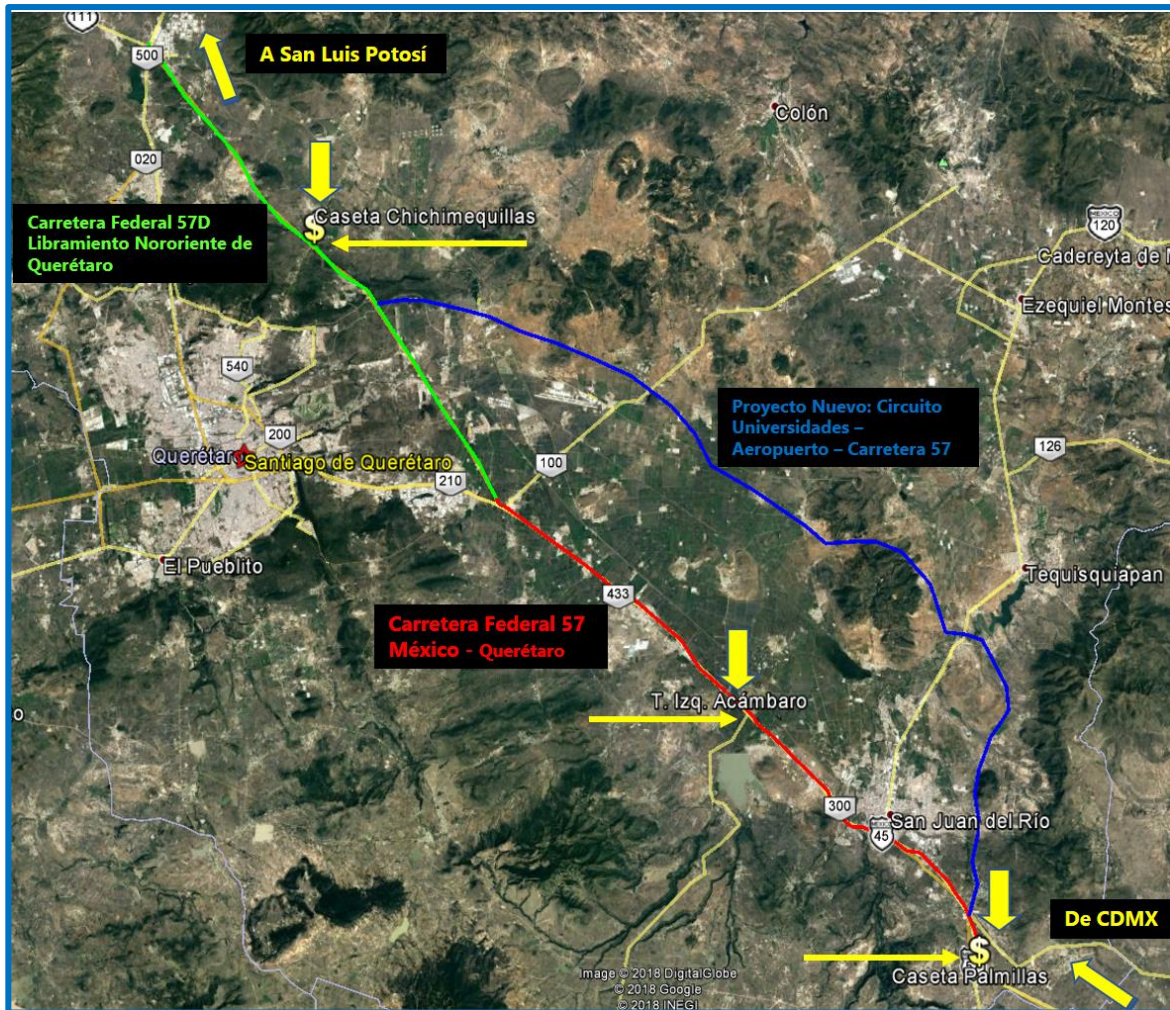


Fig. 33 Localización de puntos de aforo en las vialidades actuales del área de interés. Fuente: Datos viales SCT y Google Earth 2017

Tabla 7 Registro histórico del TDPA en las vialidades actuales del área de interés. Fuente: Datos viales 2006-2017, SCT

Año	Caseta Chichimequillas	T. Izq. Acámbaro	Caseta Palmillas
	TDPA	TDPA	TDPA
2017	17760	82144	52444
2016	16734	82641	50480
2015	15244	78367	48080
2014	14056	73156	45920
2013	13380	72919	44718
2012	12541	69038	43626
2011	12956	63371	43068
2010	11953	48075	42075
2009	10467	48258	36646
2008	12000	46342	39281
2007	11240	40600	37759
2006	10711	25820	35396

La siguiente figura representa de manera gráfica el comportamiento de los datos de la tabla anterior y ésta indica que los volúmenes vehiculares de vehículos mixtos en los tres puntos han ido incrementando a través de los últimos años, aunque el caso más notable es en el punto T. Izq. Acámbaro correspondiente a la Carretera Federal 57 km 170.45, es decir, la vialidad de competencia al proyecto propuesto, donde del año 2006 al 2017 se ha más que triplicado el volumen que circula diariamente por el tramo, lo que posiblemente justifica los malos niveles de servicio reflejados en la operación de este camino que ha sido analizado anteriormente.

Es importante observar también que en esta curva se presenta un decremento para el año 2017 lo que probablemente está asociado con la puesta en servicio del nuevo tramo carretero Palmillas – Apaseo el Grande (2017) que es un libramiento de cuota (Carretera Federal 47D) para llegar a la ciudad de Celaya, Guanajuato, sin tener que atravesar la zona urbana de Santiago de Querétaro.

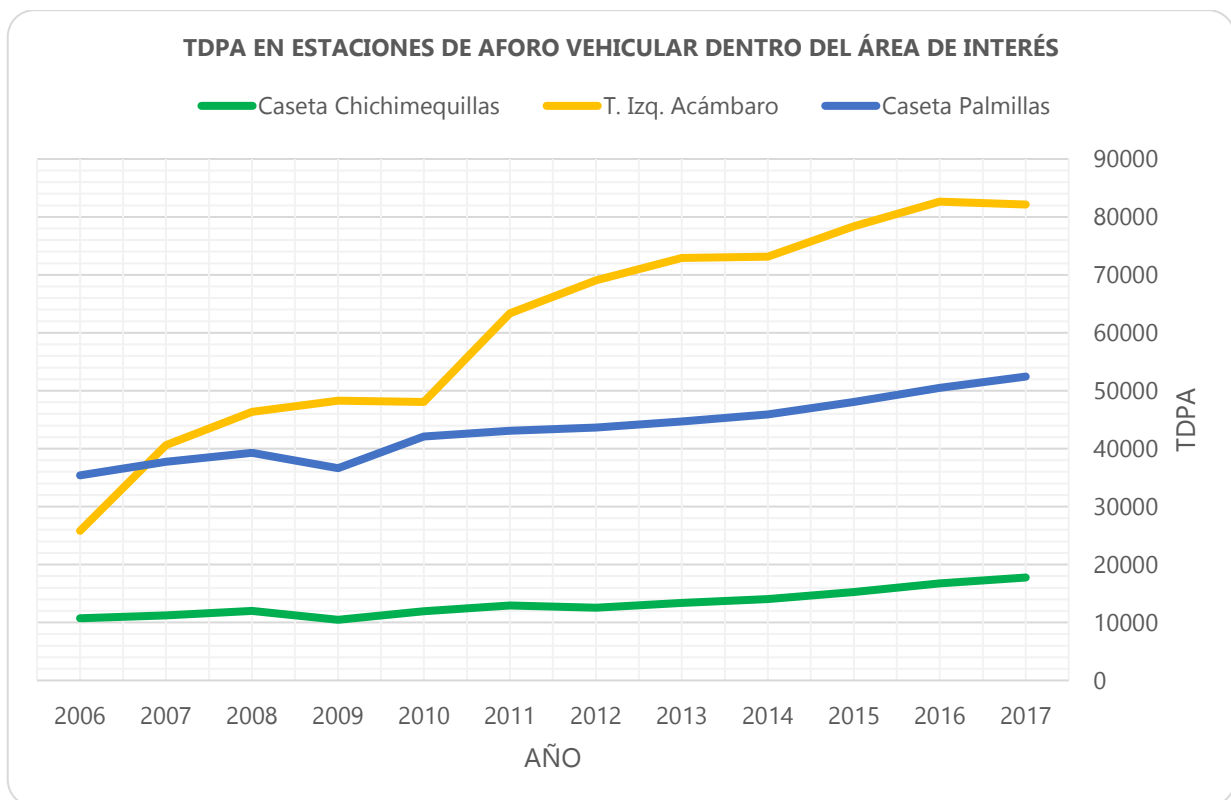


Fig. 34 Gráfica del comportamiento histórico del TDPA en las vialidades actuales del área de interés. Fuente: Datos viales 2006-2017, SCT

Consecuentemente al calcular la tasa anual de crecimiento del TDPA en cada estación de aforo se sigue corroborando el análisis previo, dado que en el punto T. Izq. Acámbaro el crecimiento ha sido considerablemente superior a los otros dos puntos analizados:

Tabla 8 Tasa de crecimiento del TPDA en las estaciones de aforo sobre las vialidades actuales del área de interés.
Fuente: Datos viales 2006-2017, SCT

TASA DE CRECIMIENTO % DEL TPDA EN LAS ESTACIONES DENTRO DEL ÁREA DE INTERÉS			
Periodo	Caseta Chichimequillas	T. Izq. Acámbaro	Caseta Palmillas
2006-2017	4.26	9.24	3.41

Dado que los todos los datos viales anteriores están referidos a totales de vehículos mixtos, es importante saber cuál es la composición vehicular que generan esas cifras, la clasificación vehicular se refiere a los tipos de vehículos que integran el tránsito, la nomenclatura utilizada por la SCT es la siguiente:

Tabla 9 Nomenclatura para la clasificación vehicular de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Fuente: Introducción a los Datos viales, SCT

Nomenclatura para la clasificación vehicular de la SCT		
A	M	Motos
	A	Automóviles
B	B	Autobuses
C	C2	Camiones Unitarios de 2 ejes
	C3	Camiones Unitarios de 3 ejes
	T3S2	Tractor de 3 ejes con semirremolque de 2 ejes
	T3S3	Tractor de 3 ejes con semirremolque de 3 ejes
	T3S2R4	Tractor de 3 ejes con semirremolque de 2 ejes y remolque de 4 ejes.
	OTROS	Considera otro tipo de combinaciones de camiones de carga.

Por conveniencia en este caso se hará uso de una agregación muy simple en la clasificación vehicular, es decir, se definirán tres segmentos como A, B y C, cada uno agrupando diferentes tipos de vehículos (Tabla anterior).

Tabla 10 TPDA como promedio ponderado del registro histórico 2006-2017. Fuente: Elaboración propia con los Datos viales de SCT

ESTACIÓN		A	B	C	TOTAL
Caseta de cobro Chichimequillas	TPDA	5302	530	7422	13254
	% TPDA	40.00%	4.00%	56.00%	100%
T. Izq. Acámbaro	TPDA	39155	3288	18390	60895
	% TPDA	64.30%	5.40%	30.20%	100%
Caseta de cobro Palmillas	TPDA	24910	1922	16459	43291
	% TPDA	57.54%	4.44%	38.02%	100%

En la tabla anterior (Tabla 10) se muestra el TDPA como un promedio ponderado del TPDA histórico, es decir, del año 2006 al 2017, referido a la segmentación definida en la tabla 8 para cada estación de aforo vehicular.

Los porcentajes obtenidos para cada grupo indican que generalmente sobre la Carretera Federal 57 (estaciones T. Izq. Acámbaro y Caseta de Cobro Palmillas) más de la mitad de los vehículos que circulan diariamente son automóviles, pero también es muy considerable la magnitud del volumen de vehículos de carga que transitan, aunque esto resulta lógico dado que este tramo carretero constituye parte del sistema de ejes troncales del país.

Por otro lado, sobre el Libramiento Nororiente de Querétaro (estación caseta de cobro Chichimequillas) la clasificación de vehículos que circulan a diario es distinta, ya que en este punto el 56% del flujo diario corresponde a camiones de carga, lo cual refleja no solo un gran desplazamiento de productos debidos a actividades comerciales e industriales sino también la disposición al pago de peajes pues se trata de un libramiento de cuota.

Es claro que los aforos y sus consecuentes datos viales no entregan información detallada por ejemplo el origen y destino de los viajes, los motivos de viaje, la frecuencia de viaje, los niveles de ingresos de los usuarios, el tipo de carga transportada, etcétera, por lo tanto, para profundizar en este aspecto es necesario realizar encuestas origen – destino (EOD). En este caso se usarán los datos disponibles de los Estudios Origen y Destino llevados a cabo por la SCT en algunas estaciones sobre las vialidades del área de interés.

4.5 Encuesta Origen – Destino

El movimiento de bienes y personas que utilizan la infraestructura carretera puede ser medido mediante Encuestas Origen – Destino para poder dar certeza de la demanda de transporte existente en una red vial. Para la elaboración de programas de construcción, modernización y conservación de carreteras es necesario conocer las características de los movimientos de personas y carga sobre la red de transporte, en este caso sobre la red carretera en estudio.

Las encuestas origen – destino permiten conocer el deseo de movilidad de los usuarios y carga, pero además es posible obtener información adicional como datos relativos al motivo de viaje, el tipo de carga o principales productos transportados, el peso de la misma, y el peso de los vehículos utilizados para ello.

Los datos obtenidos en las encuestas origen – destino efectuadas por la SCT son recolectados por entrevista directa a los conductores que transitan por el punto en estudio durante 24 horas de los días de muestreo. Su principal objetivo es poder visualizar la demanda real de transporte

y coadyuvar en la planeación de nueva infraestructura carretera y la modernización y conservación de las vialidades existentes. La cédula de encuesta aplicada a los usuarios contiene datos como:

- Ubicación y periodo del estudio
- Volumen de tránsito y composición vehicular
- El promedio de pasajeros y tripulantes en cada vehículo
- El motivo de viaje
- Toneladas transportadas por tipo de producto
- El peso bruto vehicular
- La ruta origen – destino

Para el presente estudio de caso la información utilizada para el análisis de datos origen - destino corresponde a encuestas llevadas a cabo por la SCT en algunas estaciones dentro del área de interés.

1. “P. C. Palmillas”

Carretera: México – Querétaro (Cuota) km 147+ 800

Tramo: Límites entre estados Term. México Ppia. Querétaro - T. Izq. Toluca

Origen: México

Coordenadas geográficas encuesta: (latitud, longitud) = (20.2961110,-99.9292780).

Estudio efectuado del 30 de julio al 02 de agosto de 2016

2. “Puerta de Palmillas”

Carretera: Portezuelo – Palmillas km 79 + 750

Tramo: Límites entre estados Term. Hidalgo Ppia. Querétaro – Palmillas

Origen: Portezuelo

Coordenadas geográficas encuesta: latitud, longitud (20.3109440,-99.9201110).

Estudio efectuado del 16 al 19 de julio de 2016

3. “San Sebastián”

Carretera: Toluca – Palmillas km 130 + 100

Tramo: Límites entre estados Term. México Ppia. Querétaro – T.C. (Mex-Qro Cuota)

Origen: Toluca

Coordenadas geográficas encuesta: latitud, longitud (20.2879060,-99.9322080).

Estudio efectuado del 06 al 09 de agosto de 2016



Fig. 35 Localización geográfica de estaciones de aplicación de la EOD de la SCT. Fuente: Estudio origen y destino SCT, 2016 y Google Earth, 2017

El número total de encuestas aplicadas en cada estación se detalla en la siguiente tabla, la cual primeramente separa el número de encuestas por cada estación a su vez por cada sentido de circulación y posteriormente por clasificación vehicular:

Tabla 11 Número de encuestas origen – destino en cada estación de aplicación. Fuente: Estudio origen y destino SCT, 2016

TOTAL DE ENCUESTAS ORIGEN - DESTINO POR ESTACIÓN					
Estación	Sentido	Autos A	Autobuses B	Carga C	Total
1: P.C. Palmillas	Hacia Querétaro	30834	4139	26066	61039
	Hacia Cd. De México	39567	3963	33763	77293
	Suma ambos sentidos	70401	8102	59829	138332
	Proporción del total	51%	6%	43%	100%
	TPD	17601	2026	14957	34584
2: Puerta de Palmillas	Hacia Palmillas	9102	153	4623	13878
	Hacia Portezuelo	9582	252	4255	14089
	Suma ambos sentidos	18684	405	8878	27967
	Proporción del total	67%	1%	32%	100%
	TPD	4671	101	2220	6992
3: San Sebastián	Hacia Palmillas	15204	763	5698	21665
	Hacia Toluca	15251	751	5460	21462
	Suma ambos sentidos	30455	1514	11158	43127
	Proporción del total	71%	4%	26%	100%
	TPD	7614	379	2790	10782

4.5.1 Motivo de viaje de usuarios automóbiles

En la modelización de transporte resulta muy importante conocer la variable motivo de viaje, en este caso la pregunta se aplicó sólo a los usuarios de automóvil y de vehículos unitarios, ya que en la práctica resulta razonable que el motivo de viaje de los vehículos de carga es trabajo. La segmentación efectuada para el motivo de viaje es Trabajo y Recreación, esto es una agregación bastante general para separar los viajes obligados de los que no lo son:

Tabla 12 Motivo principal de viaje de usuarios de automóvil del estudio origen – destino de SCT en cada estación de aplicación. Fuente: Estudio origen y destino SCT, 2016

MOTIVO DE VIAJE DE USUARIOS DE AUTO POR ESTACIÓN				
Estación	Sentido	Trabajo	Recreación	Total
1: P.C. Palmillas	Hacia Querétaro	10484	12411	22895
	Hacia Cd. De México	15444	15966	31410
	Suma ambos sentidos	25928	28377	54305
	Proporción del total	48%	52%	100%
	TPD	6482	7094	13576
2: Puerta Palmillas	Hacia Palmillas	2790	2397	5187
	Hacia Portezuelo	2583	2845	5428
	Suma ambos sentidos	5373	5242	10615
	Proporción del total	51%	49%	100%
	TPD	1343	1311	2654
3: San Sebastián	Hacia Palmillas	5933	3512	9445
	Hacia Toluca	5474	3673	9147
	Suma ambos sentidos	11407	7185	18592
	Proporción del total	61%	39%	100%
	TPD	2852	1796	4648

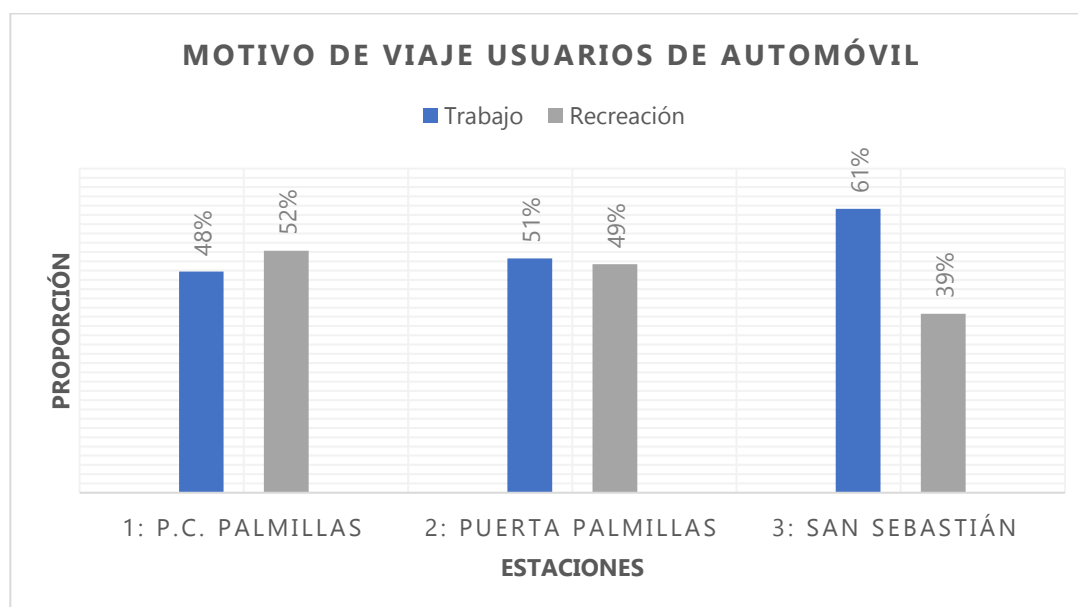


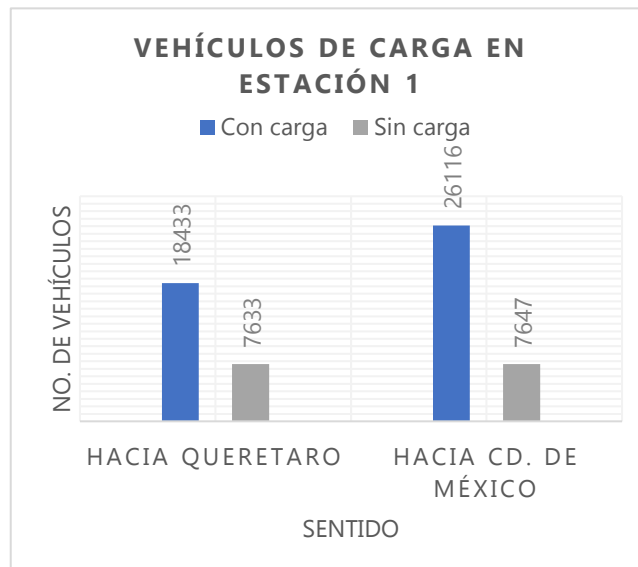
Fig. 36 Grafica: Motivo principal de viaje de usuarios de automóvil en cada estación del estudio O-D de SCT. Fuente: Estudio origen y destino SCT, 2016

4.5.2 Vehículos de carga

El número de vehículos de carga que circulan por las carreteras del área de interés pueden ser interpretados como un indicador de la magnitud de la actividad económica que se lleva a cabo en la región, pero además son un segmento de demanda muy importante en la modelización de transporte, aunque para esto se requiere un análisis más profundo encontrando los orígenes y destinos de los viajes de los vehículos de transporte de carga. Las siguientes tablas y posteriores gráficos se realizaron con base en información obtenida de las encuestas origen – destino aplicadas en el área de interés:

Tabla 13 Número de vehículos de carga en cada estación de aplicación del estudio Origen – Destino de SCT.
Fuente: Estudio origen y destino SCT, 2016

CAMIONES CARGADOS POR ESTACIÓN				
Estación	Sentido	Con carga	Sin carga	Total
1: P.C. Palmillas	Hacia Querétaro	18433	7633	26066
	Hacia Cd. De México	26116	7647	33763
	Suma ambos sentidos	44549	15280	59829
	Proporción del total	74%	26%	100%
	TPD	11137	3820	14957
2: Puerta Palmillas	Hacia Palmillas	2868	1755	4623
	Hacia Portezuelo	2353	1902	4255
	Suma ambos sentidos	5221	3657	8878
	Proporción del total	59%	41%	100%
	TPD	1305	914	2220
3: San Sebastián	Hacia Palmillas	2953	2745	5698
	Hacia Toluca	3434	2026	5460
	Suma ambos sentidos	6387	4771	11158
	Proporción del total	57%	43%	100%
	TPD	1597	1193	2790



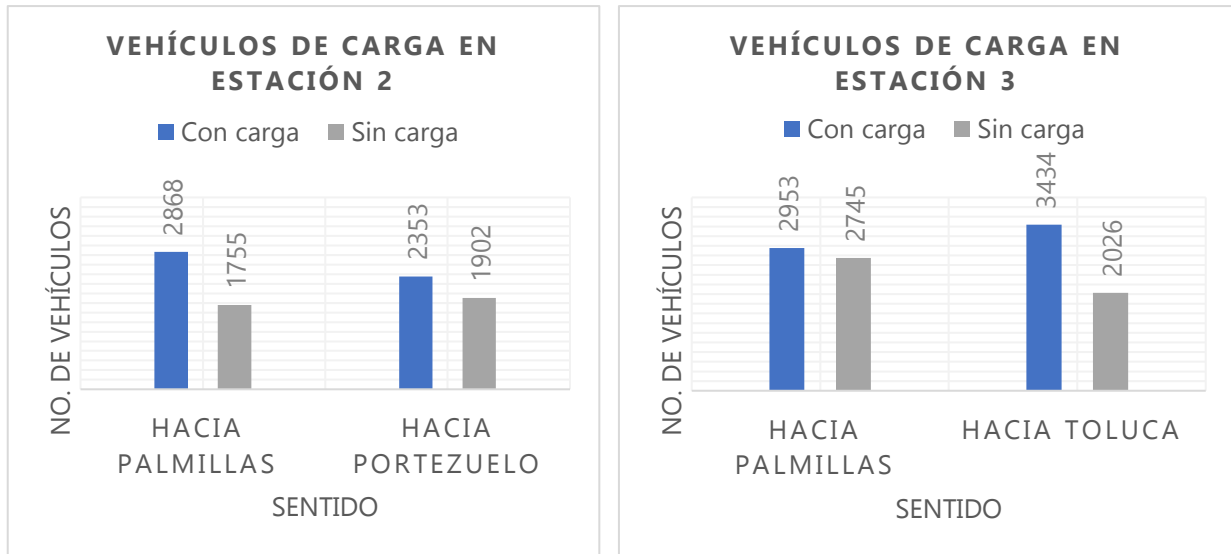


Fig. 37 Número de vehículos de carga en cada estación de aplicación del estudio Origen – Destino de SCT.
Fuente: Estudio origen y destino SCT, 2016

Los datos representados en el gráfico de la estación 1 indican probablemente que la Ciudad de México es tal vez el destino final del mayor número de vehículos de carga en ese sentido comparado con los que van en sentido opuesto; en la estación 2, un mayor volumen de vehículos transita con sentido hacia Palmillas pero en este punto no es tan evidente el destino final de los vehículos de carga dado que en la localidad de Palmillas existe la conexión con la troncal que es la carretera federal 57, por lo que se habrá de analizar con cautela el origen y destino de los viajes; en la estación 3 al igual que la estación 2, un análisis más detallado es requerido para conocer los orígenes y destinos de los vehículos encuestados.

La cantidad de vehículos encuestados en cada estación, que circulan por las vialidades del área de interés, clasificados por tipo de carga que transporta se presentan en las siguientes tablas donde la segmentación de los vehículos agrega a Camiones Unitarios y Camiones Articulados.

En las tres estaciones de la encuesta origen – destino se encontró que los principales productos transportados en camiones unitarios son en mayor magnitud productos industriales, agrícolas y animales y sus derivados, aunque el rubro *varios* es muy significativo y éste incluye a todos los productos que no fueron clasificados en los otros grupos.

Para los camiones articulados el patrón de transporte de productos se repite.

Tabla 14 Agregación de vehículos de carga respecto a su clasificación unitarios o articulados. Fuente: Estudio origen y destino SCT, 2016

AGREGACIÓN DE VEHÍCULOS DE CARGA		
Camiones unitarios	C2	Camiones unitarios de 2 ejes
	C3	Camiones unitarios de 3 ejes
Camiones articulados	T3S2	Tractor de 3 ejes con semiremolque de 2 ejes
	T3S3	Tractor de 3 ejes con semiremolque de 3 ejes
	T3S2R4	Tractor de 3 ejes con semiremolque de 2 ejes y remolque de 4 ejes.
	OTROS	Considera otro tipo de combinaciones de camiones de carga.

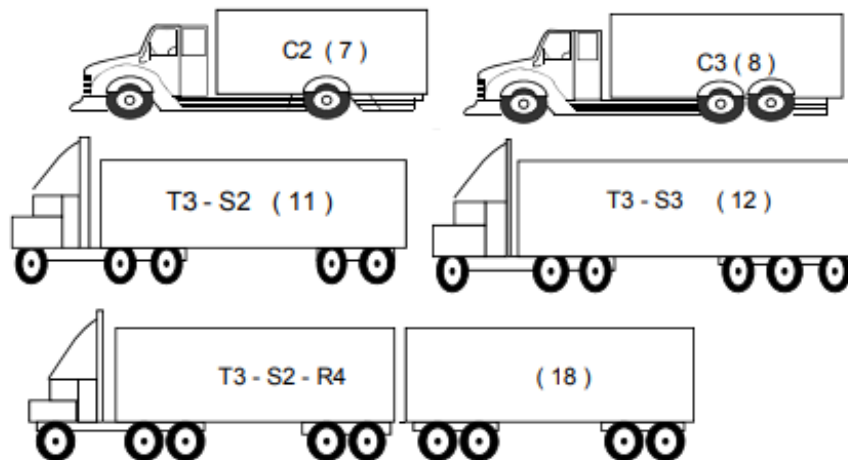


Fig. 38 Diferenciación de los vehículos de carga por la SCT. Fuente: Estudio origen y destino SCT, 2016

Tabla 15 Volúmenes de camiones unitarios clasificados por producto que transporta y en cada estación de aplicación del estudio O-D. Fuente: Estudio origen y destino SCT, 2016

VOLUMEN DE CAMIONES UNITARIOS CLASIFICADOS POR PRODUCTO QUE TRANSPORTA										
Estación	Sentido	Forestales	Agrícolas	Animales y sus derivados	Minerales	Petróleo y sus derivados	Inorgánicos	Industriales	Varios	Total
1: P.C. Palmillas	Hacia Querétaro	51	574	151	70	47	37	3231	604	4765
	Hacia Cd. De México	39	1264	451	32	65	42	4273	1103	7269
	Suma ambos sentidos	90	1838	602	102	112	79	7504	1707	12034
	Proporción del total	1%	15%	5%	1%	1%	1%	62%	14%	100%
	TPD	23	460	151	26	28	20	1876	427	3009
2: Puerta Palmillas	Hacia Palmillas	15	266	50	5	7	58	630	101	1132
	Hacia Portezuelo	3	149	33	6	10	28	788	82	1099
	Suma ambos sentidos	18	415	83	11	17	86	1418	183	2231
	Proporción del total	1%	19%	4%	0%	1%	4%	64%	8%	100%
	TPD	5	104	21	3	4	22	355	46	558
3: San Sebastián	Hacia Palmillas	15	156	86	1	14	54	1176	211	1713
	Hacia Toluca	16	218	140	10	25	51	1107	165	1732
	Suma ambos sentidos	31	374	226	11	39	105	2283	376	3445
	Proporción del total	1%	11%	7%	0%	1%	3%	66%	11%	100%
	TPD	8	94	57	3	10	26	571	94	861

Tabla 16 Volúmenes de camiones articulados clasificados por producto que transporta y en cada estación de aplicación del estudio O-D. Fuente: Estudio origen y destino SCT, 2016

VOLUMEN DE CAMIONES ARTICULADOS CLASIFICADOS POR PRODUCTO QUE TRANSPORTA										
Estación	Sentido	Forestales	Agrícolas	Animales y sus derivados	Minerales	Petróleo y sus derivados	Inorgánicos	Industriales	Varios	Total
1: P.C. Palmillas	Hacia Queretaro	145	1053	707	136	279	132	9491	1725	13668
	Hacia Cd. De México	200	2032	1595	139	342	166	11605	2768	18847
	Suma ambos sentidos	345	3085	2302	275	621	298	21096	4493	32515
	Proporción del total	1%	9%	7%	1%	2%	1%	65%	14%	100%
	TPD	86	771	576	69	155	75	5274	1123	8129
2: Puerta Palmillas	Hacia Palmillas	18	130	64	29	6	154	1273	62	1736
	Hacia Portezuelo	9	111	49	33	16	96	861	79	1254
	Suma ambos sentidos	27	241	113	62	22	250	2134	141	2990
	Proporción del total	1%	8%	4%	2%	1%	8%	71%	5%	100%
	TPD	7	60	28	16	6	63	534	35	748
3: San Sebastián	Hacia Palmillas	12	85	30	2	14	25	953	119	1240
	Hacia Toluca	13	111	98	3	29	37	1307	104	1702
	Suma ambos sentidos	25	196	128	5	43	62	2260	223	2942
	Proporción del total	1%	7%	4%	0%	1%	2%	77%	8%	100%
	TPD	6	49	32	1	11	16	565	56	736

4.5.3 Origen y destino de viajes

La información de viajes recopilada en una encuesta origen – destino puede ser usada para construir una matriz de viajes y para facilitar la revisión de dicha información respecto de los desplazamientos de los usuarios, se usan las líneas de deseo, las cuales son una representación gráfica de la magnitud de viajes entre un par de zonas origen – destino. (Olmedo López, 2013). Con base en los datos de las encuestas origen – destino de la SCT aplicadas en campo en las tres estaciones ya conocidas se construyeron las matrices de viajes con el propósito de poder identificar las principales zonas generadoras y atractoras no sólo dentro del área de interés sino también en las zonas externas dentro del área de estudio, esto con el fin de poder dar certeza e inferencia de los viajes potenciales que podría captar el proyecto carretero de cuota propuesto al ser puesto en servicio.

- **Estación 1: P.C. Palmillas**

En el mapa de la Figura 39 se representan todos los pares origen destino encontrados en la encuesta aplicada en la estación 1 “P. C. Palmillas” del estudio origen – destino, en éste se puede verificar una considerable cantidad de viajes hacia el norte del país con destinos a estados como Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí, Coahuila y Guanajuato, sin embargo, la mayor cantidad de viajes se realizan de manera local, es decir, son viajes de corta distancia y dentro de la misma área de interés (Fig. 40), por esta razón es poco probable que estos viajes puedan ser considerados como potenciales para el proyecto circuito “Universidades – Aeropuerto – Carretera 57”.

La Figura 40 muestra la magnitud de los desplazamientos dentro de la región de estudio; las principales zonas atractoras de viajes son las ciudades de Santiago de Querétaro y San Juan del Río y en menor medida los demás municipios queretanos como Tequisquiapan, Ezequiel Montes y Pedro Escobedo; los orígenes predominantes son la Ciudad de México y los estados de México e Hidalgo.

Adicionalmente de manera esquemática en la Figura 41 se representan los principales destinos de los viajes dentro el área de interés, por medio de los porcentajes de viajes con respecto del total de encuestas del estudio origen y destino.

VEHÍCULOS MIXTOS EOD SCT ESTACIÓN 1: "P. C. PALMILLAS"

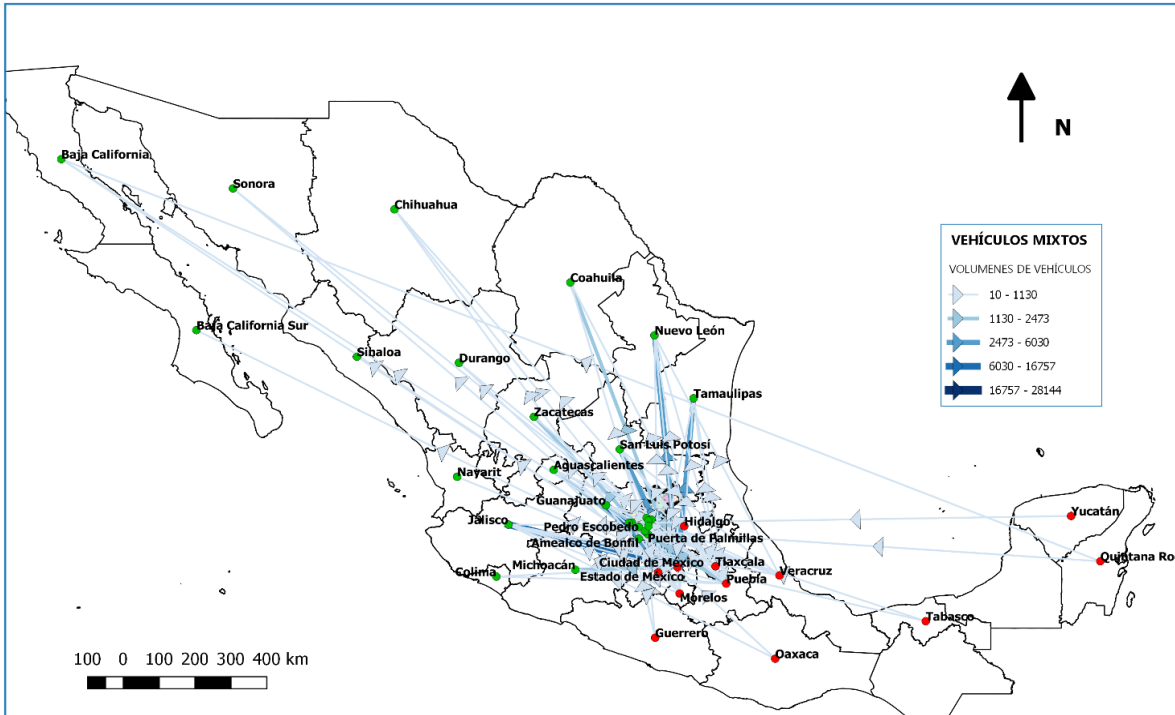


Fig. 39 Representación de pares origen – destino (líneas de deseo) de la estación 1 del estudio O-D de SCT.
Fuente: elaboración propia con datos del Estudio origen y destino SCT, 2016 e INEGI

VEHÍCULOS MIXTOS EOD SCT ESTACIÓN 1: "P. C. PALMILLAS"

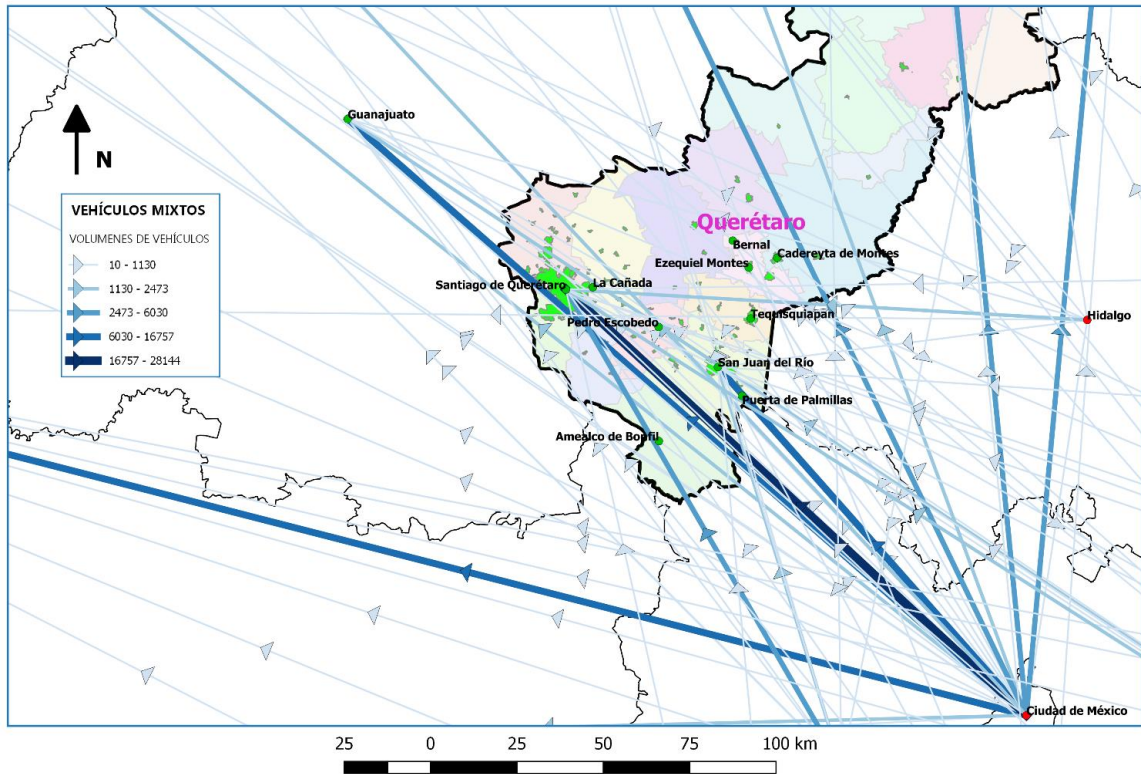


Fig. 40 Representación de pares origen – destino (líneas de deseo) de la estación 1 del estudio O-D de SCT.
Fuente: elaboración propia con datos del Estudio origen y destino SCT, 2016 e INEGI

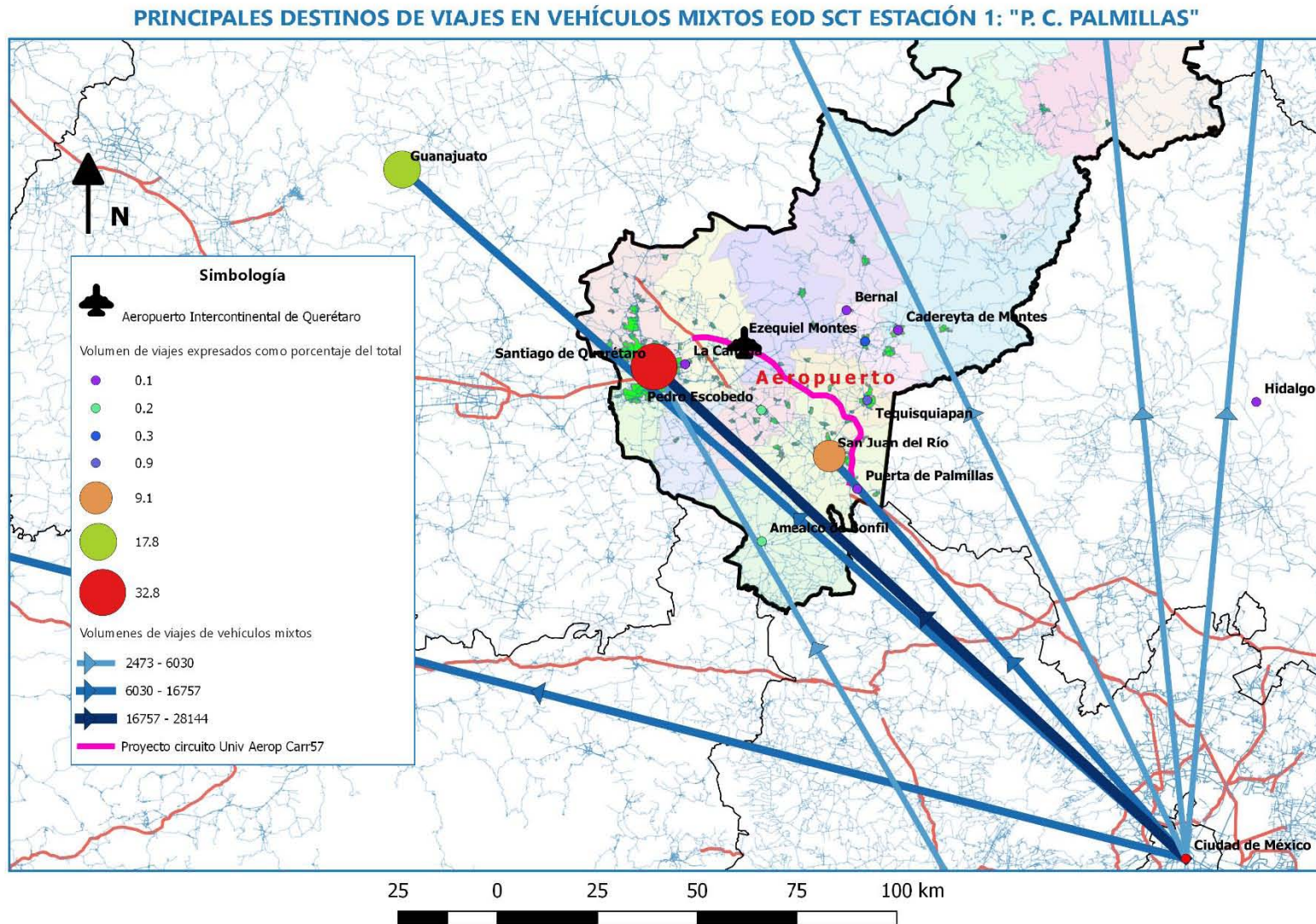


Fig. 41 Representación de los principales destinos de los viajes como porcentajes del total de viajes de la estación 1 del estudio O-D de SCT.
Fuente: elaboración propia con datos del Estudio origen y destino SCT, 2016 e INEGI

• **Estación 2: Puerta de Palmillas**

Sobre el mapa de la Figura 42 se representan todos los pares origen destino encontrados en la encuesta origen – destino aplicada en la estación 2 “Puerta de Palmillas” del estudio realizado por la SCT. A través de las líneas de deseo se observa de manera gráfica el número de viajes hacia el norte del país, los cuales podrían ser potenciales a captar por el nuevo proyecto, los usuarios con desplazamientos a destinos hacia estados como Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí y Tamaulipas por ejemplo, posiblemente serían susceptibles de usar una nueva alternativa carretera que ofrezca mejores condiciones de viaje que la alternativa actual, tales como menores tiempos lo cual se traduce en ahorros, mejores niveles de servicio, etcétera. Por otro lado, al igual que en la estación 1, al analizar la dinámica de viajes se encontró que la mayoría de éstos se realizan localmente dentro del área de interés, por lo tanto, son viajes de corta distancia (Fig. 43 y Fig. 44), y en consecuencia son poco probables de ser captados por el proyecto carretero de cuota “Universidades – Aeropuerto – Carretera 57”.

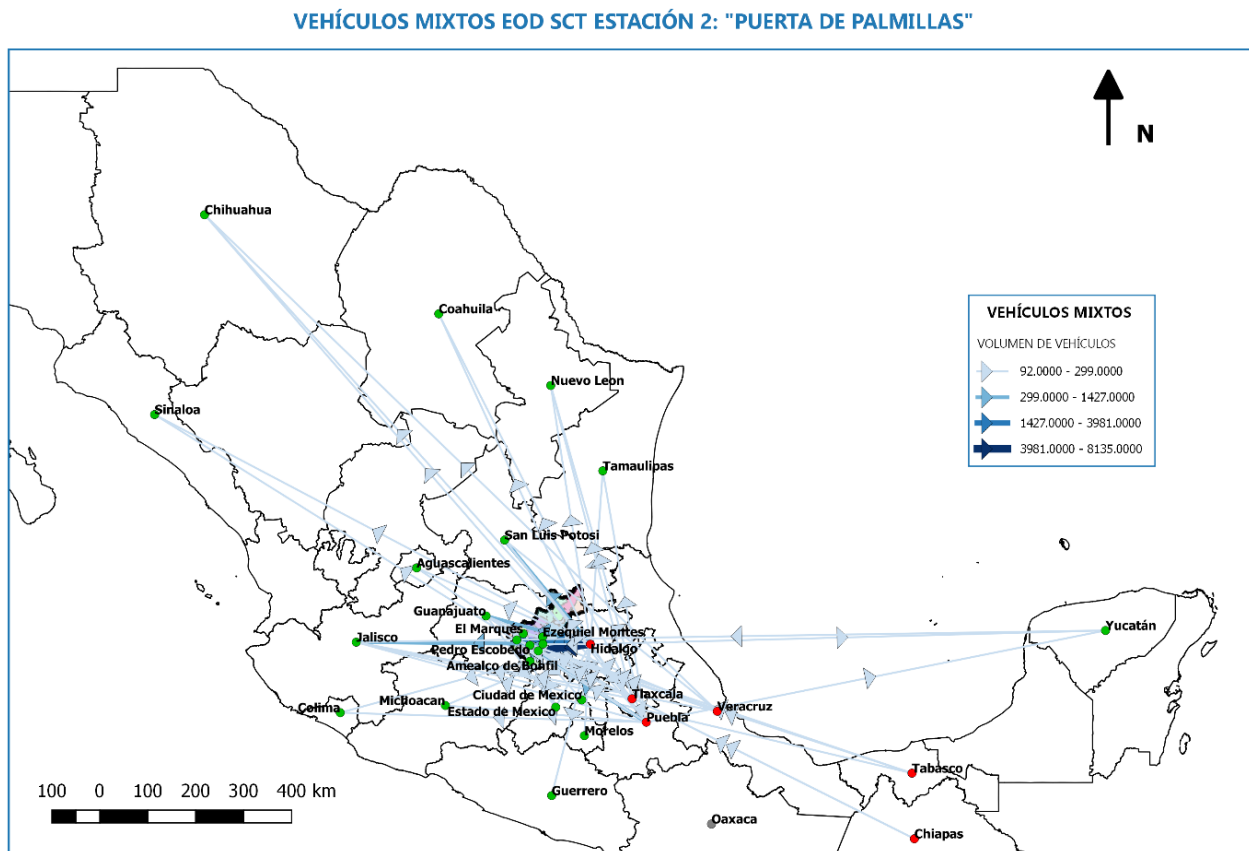


Fig. 42 Representación de pares origen – destino (líneas de deseo) de la estación 2 del estudio O-D de SCT.
Fuente: elaboración propia con datos del Estudio origen y destino SCT, 2016 e INEGI

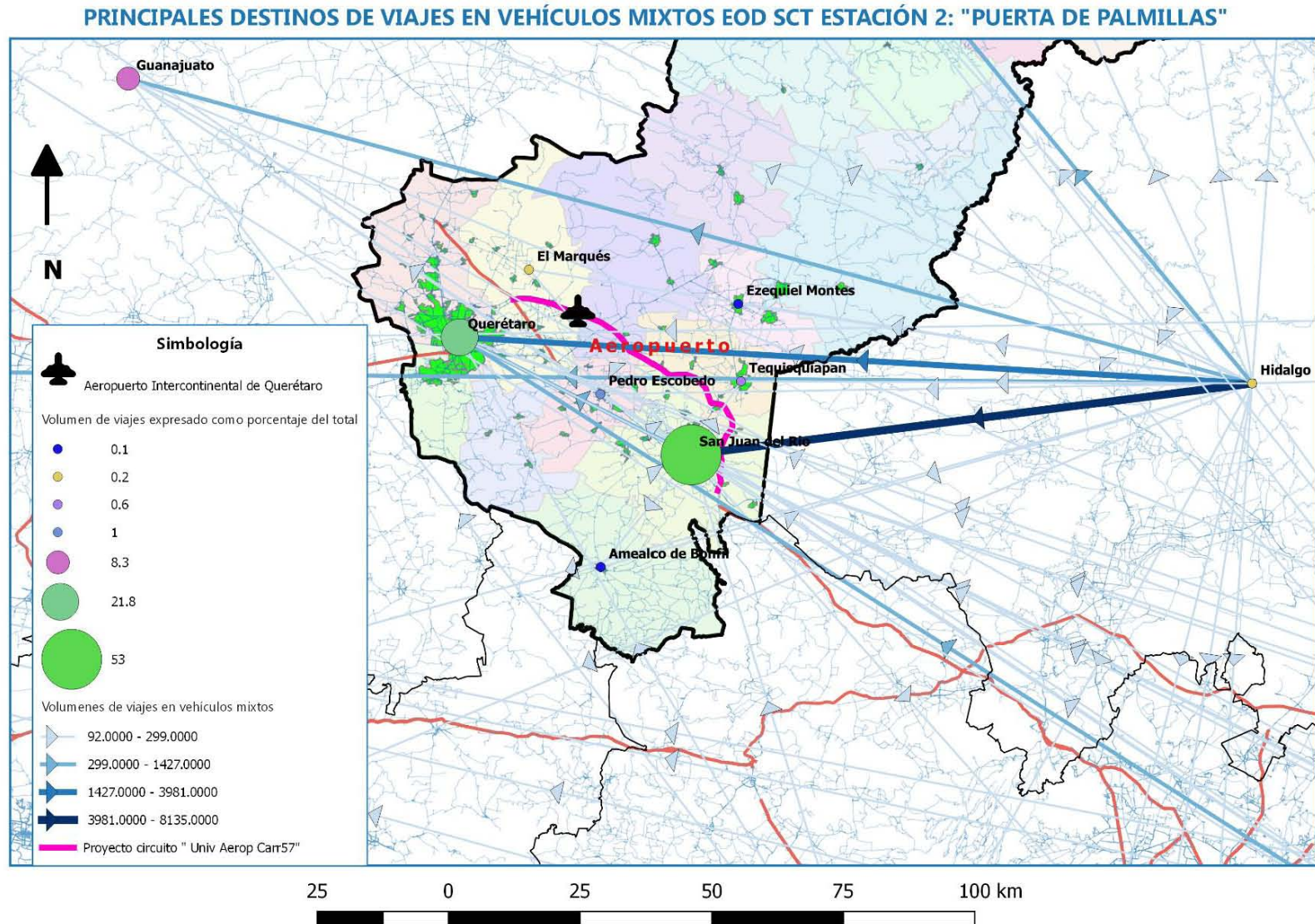


Fig. 43 Representación de los principales destinos de los viajes como porcentajes del total de viajes de la estación 2 del estudio O-D de SCT.
Fuente: elaboración propia con datos del Estudio origen y destino SCT, 2016 e INEGI

La Figura 42 muestra la magnitud de los desplazamientos dentro de la región de estudio; las principales zonas atractoras de viajes son las ciudades de San Juan del Río y Santiago de Querétaro y en menor cantidad municipios queretanos como Tequisquiapan, Ezequiel Montes y Pedro Escobedo, en las zonas externas los destinos principales son los estados de San Luis, Jalisco y Guanajuato. El estado de Hidalgo es el origen del mayor volumen de viajes del estudio efectuado por la SCT en la estación Puerta de Palmillas.

VEHÍCULOS MIXTOS EOD SCT ESTACIÓN 2: "PUERTA DE PALMILLAS"

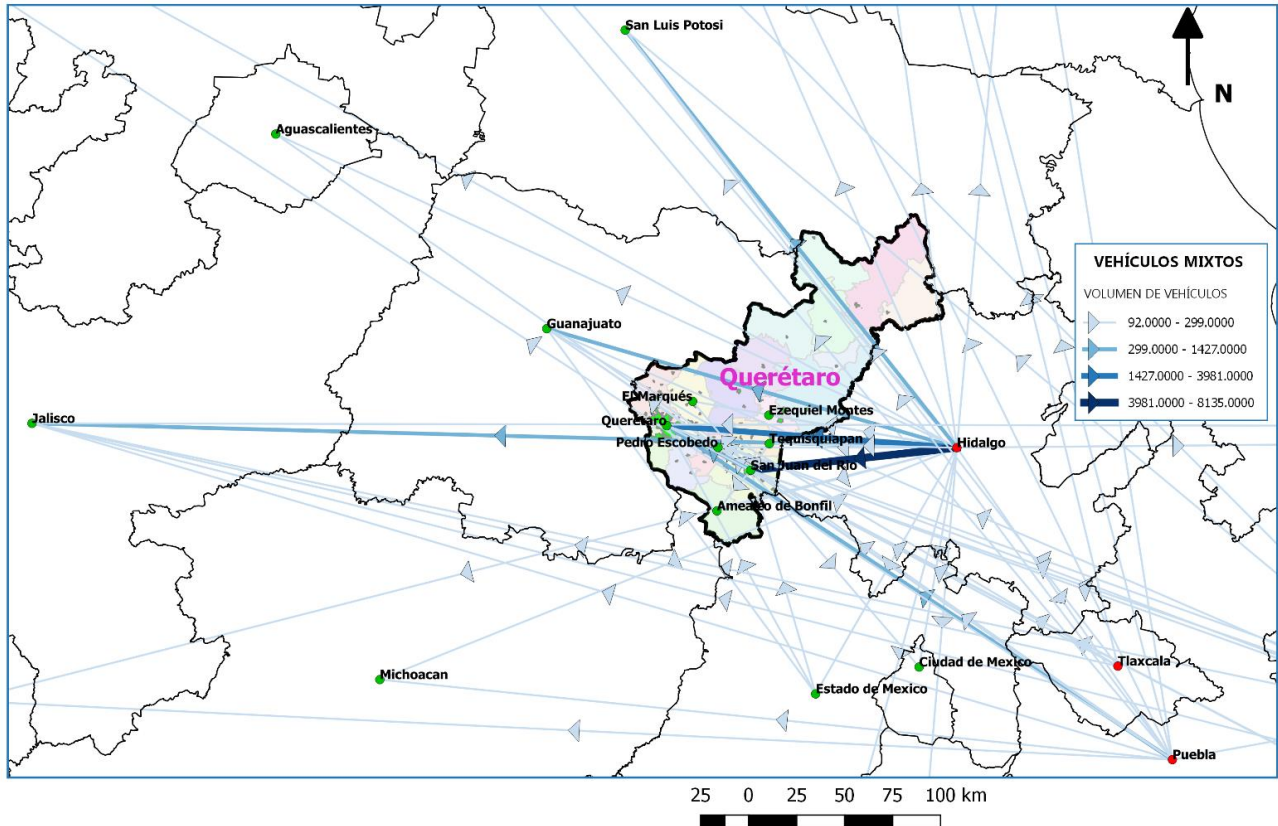
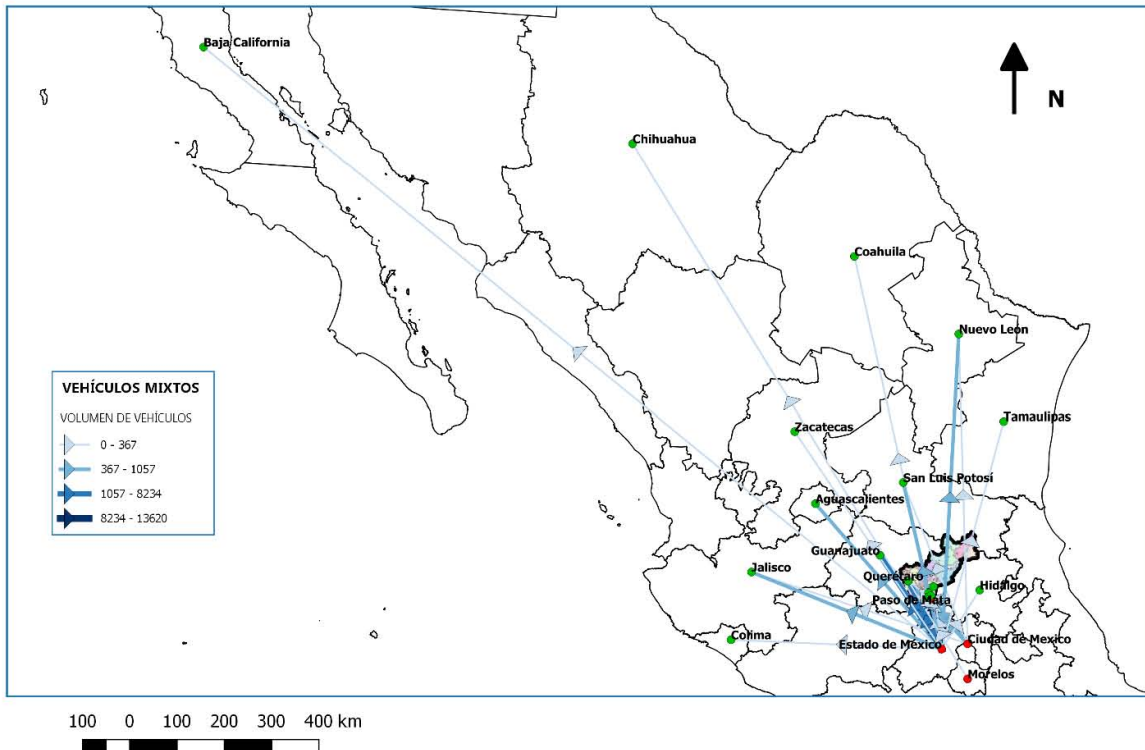


Fig. 44 Representación de pares origen – destino (líneas de deseo) de la estación 2 del estudio O-D de SCT.
Fuente: elaboración propia con datos del Estudio origen y destino SCT, 2016 e INEGI

- **Estación 3: San Sebastián**

Finalmente, en el mapa de la Figura 43 (a y b) se dibujaron todas las líneas de deseo encontrados en la encuesta origen – destino aplicada en la estación 3 “San Sebastián” del estudio realizado por la SCT. Los viajes hacia el norte del país, que podrían ser potenciales a captar por el nuevo proyecto de cuota “Universidades – Aeropuerto – Carretera 57”, son aquellos que se realizan hacia estados de la república como Nuevo León, San Luis Potosí, Coahuila, Chihuahua y Tamaulipas.

VEHÍCULOS MIXTOS EOD SCT ESTACIÓN 3: "SAN SEBASTIÁN"



VEHÍCULOS MIXTOS EOD SCT ESTACIÓN 3: "SAN SEBASTIÁN"

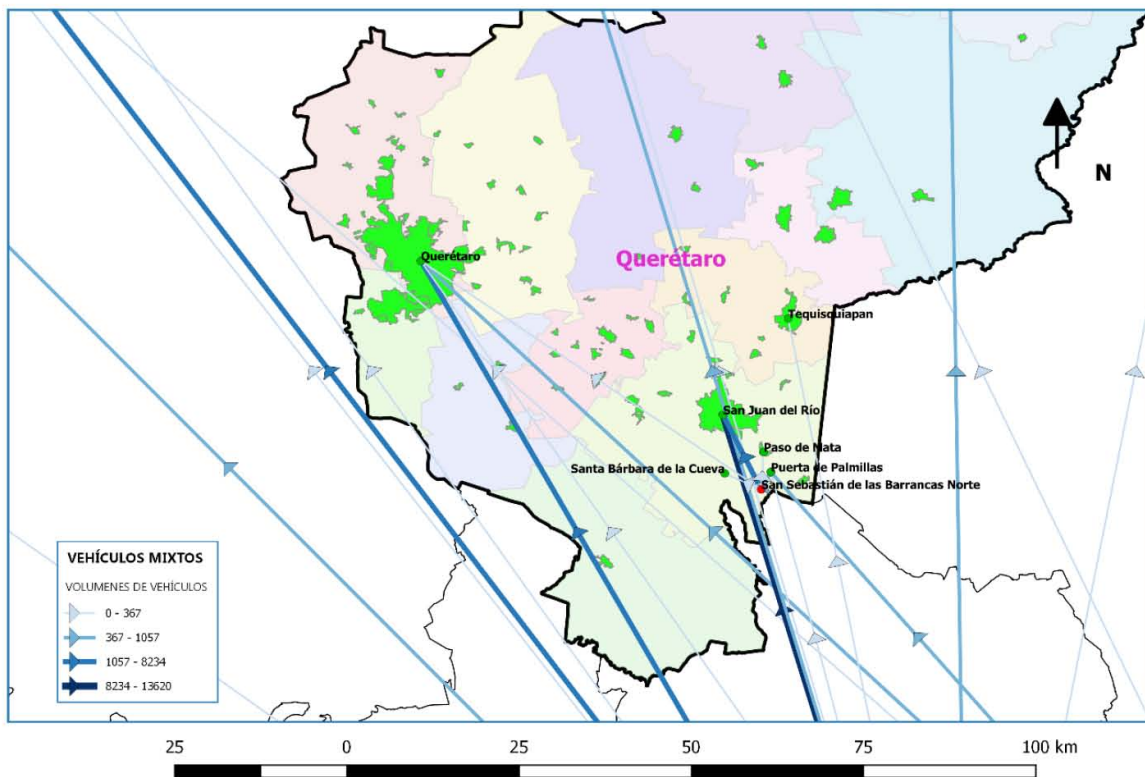


Fig. 45 Representación de pares origen – destino (líneas de deseo) de la estación 3 del estudio O-D de SCT.
Fuente: elaboración propia con datos del Estudio origen y destino SCT, 2016 e INEGI

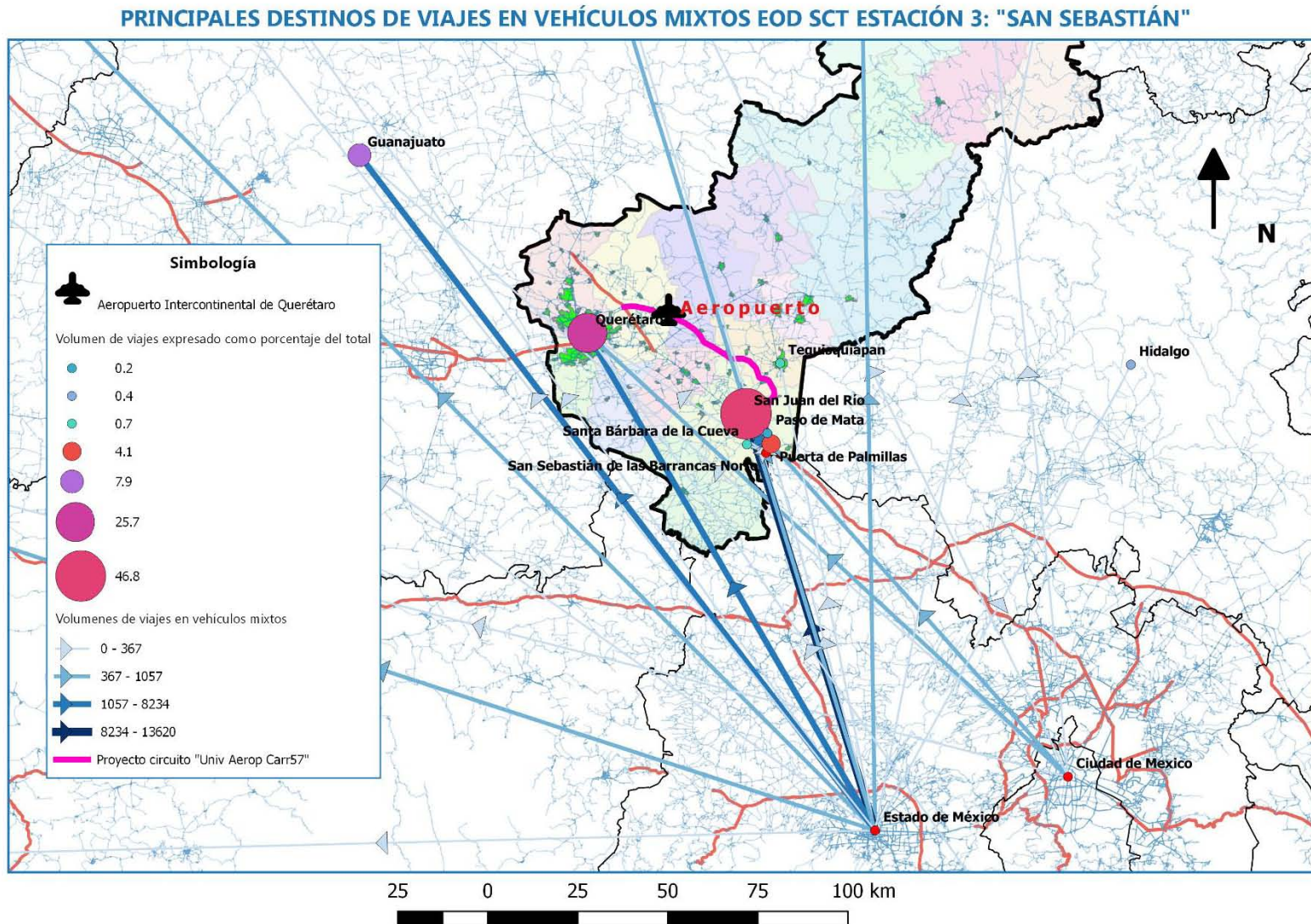


Fig. 46 Representación de los principales destinos de los viajes como porcentajes del total de viajes de la estación 3 del estudio O-D de SCT.
Fuente: elaboración propia con datos del Estudio origen y destino SCT, 2016 e INEGI

La Ciudad de México y el Estado de México son las principales zonas generadoras de viajes del estudio origen – destino y se encontró que la mayoría de estos viajes se llevan a cabo hacia zonas del Estado de Querétaro (Figura 46) como San Juan del Río y Santiago de Querétaro dentro de la zona interna del área de estudio (viajes poco probables de ser captados por el proyecto carretero de cuota) y hacia los Estados de Jalisco, Guanajuato, Aguascalientes y San Luis Potosí en la zona externa.

4.6 Viajes potenciales al proyecto

La tasa de captura de un nuevo proyecto de infraestructura carretera es el porcentaje de tráfico que efectivamente será atraído por la nueva vialidad. Los modelos de demanda tratan de estimar el tráfico estabilizado más no necesariamente el del periodo de transición, ya que cada carretera pasa por un periodo de transición (ramp – up) que inicia al ser puesta en servicio al público, hasta que el tráfico se estabiliza lo cual sucede cuando los usuarios han conocido los costos y beneficios de usarla. (Cal y Mayor R & Cárdenas G., 2007).

Los viajes potenciales a ser captados por el nuevo proyecto carretero de cuota “Universidades – Aeropuerto – Carretera 57” deben ser estimados con base en la muestra obtenida mediante la aplicación de las encuestas del estudio origen – destino dentro del área de interés. Para esto se definen las siguientes condiciones para el proyecto:

- No existe cobro de peaje por el uso del nuevo libramiento “Universidades – Aeropuerto – Carretera 57”.
- Mejor nivel de servicio de la nueva infraestructura (con respecto a la alternativa actual) y mayor conectividad con otras carreteras estatales y con el Aeropuerto Internacional de Querétaro.
- Eliminación de grandes demoras por congestión, lo que se traduce en ahorros significativos de tiempo.
- Se considera una ruta de viaje que no provoca un alejamiento o desvío considerable del destino final.

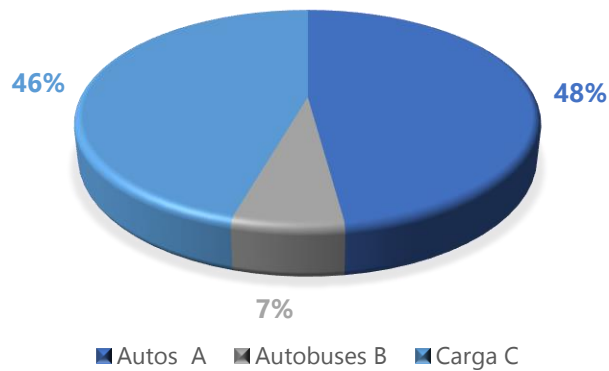
Para las tres estaciones de toma de datos se seleccionaron los viajes potenciales con base en las condiciones anteriores. El Transito Diario Promedio (TDP) se obtuvo separando los totales entre cuatro días que fue la duración del estudio origen – destino.

Tabla 17 Viajes potenciales identificados en cada estación de la aplicación de la EOD de SCT. Fuente: elaboración propia con datos del Estudio O-D, SCT 2016

VIAJES POTENCIALES DE LAS ENCUESTAS ORIGEN - DESTINO POR ESTACIÓN					
Estación	Viajes	Autos A	Autobuses B	Carga C	TDP
1: P.C. Palmillas	Totales	15114	1831	12456	29401
	Potenciales	6652	919	6329	13900
	Porcentaje	44%	50%	51%	47%
2: Puerta de Palmillas	Totales	4180	93	1672	5945
	Potenciales	1967	47	876	2890
	Porcentaje	47%	51%	52%	49%
3: San Sebastián	Totales	6580	345	2241	9166
	Potenciales	3121	180	1130	4432
	Porcentaje	47%	52%	50%	48%

Este resultado es bastante optimista ya que en todas las estaciones se obtuvieron tasas de captación de los viajes potenciales muy cercanas a la mitad del tránsito diario promedio. El resto de los viajes no podrían efectuarse a través del nuevo proyecto porque para llegar a sus destinos finales, utilizar el tramo resulta ser inconveniente o no representa una mejor alternativa en lo absoluto. Las proporciones de viajes potenciales captados por cada tipo de vehículo para cada estación del estudio se representan mediante gráficos circulares a continuación:

PROPORCIÓN VIAJES POTENCIALES EST. 1 P.C. PALMILLAS



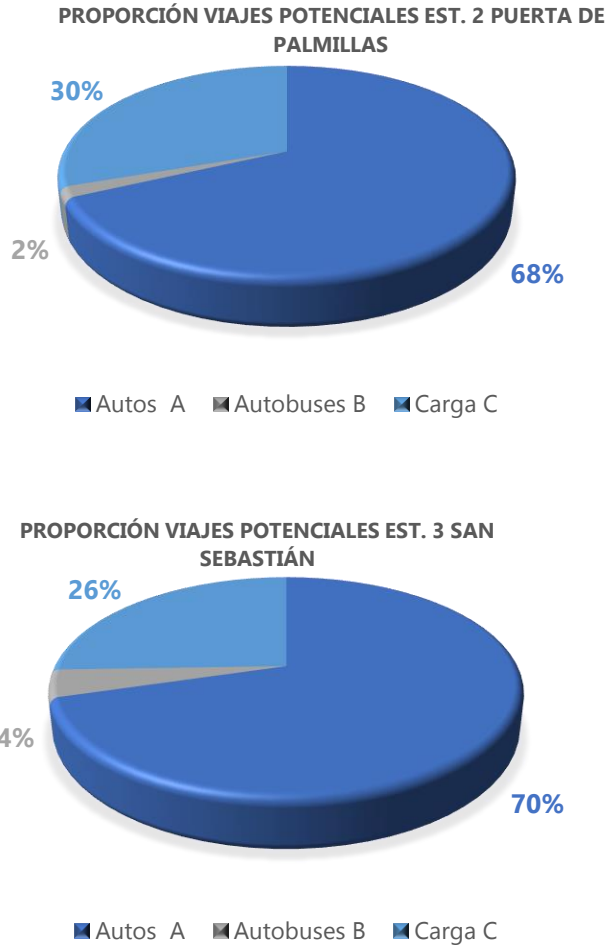


Fig. 47 Viajes potenciales identificados en cada estación de la aplicación de la EOD de SCT. Fuente: elaboración propia con datos del Estudio O-D, SCT 2016

Como era de esperarse la magnitud de viajes en vehículos de transporte de carga que pasan por la estación 1 “P. C. Palmillas” es mucho mayor en comparación a las otras dos estaciones y se explica fácilmente porque como se ha mencionada antes, la Carretera Federal 57 es del tipo ET4 y constituye parte del sistema troncal carretero del país al comunicar la región central con el norte y hasta la frontera con los Estados Unidos.

En la siguiente imagen se representan los puntos exactos de las tres estaciones de aplicación de encuestas origen – destino, también se muestra la trayectoria hipotética del proyecto propuesto y se indica la ubicación del Aeropuerto Intercontinental de Querétaro, todo esto con el propósito de coadyuvar a inferir sobre la gran conectividad que se lograría al ser puesto en servicio.

LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES ESTUDIO ORIGEN-DESTINO SCT

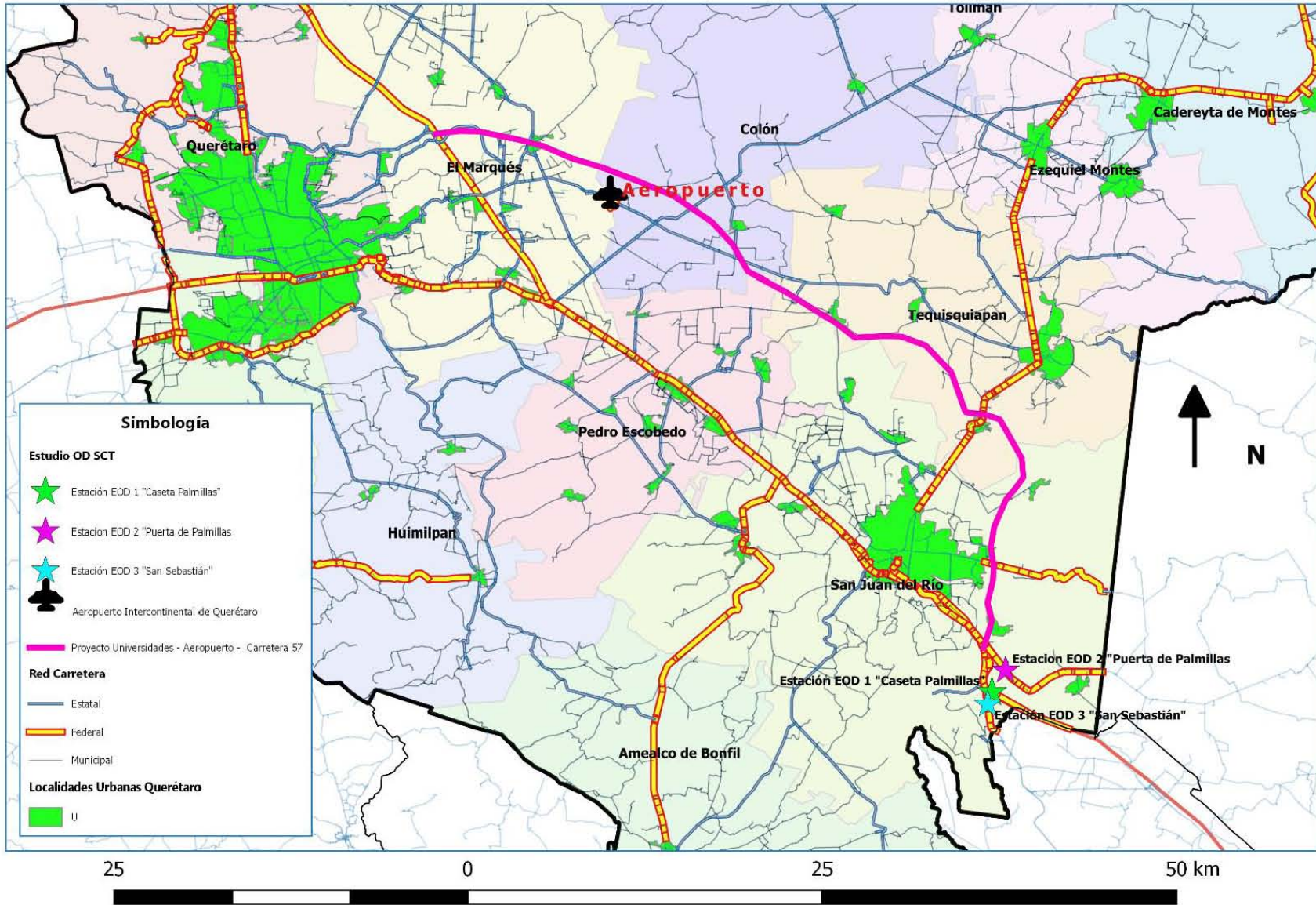


Fig. 48 Localización del proyecto: circuito "Universidades-Aeropuerto-Carretera 57" y de estaciones donde se aplicó la EOD de SCT. Fuente: elaboración propia con datos del Estudio O-D, SCT 2016

4.7 Análisis de datos de las Encuestas de Preferencias Declaradas

La recolección de datos en campo mediante Encuestas de Preferencias Declaradas consistió en la interceptación en el camino y la aplicación de un cuestionario más la presentación de seis tarjetas o escenarios hipotéticos a los usuarios de la carretera existente, de esta manera se obtuvieron los datos siguientes:

- Localización.
- Sentido de circulación.
- Origen y destino.
- Tipo de vehículo.
- Número de ocupantes.
- Motivo del viaje.
- Quién paga el viaje.
- Duración del viaje.
- Frecuencia del viaje.
- Datos socioeconómicos: Sexo, edad, ingreso mensual.

La comparación de la situación actual respecto de la situación deseada se puede efectuar mediante la presentación de escenarios hipotéticos en los cuales el usuario elige la situación que le es más conveniente respecto de los atributos de su viaje, dichos escenarios se plantean mediante diferentes tarjetas en las cuales se establecen los atributos de viaje, de esta manera el usuario elegirá de entre las situaciones presentadas, aquellas que sean las más preferidas.

Con la realización del estudio en campo se logró la aplicación de 1620 encuestas de Preferencias Declaradas, en cada punto o estación se obtuvieron las siguientes cantidades:

Tabla 18 Número de Encuestas de Preferencias Declaradas obtenidas en cada estación. Fuente: Elaboración propia con datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V.

ESTACIÓN	Encuestas aplicadas	Porcentaje %
PALMILLAS	389	24.0
CHICHIMEQUILLAS	442	27.3
CARRETERA FED 57 KM 34	479	29.6
CARRETERA ESTATAL 200	310	19.1
Total	1620	100.0

La localización geográfica de las estaciones para la recolección de la información fue la siguiente:

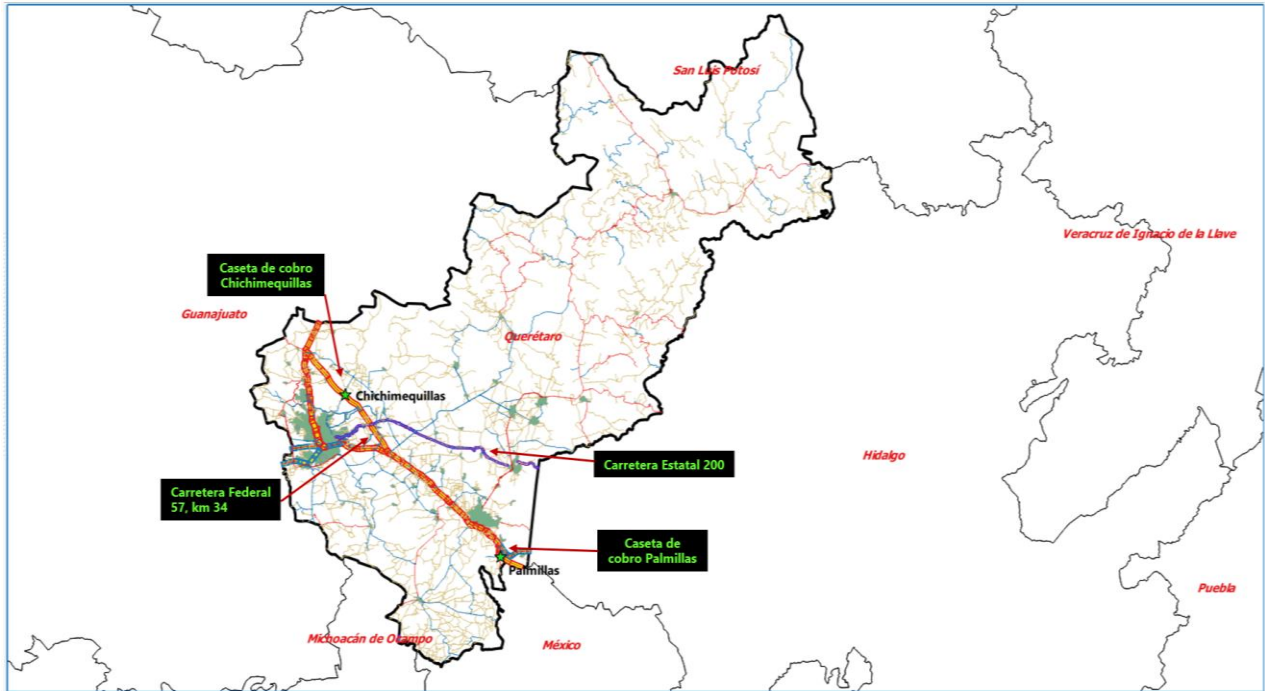


Fig. 49 Localización geográfica de las estaciones de aplicación de la EPD por interceptación. Fuente: Elaboración propia con datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V.

La información recolectada en campo es de utilidad para el análisis de dos proyectos de infraestructura carretera propuestos, en consecuencia, del total de encuestas aplicadas sólo se tomarán en cuenta para este estudio de caso, las que corresponden al proyecto "Universidades – Aeropuerto – Carretera 57":

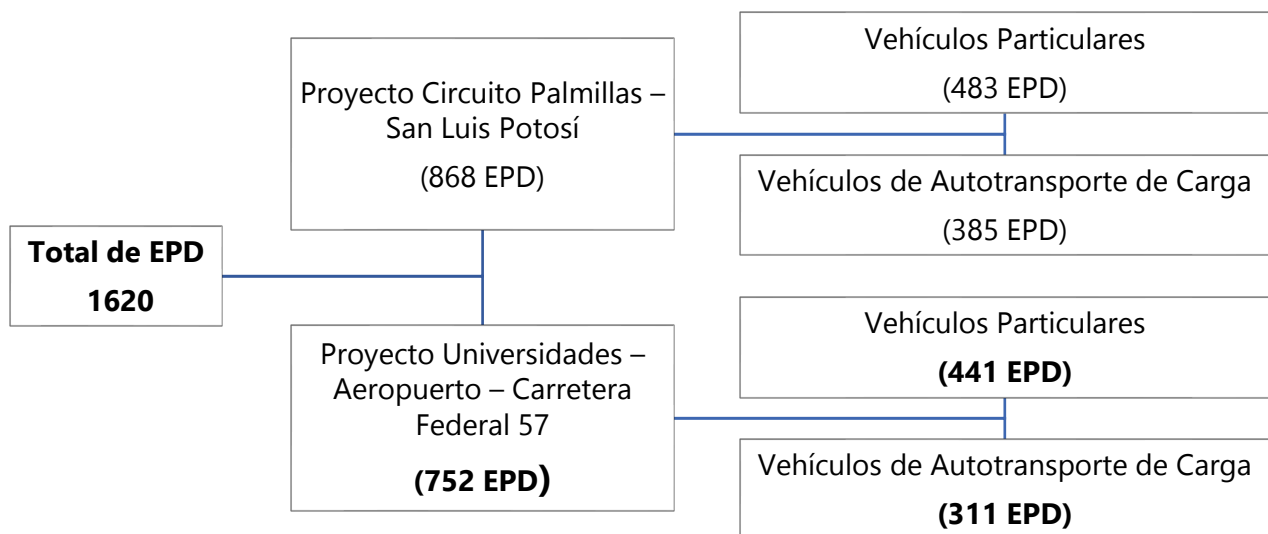


Fig. 50 Delimitación de la cantidad de EPD obtenidas para cada proyecto propuesto. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V.

La población objetivo estuvo compuesta por conductores de automóviles y vehículos de carga que transitaron por los puntos seleccionados sobre las carreteras seleccionadas, en ambos sentidos de circulación.

Se efectuó un muestreo aleatorio sistemático entre los automovilistas y transportistas que pasaron por los puntos de levantamiento de datos para realizar una entrevista de forma presencial, la información colectada se registró con ayuda de dispositivos electrónicos móviles. La fecha de aplicación de las Encuestas de Preferencias Declaradas fue: 19 – 22 de enero de 2017.

Bajo un esquema de muestreo aleatorio simple, los resultados tienen asociado un nivel de confianza del 95%. Para el proyecto circuito “Universidades – Aeropuerto – Carretera 57” el número de EPD requerido se muestra en la Tabla siguiente:

Tabla 19 Número de EPD para el proyecto circuito "Universidades-Aeropuerto-Carretera 57". Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V. y Datos viales SCT, 2016

Caseta de Cobro Chichimequillas			
	Automovilistas	Transportistas	Total
TDPA	7647	9087	16734
No. Encuestas <i>n</i>	209	233	442
Error <i>d</i>	6.7	6.7	
Carretera Estatal 200			
	Automovilistas	Transportistas	Total
TDPA	9841	2146	11987
No. Encuestas <i>n</i>	232	78	310
Error <i>d</i>	6.7	6.7	
Total de EPD proyecto “Univ-Aerop-Carr. 57”			752

El número de encuestas ***n*** se obtuvo a partir de los datos existentes del registro del TDPA (Tránsito Diario Promedio Anual) que circula por las estaciones donde se aplicó la encuesta de Preferencias declaradas durante los cuatro días del estudio, mediante la aplicación de la fórmula siguiente:

$$n = \frac{N Z_a^2 p q}{d^2 (N - 1) + Z_a^2 p q}$$

Donde:

n = Es el tamaño de la muestra (número de encuestas requeridas)

$N =$ Tamaño de la población o universo (número total de posibles encuestados)

Tabla 20 Definición del tamaño de la población N en el estudio de EPD para el proyecto circuito "Universidades-Aeropuerto-Carretera 57". Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V. y Datos viales SCT, 2016

Caseta de Cobro Chichimequillas			
	Automovilistas	Transportistas	Total
TDPA	7647	9087	16734
N	30588	36348	66936
n	209	233	442
Carretera Estatal 200			
	Automovilistas	Transportistas	Total
TDPA	9841	2146	11987
N	39364	8584	47948
n	232	78	310
Total de EPD proyecto "Univ-Aerop-Carr. 57"			752

$Z_{\alpha} =$ Es una constante que depende del nivel de confianza que se defina. El nivel de confianza establece la probabilidad de que los resultados de la investigación sean certeros, así, un nivel de confianza del 95% equivale a afirmar que es posible tener errores con una probabilidad del 5%. El valor constante Z_{α} asociado a los niveles de confianza deseados se obtienen de la tabla de la distribución normal estándar $N(0,1)$. Para el 95% el valor correspondiente es $Z_{\alpha} = 1.96$.

$d^2 =$ Error muestral deseado en porcentaje; es la diferencia que puede haber entre el resultado que se puede obtener preguntando a una muestra de la población y el que se obtendría si se preguntara al total de ella.

$p =$ Proporción de individuos que poseen en la población, la característica de estudio. Generalmente este dato es desconocido y se suele asumir $p = 0.5$

$q =$ Proporción de individuos que no poseen la característica de estudio, $q = 1 - p$

Con base en la Figura 47, para el proyecto circuito: "Universidades – Aeropuerto – Carretera 57" se dispone de 752 encuestas, la primera segmentación de demanda se efectuó respecto del tipo o clasificación vehicular de los individuos interceptados, lo cual resultó ser 441 vehículos de uso particular y 311 vehículos para autotransporte de carga. Posteriormente se ha realizado una agregación de los tipos de vehículos de las EPD de la siguiente manera:

Tabla 21 Clasificación vehicular principal en la base de datos. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V.

CLASIFICACIÓN VEHICULAR	
Vehículo Particular	Vehículos para Carga
Automóvil	Autobús
Suv	Camión de 2 ejes
Pick up	Camión de 3 ejes
Minivan	Camión de 4 ejes
	Camión de 5 ejes
	Camión de 6 ejes
	Camión de 7 ejes

A continuación, se detalla la cantidad de Encuestas de Preferencias Declaradas aplicadas para el proyecto circuito "Universidades – Aeropuerto – Carretera 57", que en total son 752 encuestas:

Tabla 22 Número de EPD para el proyecto circuito "Universidades – Aeropuerto –Carretera 57" por tipo de vehículo. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V.

DETALLE DE LA APLICACIÓN DE ENCUESTAS DE PREFERENCIAS DECLARADAS							
		TIPO DE VEHÍCULO					Total
		PARTICULAR	AUTOBÚS	2-4 EJES	5-6 EJES	7 Y MÁS EJES	
ESTACIÓN	CHICHIMEQUILLAS	206	3	27	153	53	442
	CARRETERA ESTATAL 200	228	4	63	4	11	310
Total		434	7	90	157	64	752

La recolección de encuestas en cada sentido de circulación tomando como referencia la dirección desde o hacia la Ciudad de México es la siguiente:

Tabla 23 Número de EPD para el proyecto circuito “Universidades – Aeropuerto –Carretera 57” por cada sentido de circulación. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V.

ENCUESTAS DE PREFERENCIAS DECLARADAS – SENTIDO O DIRECCIÓN				
		SENTIDO		Total
		A (HACIA LA CD. DE MÉXICO)	B (DESDE LA CIUDAD DE MÉXICO)	
ESTACIÓN	CHICHIMEQUILLAS	219	223	442
	CARRETERA ESTATAL 200	135	175	310
Total		354	398	752

4.7.1 Motivo de viaje

Como se ha mencionado anteriormente la primera gran segmentación de demanda para el análisis de los datos recolectados en campo sobre la muestra en estudio, es por un lado AUTOS PARTICULARES y por el otro VEHÍCULOS DE AUTOTRANSPORTE DE CARGA, la variable *MOTIVO* de viaje se define principalmente para diferenciar los propósitos de los usuarios para realizar sus viajes y en cierta medida poder conocer bajo qué circunstancias específicas se presentan eventos de interés para la modelación de transporte tales como la disposición del usuario a pagar un peaje por usar una ruta determinada con el fin de ahorrar tiempo. Es importante señalar que la diferenciación *MOTIVO* de viaje se efectúa para los vehículos particulares y no para los vehículos de carga, ya que para éstos últimos el *MOTIVO* de viaje se asume que es Trabajo.

Tabla 24 Motivo de viaje de usuarios de vehículos particulares en la EPD. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V.

MOTIVO DE VIAJE - VEHÍCULOS PARTICULARES					
		MOTIVO			Total
		VACACIONES	TRABAJO/ NEGOCIOS/ ESTUDIOS	OTRO	
ESTACIÓN	CHICHIMEQUILLAS	29	92	88	209
	CARRETERA ESTATAL 200	35	141	56	232
Total		64	233	144	441

Los resultados capturados y diferenciados en la tabla pueden ser inferidos gráficamente a continuación donde se observa que los motivos principales de los viajes son de naturaleza obligatoria, es decir, por *Trabajo, Negocios o Estudios*, la opción *Otros* resulta de agregar los motivos *Compras, Salud, Imprevisto familiar, Un evento, Regreso a casa, otro*.

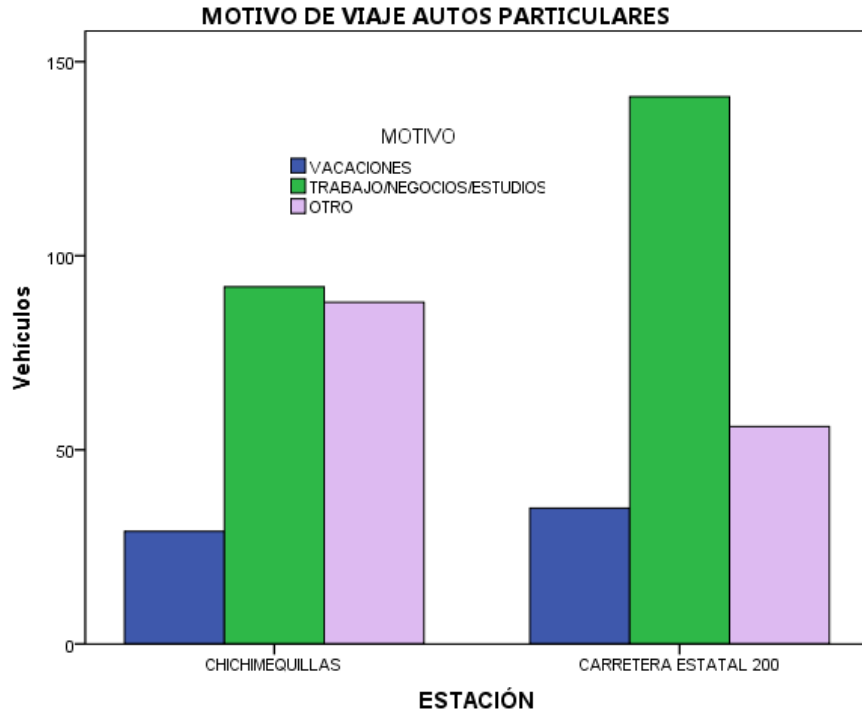


Fig. 51 Motivo de viaje de usuarios de vehículos particulares en la EPD. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V.

4.7.2 Frecuencia de viaje

La frecuencia de uso de la infraestructura carretera existente es una medida o indicador para conocer los niveles de demanda actual de la red vial y también para conocer la magnitud de viajes potenciales que los usuarios podrían realizar ante una nueva opción. A continuación, se presenta la frecuencia de viajes de los usuarios de la muestra.

Tabla 25 Frecuencia de viaje de usuarios de vehículos particulares en la EPD. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V.

FRECUENCIA DE VIAJES – VEHÍCULOS PARTICULARES							
ESTACIÓN		VECES POR MES					Total
		0 a 1	2 a 5	6 a 10	11 a 20	más de 20	
CHICHIMEQUILLAS		26	106	65	11	1	209
		12.44%	50.72%	31.10%	5.26%	0.48%	100.00%
CARRETERA ESTATAL 200		15	36	32	70	79	232
Total		6.47%	15.52%	13.79%	30.17%	34.05%	100.00%

Con la ayuda de gráficas es posible inferir que los comportamientos respecto a las frecuencias de viaje de los usuarios de vehículos particulares no siguen un patrón similar en ambas estaciones.

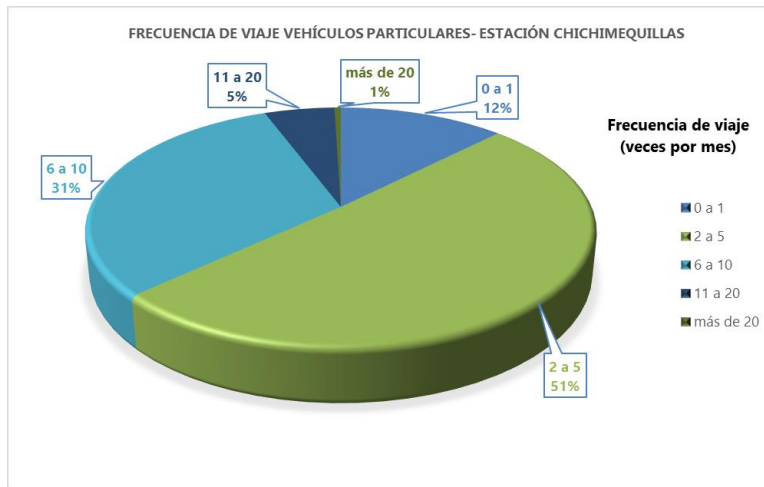


Fig. 52 Frecuencia de viaje de usuarios de vehículos particulares en la estación “Chichimequillas” de la aplicación de la EPD. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V.

Para los usuarios interceptados en la estación o caseta de cobro Chichimequillas, el 51% de éstos utilizan este tramo carretero entre 2 y 5 veces a la semana y el 31 % entre 6 y 10 veces por semana lo cual indica que cerca del 80 % de la muestra de vehículos particulares pasan de manera regular; esto es un porcentaje relativamente grande si se toma como referencia que podrían ser clientes potenciales de una nueva propuesta de infraestructura que esté directamente conectada a esta vialidad como lo sería el Proyecto Universidades – Aeropuerto – Carretera 57.

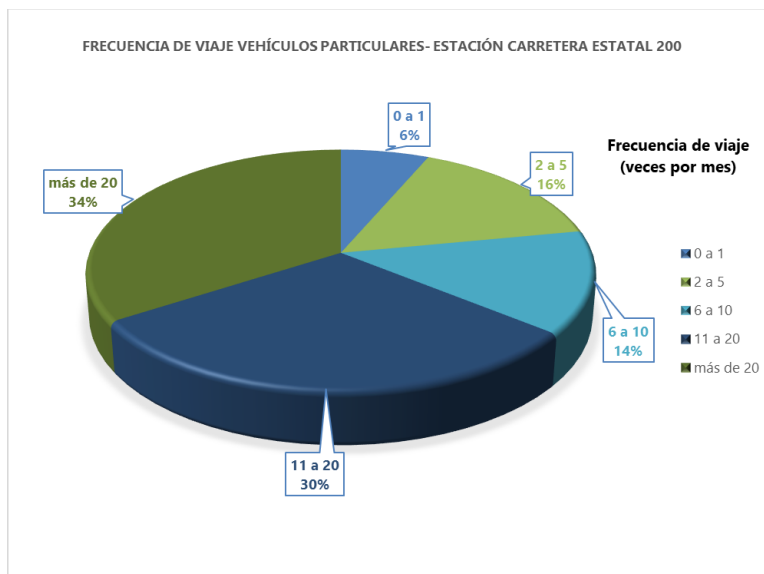


Fig. 53 Frecuencia de viaje de usuarios de vehículos particulares en la estación “Carretera estatal 200” de la aplicación de la EPD. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V.

En la estación de la Carretera Estatal 200 se encontró que alrededor del 80% de los usuarios de la muestra también de vehículos particulares hacen uso de este tramo de manera regular y es más notable que hasta el 60% pasan desde 11 y más de 20 veces al mes.

Con respecto a las encuestas aplicadas a usuarios con vehículos de carga, los datos sobre la frecuencia de viajes que se realizan también difieren considerablemente entre cada estación.

Tabla 26 Frecuencia de viaje de usuarios de vehículos de carga en la EPD. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V.

FRECUENCIA DE VIAJES – VEHÍCULOS DE CARGA							
ESTACIÓN	VECES POR MES					Total	
	0 a 1	2 a 5	6 a 10	11 a 20	más de 20		
CHICHIMEQUILLAS	7	56	102	63	5	233	
	3.00%	24.03%	43.78%	27.04%	2.15%	100.00%	
CARRETERA ESTATAL 200	5	11	11	32	19	78	
Total	6.41%	14.10%	14.10%	41.03%	24.36%	100.00%	

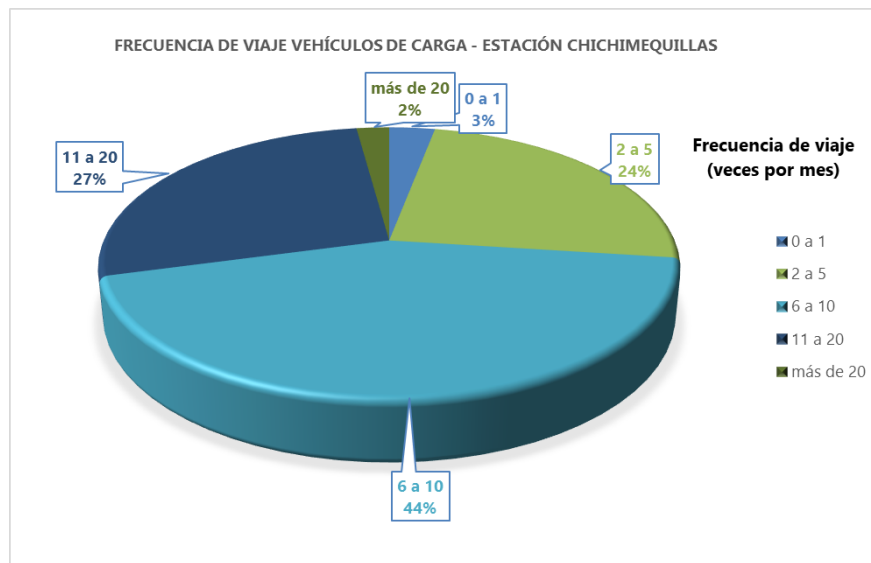


Fig. 54 Frecuencia de viaje de usuarios de vehículos de carga en la estación “Chichimequillas” de la aplicación de la EPD. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V

Mediante este análisis de los datos de la EPD se encontró que en la estación de la Caseta de cobro Chichimequillas los vehículos de carga pasan por el tramo de manera esporádica, aproximadamente el 65% de los individuos encuestados hacen uso del libramiento Noreste de Querétaro con una frecuencia de entre 2 y 10 veces por mes, por otro lado, un 27% lo hacen con mucha mayor frecuencia, es decir, hacen uso de este tramo hasta 20 veces por mes.

En contraste para los datos de los usuarios de vehículos de carga encontrados mediante la EPD en la estación de la Carretera Estatal 200, la frecuencia de uso es mucho mayor, pues el 41% de los individuos interceptados pasan de manera casi regular entre 11 y 20 veces al mes por este punto y el 24% lo hace incluso más a menudo con una frecuencia de más de 20 veces cada mes. La carretera estatal 200 es una vialidad libre de peaje, esto podría ser un factor que justifica la variación en cuanto a las proporciones de las frecuencias de uso de los vehículos de carga, considerando que el motivo primordial del viaje es Trabajo. El Figura 52 muestra las proporciones descritas:

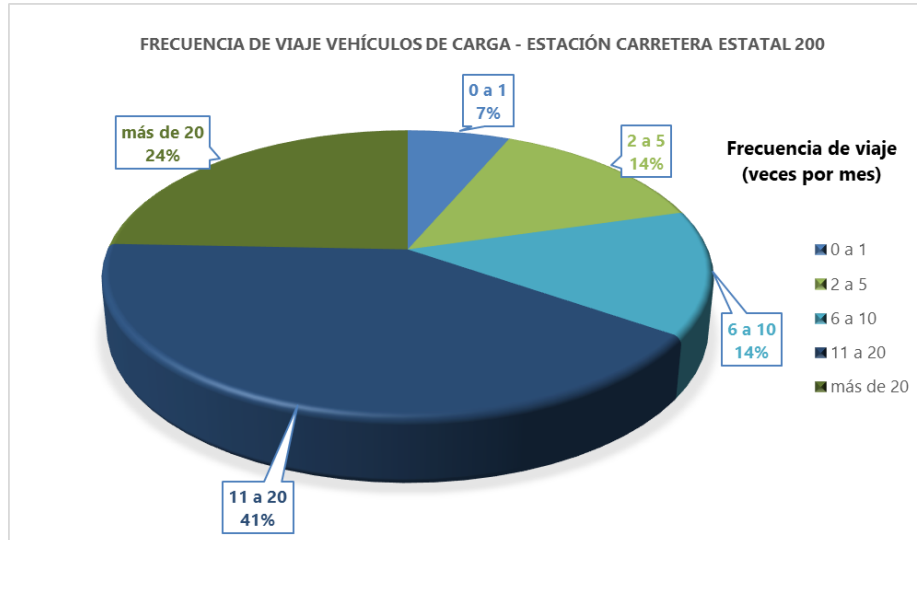


Fig. 55 Frecuencia de viaje de usuarios de vehículos de carga en la estación “Carretera estatal 200” de la aplicación de la EPD. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V.

4.7.3 Quién paga o cubre los gastos del viaje

La determinación de quién paga los gastos del viaje es importante en el sentido de que puede ayudar a establecer una relación o patrón en el comportamiento del usuario hacia el uso de una vialidad de cuota. Si los gastos del viaje son cubiertos por una empresa para la que el usuario trabaja, probablemente se preferirá la forma de viaje más segura y rápida de entre un conjunto de opciones ya que el motivo del viaje será trabajo, sin embargo, esto puede no ser siempre una realidad por lo tanto habrá que realizarse un análisis más detallado, por ejemplo, un muestreo. Para la EPD del presente estudio de caso se consideraron las respuestas de quién cubre los gastos del viaje como:

- el conductor
- la empresa para la que el usuario trabaja
- otra persona o pasajero acompañante

Al realizar el análisis correspondiente se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 27 Persona que cubre los gastos de viaje, EPD. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V.

PAGO DEL VIAJE					
		QUIÉN PAGA DEL VIAJE			Total
		EL CONDUCTOR	LA EMPRESA	OTRO PASAJERO	
TIPO DE VEHÍCULO	PARTICULAR	368	44	29	441
		83%	10%	7%	
	CARGA	0	311	0	311
		0%	100%	0%	
Total					752

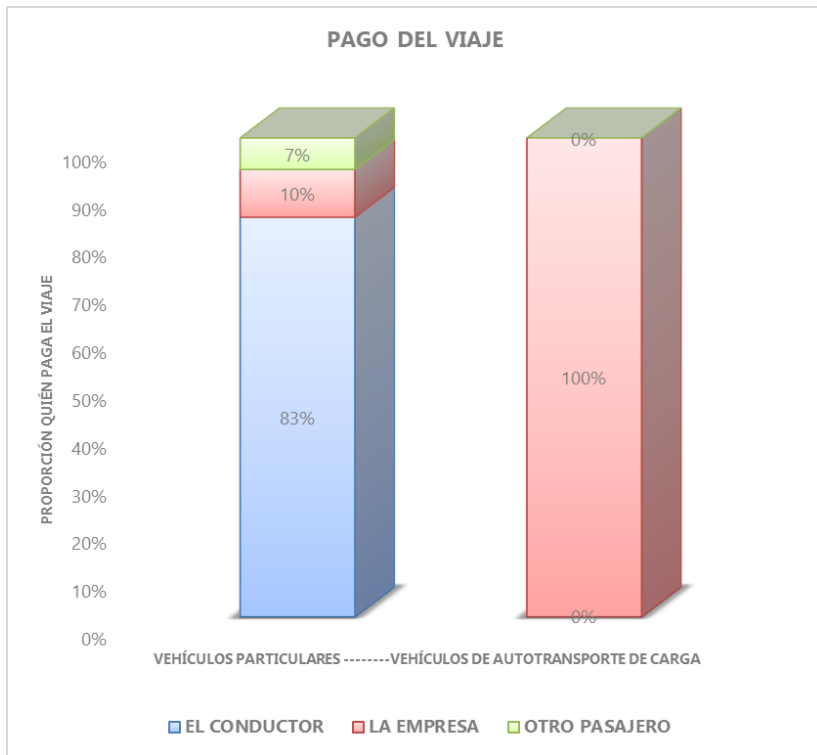


Fig. 56 Persona que cubre los gastos de viaje, EPD. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V.

Los gastos del 100% de los usuarios de vehículos de carga son cubiertos por la empresa, lo que es un indicador sobre la existencia de posibilidad de usar una opción de infraestructura que ofrezca mayor seguridad, conectividad y reduzca el tiempo de viaje. Por otro lado, para los usuarios de vehículos particulares en la muestra se puede comprobar que la mayoría (83%) se hacen cargo de sus propios gastos de viaje.

Adicionalmente se estableció una pregunta de escalamiento en la cual se usaron las respuestas definidas en una escala semántica:

¿Qué tan probable es que utilice el nuevo tramo una vez que sea puesto en servicio/circulación?

- 1 = Muy probable.
- 2 = Probable.
- 3 = Poco probable.
- 4 = Nada probable.
- 8 = No sabe.

Las respuestas de los usuarios de la muestra son consistentes con la necesidad de una nueva alternativa de infraestructura de cuota en el área de estudio:

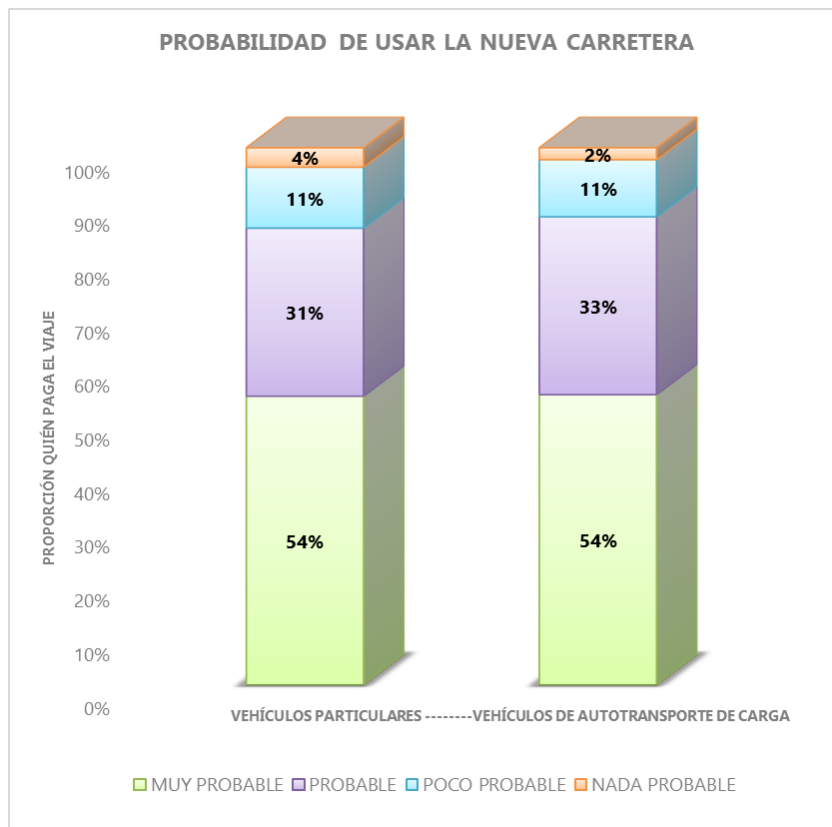


Fig. 57 Qué tan probable sería el uso del nuevo tramo carretero, EPD. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V.

Se obtuvo que más del 50% de los usuarios tanto de vehículos particulares como vehículos de autotransporte de carga de la muestra estarían dispuestos a usar una nueva alternativa de carretera de cuota con base la comparación de atributos de las alternativas actual y propuesta, si ésta última se pusiera en servicio u operación a corto plazo.

4.8 Orígenes y destinos encontrados en la EPD

Para conocer los pares Origen –Destino principales encontrados en la EPD de los usuarios de la red vial existente, se elaboró un análisis gráfico donde se usó la segmentación de demandas definida previamente, es decir por un lado para Vehículos particulares y por el otro los Vehículos de Autotransporte de carga.

La Figura 55 muestra las líneas de deseo o flujos de viajes entre pares origen - destino de los usuarios de vehículos particulares interceptados en las dos estaciones donde se recolectaron los datos:

Estación 1: caseta de cobro Palmillas

Estación 2: Carretera Estatal 200

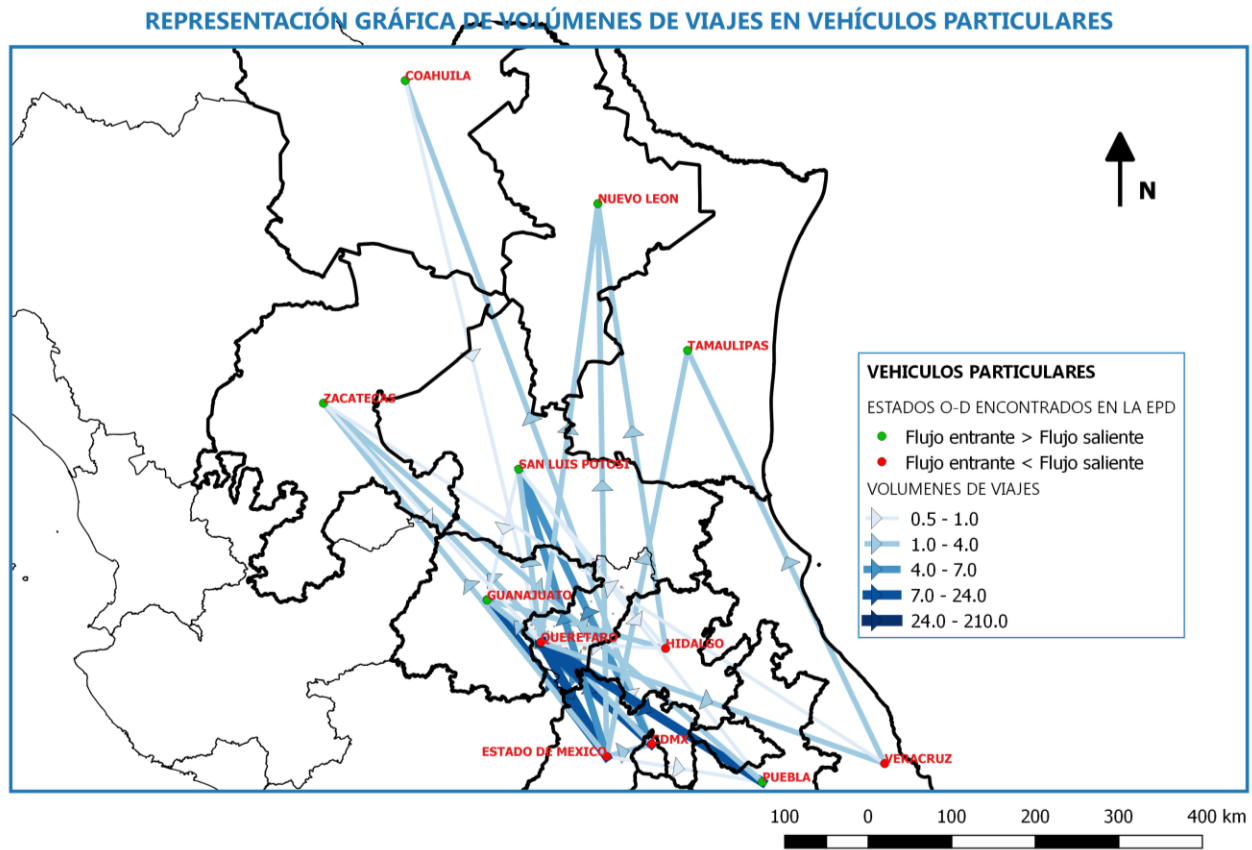


Fig. 58 Representación gráfica de pares O-D (mediante líneas de deseo) de los usuarios de vehículos particulares en la EPD. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V. e INEGI 2017 (datos geográficos)

Los mayores flujos ocurren entre la Ciudad de México, los Estados de México, Puebla, Querétaro, Guanajuato y San Luis Potosí. En los mapas siguientes se detallan gráficamente la magnitud de viajes hacia los destinos encontrados desde cada estación donde se recolectaron los datos.

- Estación 1 Caseta de cobro Chichimequillas: se encontró que hacia el norte los destinos que reciben mayor flujo de viajes son Guanajuato, San Luis Potosí y Zacatecas; hacia el sur el Estado de México, la Ciudad de México y Puebla resultan ser los receptores del mayor número de viajes de los usuarios de la muestra; cabe mencionar que también se presenta un gran número de viajes intrazonales, es decir, con origen y destino en Querétaro.

REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE VOLÚMENES DE VIAJES EN VEHÍCULOS PARTICULARES EN LA ESTACIÓN CHICHIMEQUILLAS

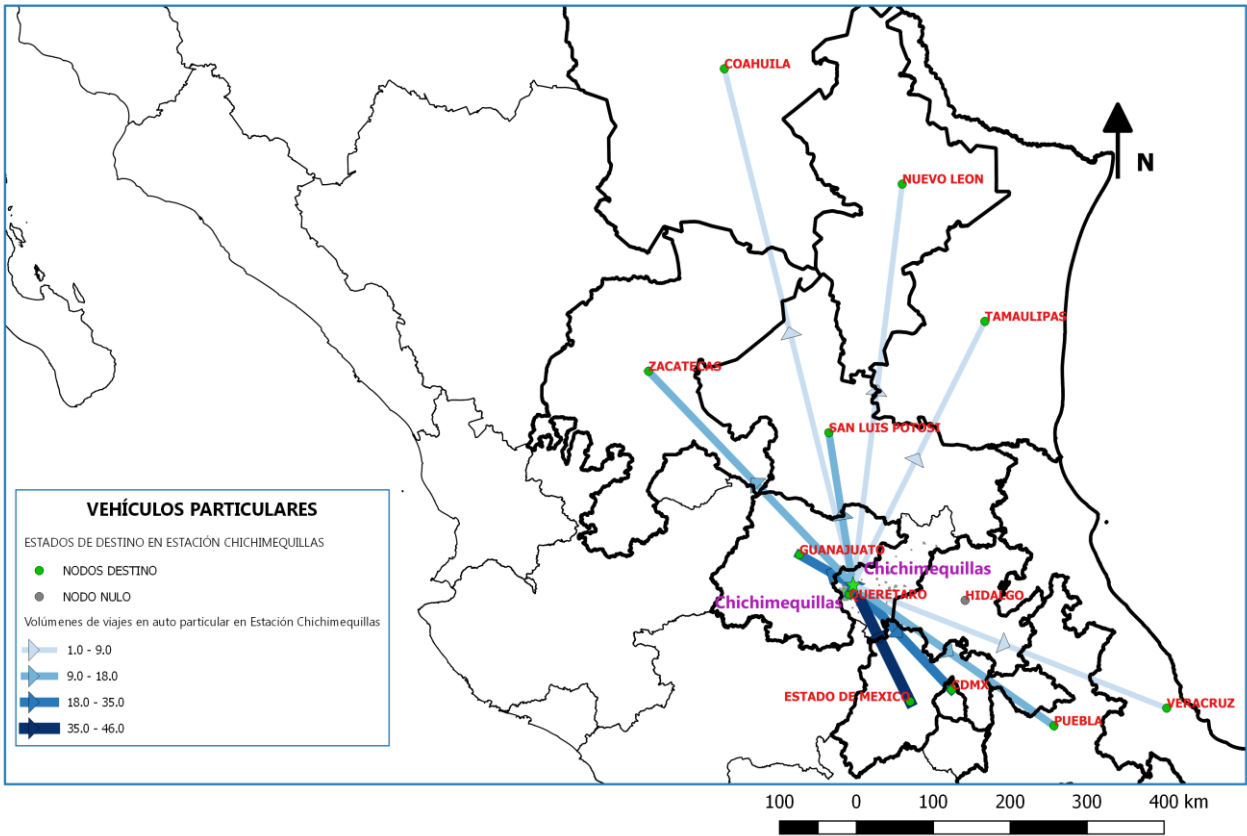


Fig. 59 Pares O-D (mediante líneas de deseo), usuarios de vehículos particulares Estación Chichimequillas.
 Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V. e INEGI, 2017 (datos geográficos)

- Estación 2 Carretera Estatal 200: la mayor proporción de viajes de vehículos particulares tienen como destino el estado de Querétaro y San Luis Potosí hacia el norte y el Estado de México, la Ciudad de México y Puebla hacia el sur.

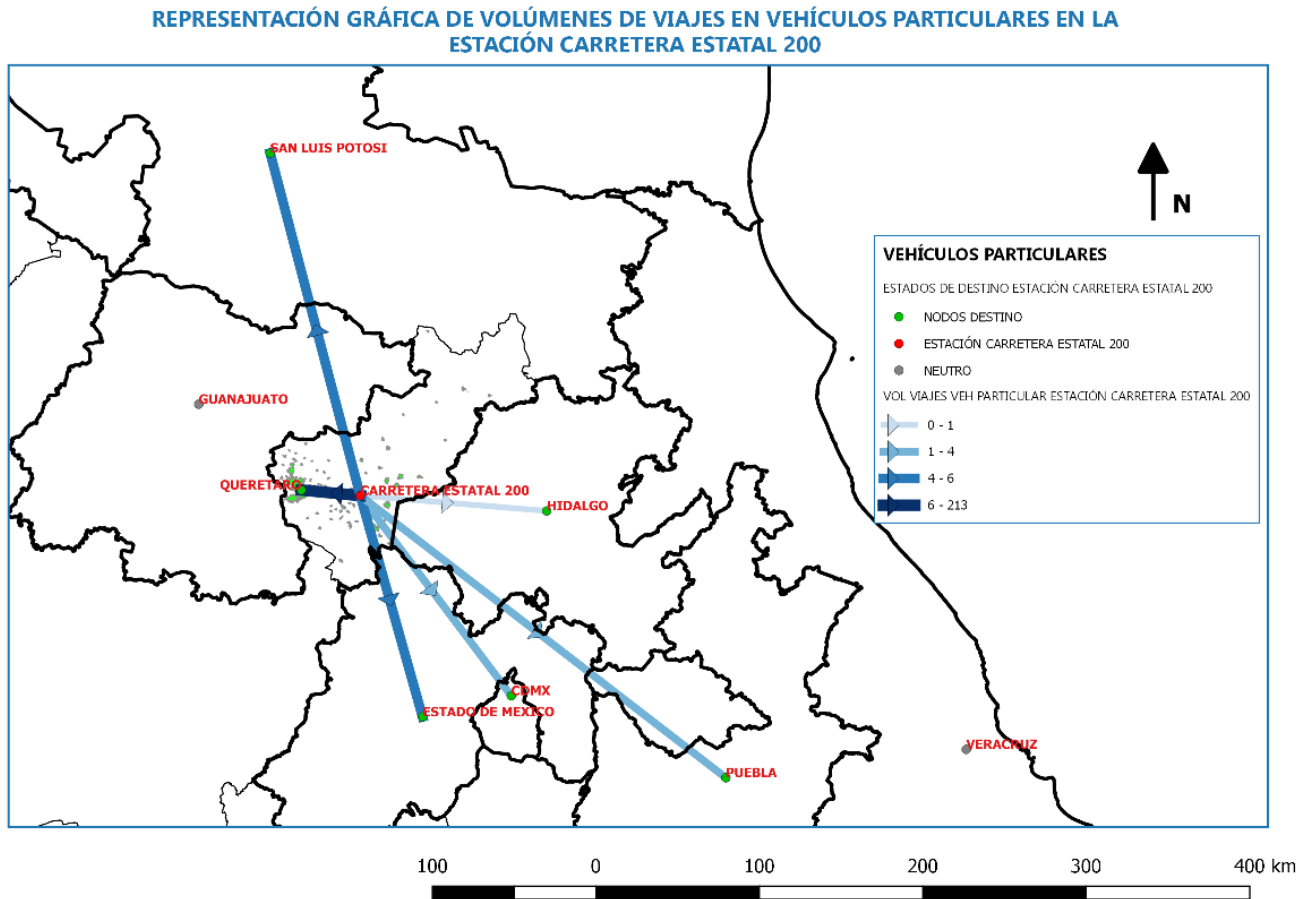


Fig. 60 Pares O-D (mediante líneas de deseo), usuarios de vehículos particulares Estación Carretera Estatal 200.
Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V. e INEGI, 2017 (datos geográficos)

La Figura 58 muestra las líneas de deseo o volúmenes de viajes entre pares origen - destino de los usuarios de vehículos de autotransporte de carga interceptados en las dos estaciones donde fueron recolectados los datos:

Estación 1: caseta de cobro Palmillas

Estación 2: Carretera Estatal 200

Se puede determinar que la Ciudad de México y los Estados de Querétaro, México, Puebla, Veracruz, Guanajuato, Tamaulipas, San Luis Potosí, Aguascalientes y Zacatecas son los orígenes y destinos principales de los viajes de los usuarios de vehículos de carga encontrados en la EPD

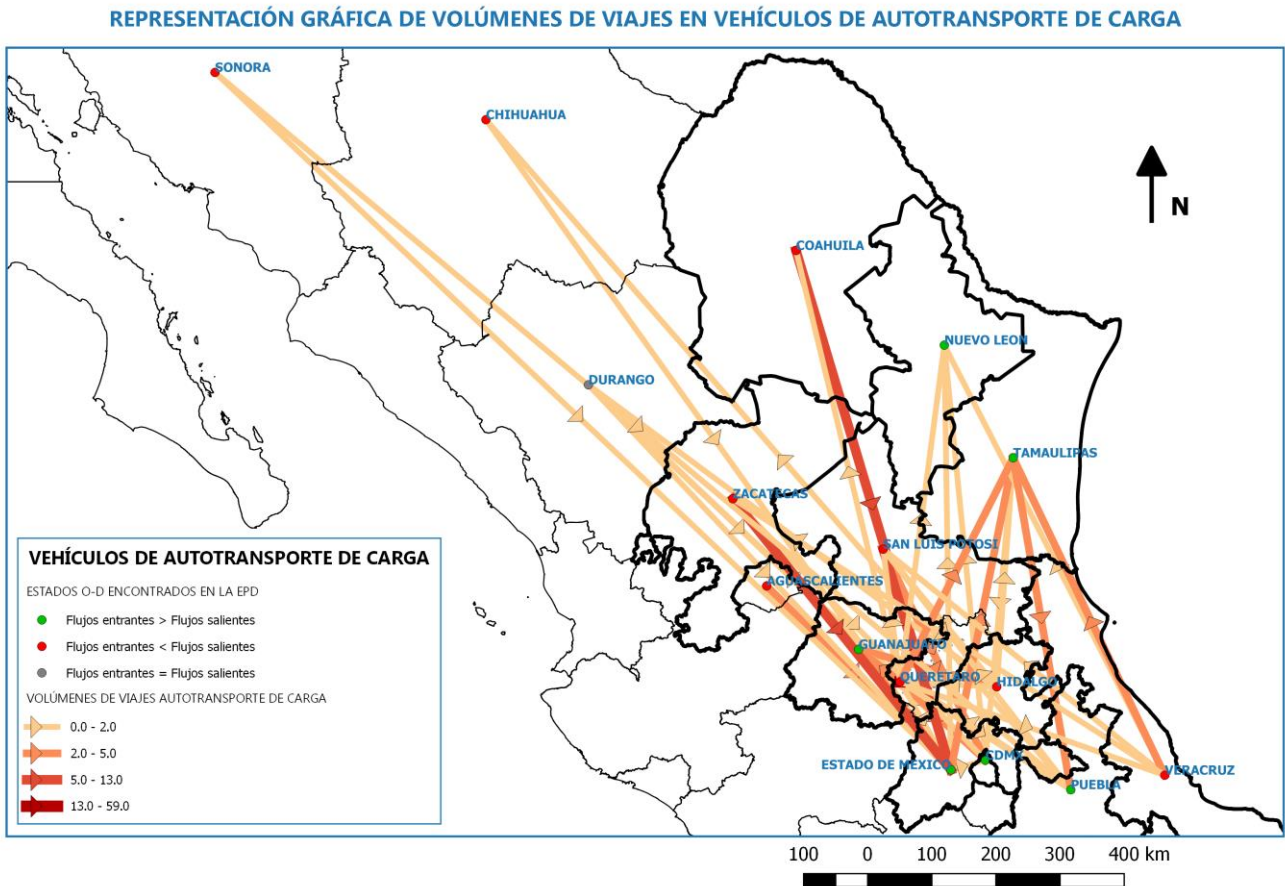


Fig. 61 Representación gráfica de pares O-D (mediante líneas de deseo) de los usuarios de vehículos de autotransporte de carga en la EPD. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V. e INEGI, 2017 (datos geográficos)

Y al analizar los datos por cada estación se pudo encontrar específicamente que los Estados de destino principales de los usuarios interceptados son:

- **Estación 1:** Chichimequillas: hacia el norte los estados de Guanajuato, San Luis Potosí, Nuevo León y Tamaulipas presentan el mayor flujo de viajes, mientras que hacia el sur el Estado de México, la Ciudad de México y Puebla son los principales destinos, también es notable una gran cantidad de viajes intrazonales con origen y destino en el Estado de Querétaro.

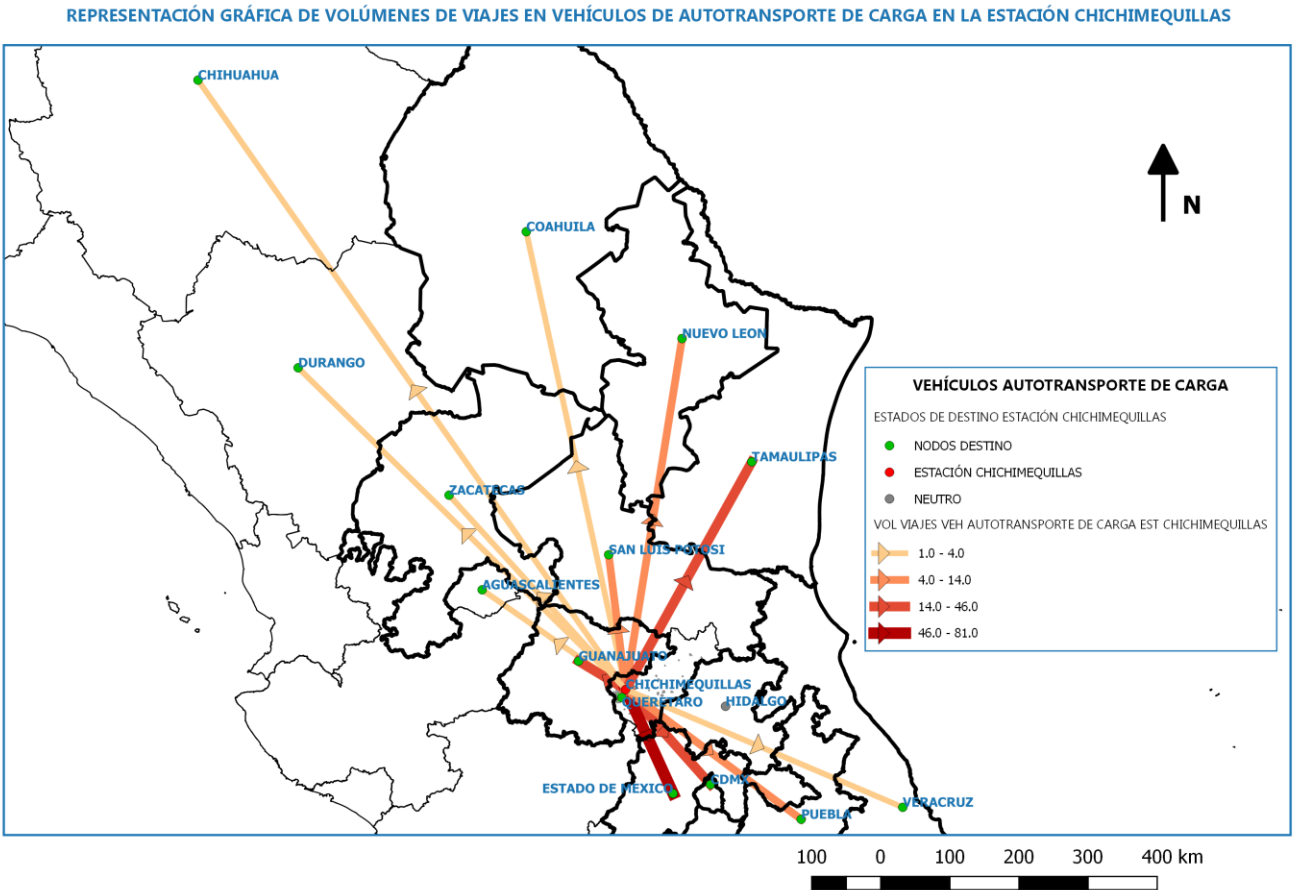


Fig. 62 Pares O-D (mediante líneas de deseo), usuarios de vehículos de autotransporte de carga, Estación Chichimequillas. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V. e INEGI, 2017 (datos geográficos)

- **Estación 2:** Carretera Estatal 200: el mayor flujo de viajes es intrazonal con origen y destino el Estado de Querétaro y en menor magnitud se presentaron viajes hacia la Ciudad de México y los Estados de México y Puebla.

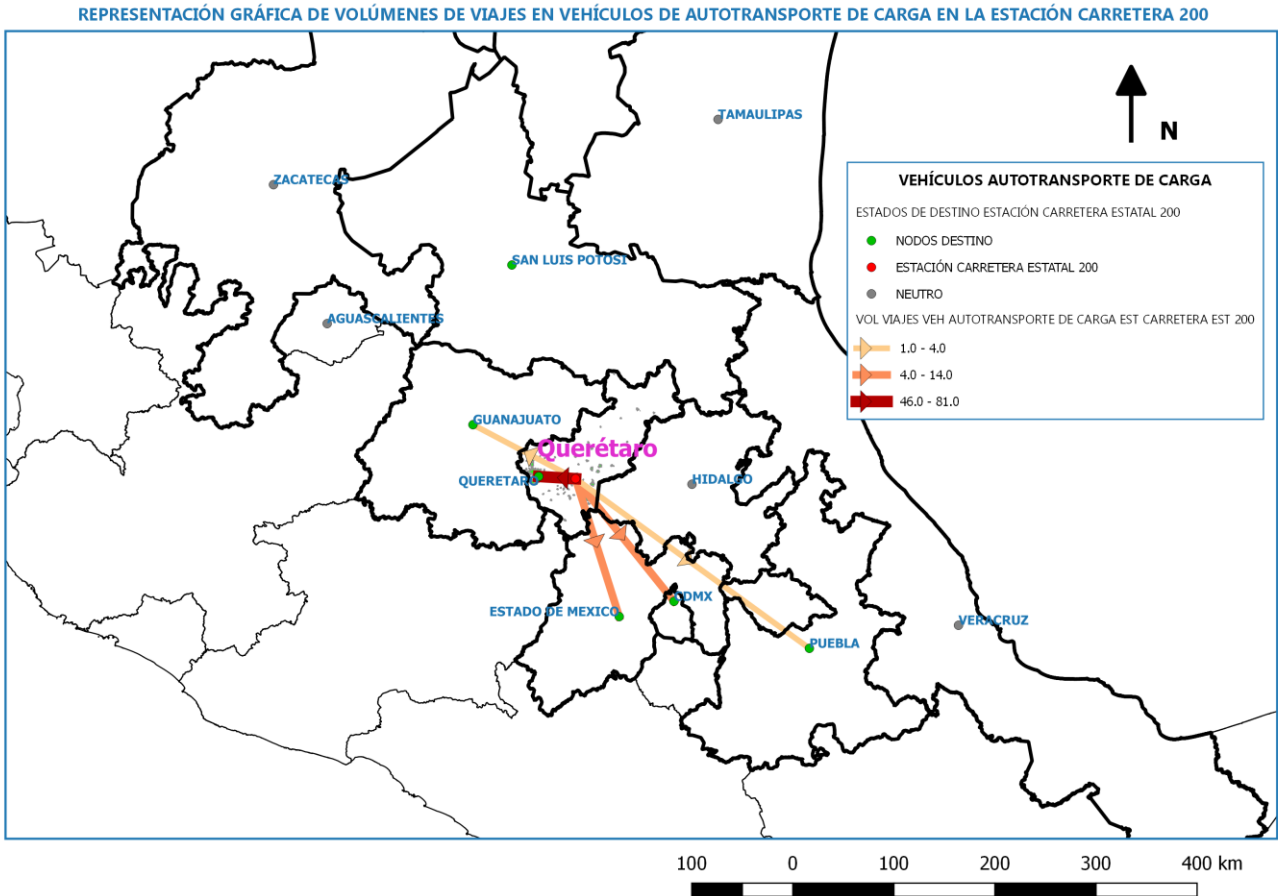


Fig. 63 Pares O-D (mediante líneas de deseo), usuarios de vehículos de autotransporte de carga, Estación Carretera estatal 200. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V. e INEGI, 2017 (datos geográficos)

4.9 Estimación del modelo

El análisis de los datos de la muestra obtenida en campo mediante las encuestas de preferencias declaradas ha permitido conocer algunas características básicas de la demanda en el área de interés, como los tipos de vehículos que circulan, sus motivos principales de viaje, la frecuencia con que se realizan los viajes, quién cubre los gastos, la disponibilidad a pagar por usar el nuevo tramo, los orígenes y destinos de los usuarios, entre otros más.

Algunos de estos atributos del viaje definirán la preferencia de un individuo al momento de decidir entre usar o no la nueva alternativa disponible al ser puesta en servicio, es decir, con base en los datos se pueden definir variables con las cuales se debe construir una función de utilidad, ya que la elección del usuario depende únicamente del orden de sus preferencias por lo tanto elegirá la opción de mayor utilidad. (Horowitz et al, 1986) citado por (Quintero Moreno, 2011)

En el presente estudio de caso se describirán las preferencias del usuario en términos de probabilidad, mediante el uso de un modelo de utilidad aleatoria, el cual no pronostica qué alternativa u opción elegirá el viajero, sino que se calcularán las probabilidades de elegir cada una de las distintas opciones, en este caso se tendrán dos: la alternativa actual (carretera federal 57 tramo libre) y el nuevo tramo de cuota (proyecto "Universidades – Aeropuerto – Carretera 57").

4.9.1 El modelo Logit Binario

Para la estimación del modelo de elección de los usuarios de transporte, las variables empleadas pueden ser cualitativas, por ejemplo, en la encuesta de preferencias declaradas se tiene la variable respuesta "¿usaría el nuevo tramo carretero de cuota?" a lo cual los usuarios tienen las opciones de contestar "Sí" (que se codificaría con el número "1" para el modelo) o "No" (codificado con el número "0"), por lo general en los modelos de elección discreta las variables tienen una variabilidad en sus respuestas que toman valores numéricos como 0,1,2,... etc. Otras variables obtenidas en la encuesta son:

- ✓ TIPO DE VEHÍCULO: Y = 1 (PARTICULAR), Y= 2 (AUTOBÚS), Y= 3 (CAMIÓN 2-4 EJES), Y= 4 (CAMIÓN 5-6 EJES), Y= 5 (CAMIÓN 7 Y MÁS EJES)
- ✓ SENTIDO DE CIRCULACIÓN: Y= 1 (HACIA CDMX), Y= 2 (DESDE CDMX)
- ✓ MOTIVO DE VIAJE: Y= 1 (VACACIONES), Y= 2 (TRABAJO/NEGOCIOS/ESTUDIOS), Y= 3 (OTROS)
- ✓ FRECUENCIA MENSUAL DEL VIAJE: Y= 1,2,3,4....
- ✓ QUIÉN PAGA EL VIAJE: Y=1 (EL CONDUCTOR), Y=2 (LA EMPRESA), Y= 3 (OTRO PASAJERO)
- ✓ QUÉ TAN PROBABLE ES QUE USE EL NUEVO TRAMO: Y= 1 (MUY PROBABLE), Y= 2 (PROBABLE), Y= 3 (POCO PROBABLE), Y= 4 (NADA PROBABLE), Y= 8 (NO SABE).

Con base en estas variables resulta complicado establecer un esquema de regresión porque los valores de las variables respuesta son etiquetas mediante números o en algunos casos estos

números representan especificaciones de rango y no valores numéricos con los cuales hacer análisis estadístico.

Sin embargo, usando un marco de referencia probabilístico es posible establecer un modelo de elección en el cual los eventos asociados a esas etiquetas numéricas puedan suceder: $P[\text{evento "k"} \text{ ocurra}] = P[Y = k]$

Para un modelo binario la variación de las respuestas puede ser $Y = 0$ ó $Y = 1$ y asumiendo que la utilidad de las elecciones es una función lineal de los atributos se tiene (Quintero Moreno, 2011):

$$V = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k$$

La probabilidad en el modelo Logit sería:

$$P[Y = 1] = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k}}$$

La estimación de los parámetros β_k del modelo Logit no es posible mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios por la condición de varianza no constante (heterocedasticidad), por lo tanto, el procedimiento que se usa en la práctica es el método de máxima verosimilitud.

En la regresión lineal se obtiene una ecuación de una recta generada por el método de mínimos cuadrados, el método de mínimos cuadrados busca minimizar la suma de las distancias (diferencias al cuadrado) entre los valores observados (de una muestra) y los estimados. La regresión logística utiliza un método diferente y está basado en la máxima verosimilitud, sin entrar por el momento en detalle, este método evalúa un conjunto de coeficientes que hayan podido generar los datos observados y selecciona el valor del parámetro que tiene la mayor probabilidad de haber generado los datos observados (de la muestra). (Camareno Rioja, Almazán Llorente, & Mañas Ramírez).

El método de máxima verosimilitud es empleado en la estimación de parámetros en los modelos Logit y está orientado a maximizar la función de densidad conjunta que depende de esos parámetros β_k . En dicha función se introducen los datos de la muestra obtenida (datos de encuestas declaradas en este caso) de la población de usuarios para hacer el ajuste.

La función de verosimilitud L de los atributos x_k de la muestra en función de los parámetros β_k se define como:

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n, \beta^*) = \prod_{j=1}^N \frac{1}{1 + e^{\beta^*(V_j - V_1)} + e^{\beta^*(V_j - V_2)} + \dots + e^{\beta^*(V_j - V_N)}}$$

El proceso de estimación se plantea como un problema de maximización no lineal el cual obtiene los valores de los parámetros β^* que ajustan el modelo Logit:

$$\text{Max}_{\beta} \cdot \log L(x_1, x_2, \dots, x_n, \beta^*) = \log \left[\prod_{j=1}^N \frac{1}{1 + e^{\beta^*(V_j - V_1)} + e^{\beta^*(V_j - V_2)} + \dots + e^{\beta^*(V_j - V_N)}} \right]$$

La búsqueda de estos valores que maximizan la ecuación plantea un problema de optimización no lineal, para el cual en la práctica se usan algoritmos de gradiente y otros softwares para estadística para obtener la aproximación de una solución óptima. (Quintero Moreno, 2011)

4.9.2 Regresión logística binaria

La regresión logística es útil cuando se tiene una situación en la cual se requiere predecir la presencia o ausencia de alguna característica específica con base en valores de un conjunto de variables predictoras. Algunas consideraciones sobre los datos en la regresión logística para este estudio de caso son:

- La variable dependiente es dicotómica, (elección de la nueva alternativa: Sí o NO).
- Las variables independientes o predictoras pueden estar en intervalos o ser categóricas, en este último caso deben ser variables dummy, es decir, codificarse como indicadores.

La solución de una regresión logística puede ser más estable si los predictores tienen una distribución normal multivariante. Por otro lado, la correlación entre los predictores podría producir estimaciones sesgadas y posiblemente errores típicos inflados.

El análisis de regresión logística binaria permite pronosticar la pertenencia a un grupo a partir de una serie de variables independientes y es necesario disponer de una variable categórica que defina dos grupos.

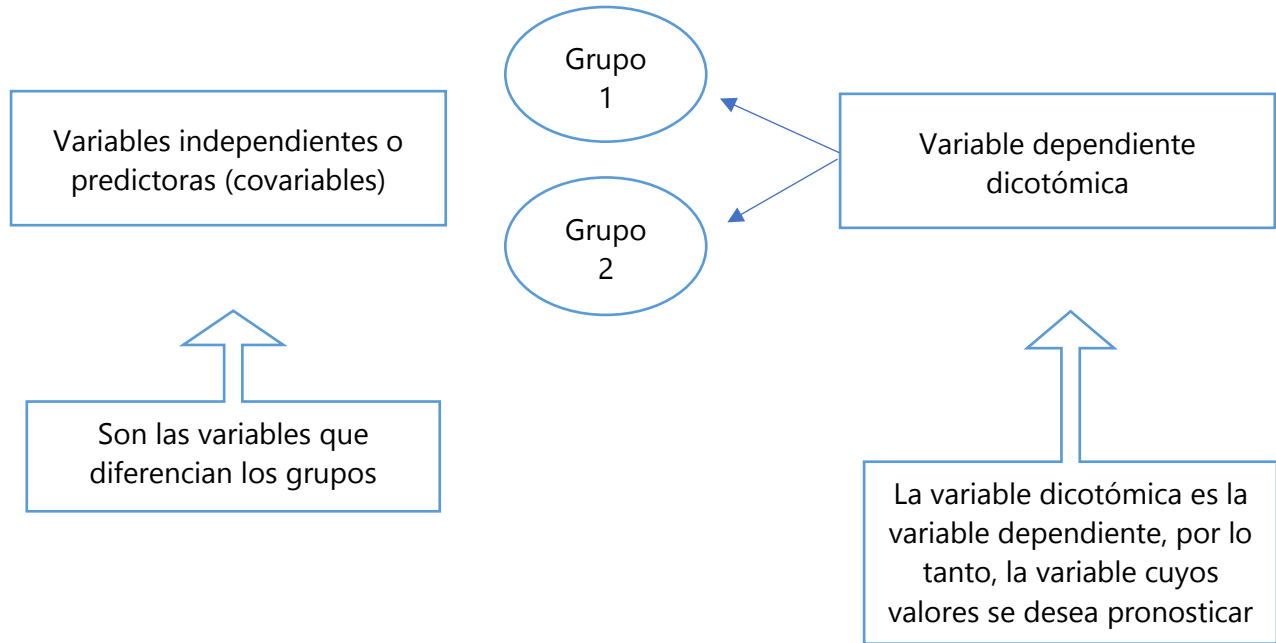


Fig. 64 Abstracción de la regresión logística binaria. Fuente: (Arancibia C., 2012)

Mediante el análisis de regresión logística se obtiene una serie de coeficientes o pesos los cuales:

1. Dan información sobre la capacidad individual que tiene cada variable independiente para poder diferenciar entre los grupos.
2. Se usan para obtener pronósticos necesarios para clasificar a los individuos.

Las fases fundamentales de un análisis de regresión logística son:

- La selección de las variables es posible realizarse con base en criterios teóricos u obedecer criterios de estadística.
- La estimación de los coeficientes asociados a cada una de las variables seleccionadas se efectúa por medio de un algoritmo iterativo de máxima verosimilitud, en este caso el software para estadística IBM SPSS Statistics 24.
- La clasificación de los casos se obtiene a partir de los pronósticos del modelo estimado.
- El análisis de los residuos permite identificar casos atípicos y predicciones sesgadas o anómalas.

(Arancibia C., 2012)

4.9.3 Los coeficientes del modelo

La regresión logística permite obtener una función lineal conformada por las variables independientes (no necesariamente binarias) y permite clasificar a los individuos de la muestra en una de los dos grupos o subpoblaciones definidos por los dos valores de la variable dependiente dicotómica, el modelo de regresión logística es de ayuda para estudiar si esta variable binaria depende de otra u otras variables; por lo tanto la función lineal da lugar al modelo logístico múltiple (Pérez, 2004 citado por (Berlanga-Silvente & Villá-Baños, 2014)), en el cual β es constante y X_k son las variables independientes:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k$$

" β_0 " y " β_k " son los coeficientes estimados mediante la regresión logística con base en los datos de la muestra, en este caso recolectados de las encuestas de preferencias declaradas.

" X_k " son las variables independientes, las cuales son definidas por el modelador y representan variables respuesta de la encuesta de preferencia declarada.

La función logística sirve para el cálculo de la probabilidad del proceso binomial directamente ya que se puede calcular la probabilidad de que un individuo pertenezca a una de las dos subpoblaciones definidas por la variable dependiente binaria:

$$p = \frac{1}{1 + e^{-Y}} = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k)}} \quad 0 < p < 1$$

" Y " es la función lineal del modelo de regresión logística, el exponente del número e es una ecuación lineal múltiple en la que cada variable independiente recibe una ponderación proporcional a su capacidad de predecir p .

" e " es la base de logaritmos neperianos (2,718)

A través de la regresión logística se estiman los parámetros mediante el método de máxima verosimilitud, en consecuencia, los coeficientes que estima el modelo hacen a los datos más verosímiles (Visuta, 1998) citado por (Berlanga-Silvente & Villá-Baños, 2014)

Antes de proceder a la aplicación del modelo se debe analizar la asociación de la variable respuesta (dependiente) con las covariables o variables predictoras para poder ser capaz de interpretar adecuadamente los coeficientes obtenidos; es importante señalar que de existir correlación o multicolinealidad entre las variables independientes se puede tener un sesgo en los resultados. El análisis previo fundamentará la elección de las variables independientes que se añaden en el modelo (Johnson, 2000) citado por (Berlanga-Silvente & Villá-Baños, 2014)

Adicionalmente el modelo debe cumplir el principio de parsimonia, es decir, éste debe ser el más reducido que explique los datos y que sea congruente e interpretable, ya que, al incluir una mayor cantidad de variables en el modelo, se tendrán mayores errores estándar.

4.10 Planteamiento teórico de la regresión al caso práctico

El estudio de caso plantea la situación de predecir la elección de los usuarios respecto al uso de una nueva alternativa que consiste en un tramo de carretera de cuota (libramiento) de 66.1 km de longitud con 4 carriles de 3.50 m. de ancho (2 por cada sentido de circulación) con 6 entronques, la cual ofrecería mejores estándares de calidad de viaje (mejores niveles de servicio, seguridad vial y ahorros de tiempo considerables de entre 20 y 30 minutos) respecto a la alternativa actual que tiene una longitud de 59.6 km. pero dadas las condiciones presentadas anteriormente como un nivel de servicio F y una demanda vehicular en ascenso, la propuesta de una nueva alternativa resulta necesaria ya que adicionalmente permitiría una gran conectividad en la región hacia lugares estratégicos como el Aeropuerto Intercontinental de Querétaro y las zonas turísticas de Bernal y Tequisquiapan. Como se ha mencionado antes, los datos de la muestra fueron recolectados mediante la aplicación de encuestas de preferencias declaradas por interceptación a los vehículos que circulan por carreteras del área de interés.

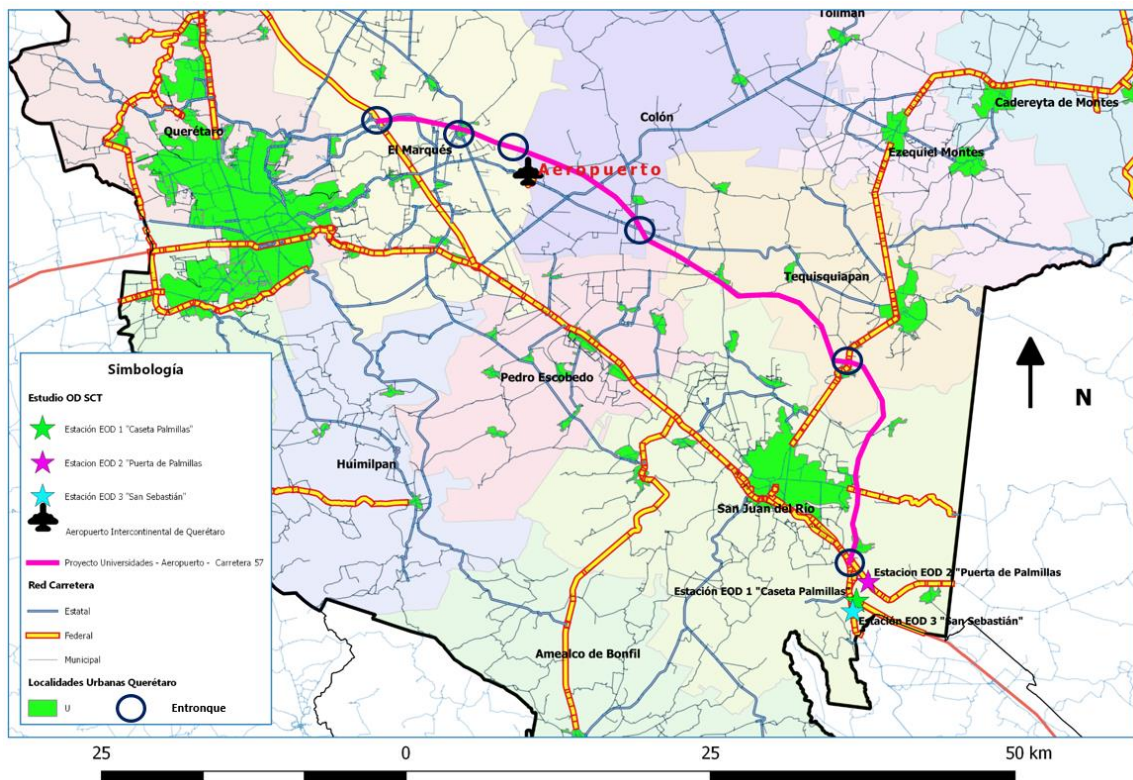


Fig. 65 Localización del proyecto: circuito "Universidades-Aeropuerto-Carretera 57". Fuente: elaboración propia con datos del Estudio O-D, SCT 2016 y datos geográficos del INEGI, 2017

4.11 Selección de las variables para el estudio de caso

Se trata de obtener una combinación lineal de las variables independientes, que permitan estimar la probabilidad de pertenecer a cada uno de los dos grupos definidos por la variable dependiente binaria USAR LA NUEVA CARRETERA (SI ó NO).

En el siguiente esquema se representa la relación de la variable dependiente (dicotómica) con las variables independientes o predictoras seleccionadas para efectuar la regresión logística con el fin de determinar la pertenencia al grupo SI (usar el nuevo tramo) o el grupo NO (usar la alternativa actual). Es importante señalar que los datos de la muestra que se usarán en el proceso son aquellos obtenidos en campo mediante el estudio de preferencias declaradas.

- Vehículos Particulares:

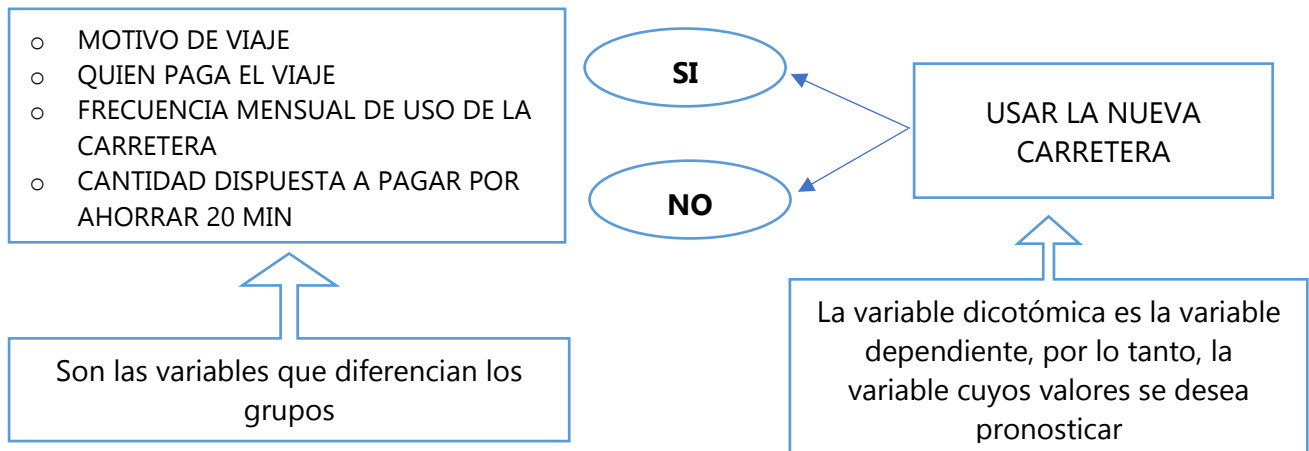


Fig. 66 Abstracción de la regresión logística binaria para el caso de vehículos particulares. Fuente: elaboración propia con ayuda de presentación académica U. de Chile (Arancibia C., 2012)

- Vehículos de Autotransporte de Carga:

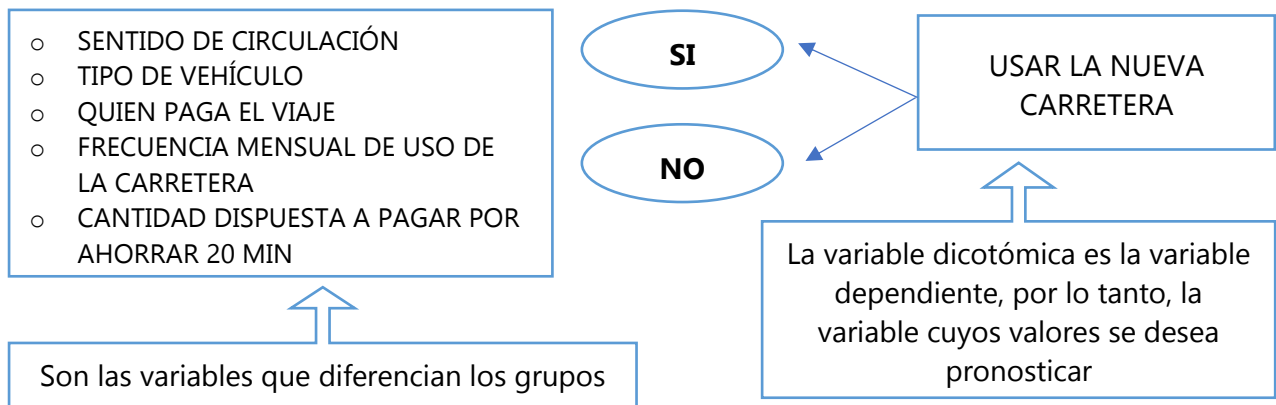


Fig. 67 Abstracción de la regresión logística binaria para el caso de vehículos de autotransporte de carga. Fuente: elaboración propia con ayuda de presentación académica U. de Chile (Arancibia C., 2012)

Como se observa, la segmentación por tipo de vehículo implica que se seleccionaran diferentes variables explicativas por lo tanto a continuación se procede a describir cada una de éstas.

- Vehículos Particulares:

Tabla 28 Variables independientes seleccionadas para el modelo de regresión para vehículos particulares de la EPD. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V.

VARIABLES INDEPENDIENTES EN EL MODELO			
Nombre	Etiqueta	Descripción	Codificación
MOTIVO	MOTIVO DE VIAJE	PROPÓSITO DE REALIZAR EL VIAJE, LA DIFERENCIACION SE DEFINE POR SI ES UN VIAJE POR RECREACIÓN U OBLIGATORIO	1 = VACACIONES 2 = TRABAJO/NEGOCIOS/ESTUDIO
PAGO	QUIEN PAGA EL VIAJE	VARIABLE CUALITATIVA QUE SE CONSIDERA CATEGÓRICA, DEFINE QUIÉN CUBRE LOS GASTOS DEL VIAJE, COMO COMBUSTIBLE Y PEAJES	1 = EL CONDUCTOR 2 = LA EMPRESA 3 = OTRO PASAJERO 98 = OTRO
USO_MES	FRECUENCIA MENSUAL DE USO DE LA CARRETERA	VARIABLE CUANTITATIVA QUE DECLARA EL INDIVIDUO ENTREVISTADO SOBRE QUE TAN A MENUDO REALIZA EL VIAJE	VALORES NUMERICOS 1, 2, 3,4...
CUOTA_UNI_1	CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR POR AHORRO DE 20 MIN	VARIABLE CUANTITATIVA QUE DECLARA EL INDIVIDUO RESPECTO A UN VALOR MONETARIO EN PESOS QUE SIGNIFICA SU DISPOSICIÓN A PAGAR UNA CUOTA O NO	VALORES NUMERICOS 0, 10, 20, 30, 40,50...

- Vehículos de Autotransporte de Carga:

Tabla 29 Variables independientes seleccionadas para el modelo de Regresión para vehículos de autotransporte de carga de la EPD. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V.

VARIABLES INDEPENDIENTES EN EL MODELO			
Nombre	Etiqueta	Descripción	Codificación
SENTIDO	SENTIDO DE CIRCULACIÓN	VARIABLE CUALITATIVA BINARIA, REPRESENTA EL SENTIDO DE CIRCULACIÓN AL MOMENTO DE LA APLICACIÓN DE LA EPD, TOMANDO COMO REFERENTE LA CDMX	1 = HACIA LA CDMX 2 = DESDE LA CDMX
PAGO	QUIEN PAGA EL VIAJE	VARIABLE CUALITATIVA QUE SE CONSIDERA CATEGÓRICA, DEFINE QUIÉN CUBRE LOS GASTOS DEL VIAJE, COMO EL COMBUSTIBLE Y PEAJES	1 = EL CONDUCTOR 2 = LA EMPRESA 3 = OTRO PASAJERO 98 = OTRO
USO_MES	FRECUENCIA MENSUAL DE USO DE LA CARRETERA	VARIABLE CUANTITATIVA QUE DECLARA EL INDIVIDUO ENTREVISTADO SOBRE QUE TAN A MENUDO REALIZA EL VIAJE	VALORES NUMERICOS 1,2,3,4...
CUOTA_UNI_1	CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR POR AHORRO DE 20 MIN	VARIABLE CUANTITATIVA QUE DECLARA EL INDIVIDUO RESPECTO A UN VALOR MONETARIO EN PESOS QUE SIGNIFICA SU DISPOSICIÓN A PAGAR UNA CUOTA O NO	VALORES NUMERICOS 0,10,20,30,40,50...

Las etapas y requisitos para resolver la regresión logística son:

- Recodificar las variables independientes categóricas (u ordinales) en variables ficticias o simuladas y de la variable dependiente en 0 y 1.
- Analizar si existen efectos de confusión y/o interacción del modelo explicativo.
- Evaluar la bondad de ajuste del modelo
- Realizar un análisis sobre el peso, el sentido y la significancia de los coeficientes obtenidos, sus exponenciales y estadísticos de prueba.

4.12 Procedimiento de regresión logística binaria con SPSS

En análisis de regresión logística en el software IBM SPSS Statistics 24 se ejecuta seleccionando la siguiente ruta:

Analizar/Regresión/Logística binaria

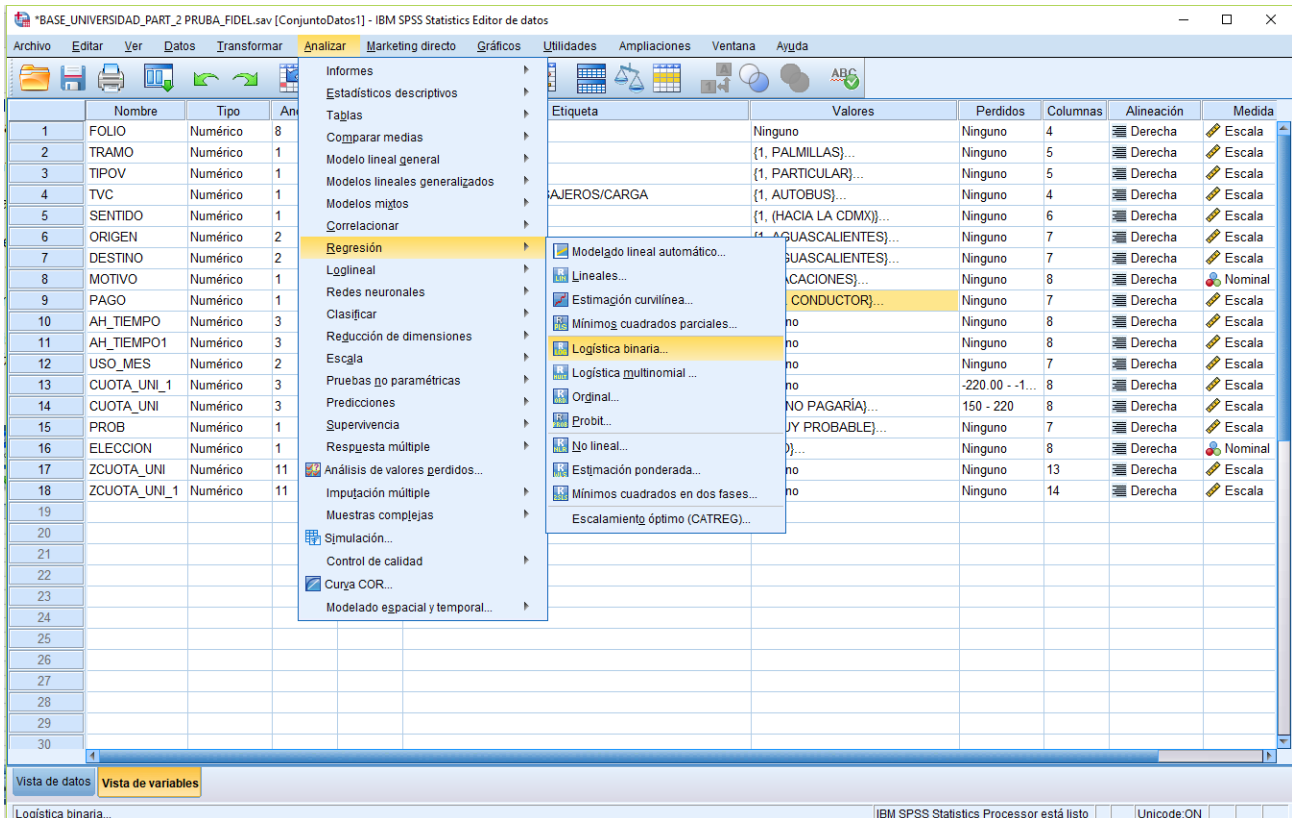


Fig. 68 Vista del Software SPSS para el despliegue de los menús correspondientes para realizar la regresión logística binaria

En seguida se abre un cuadro de diálogo en el cual se deben especificar las variables a utilizar y las condiciones requeridas para el análisis de regresión: introducir la variable dependiente (variable

dicotómica ELECCIÓN codificada como Sí = 1, NO = 0) y también las variables independientes o predictoras que para el caso de vehículos particulares son MOTIVO, CUOTA_UNI_1, USO_MES y PAGO.

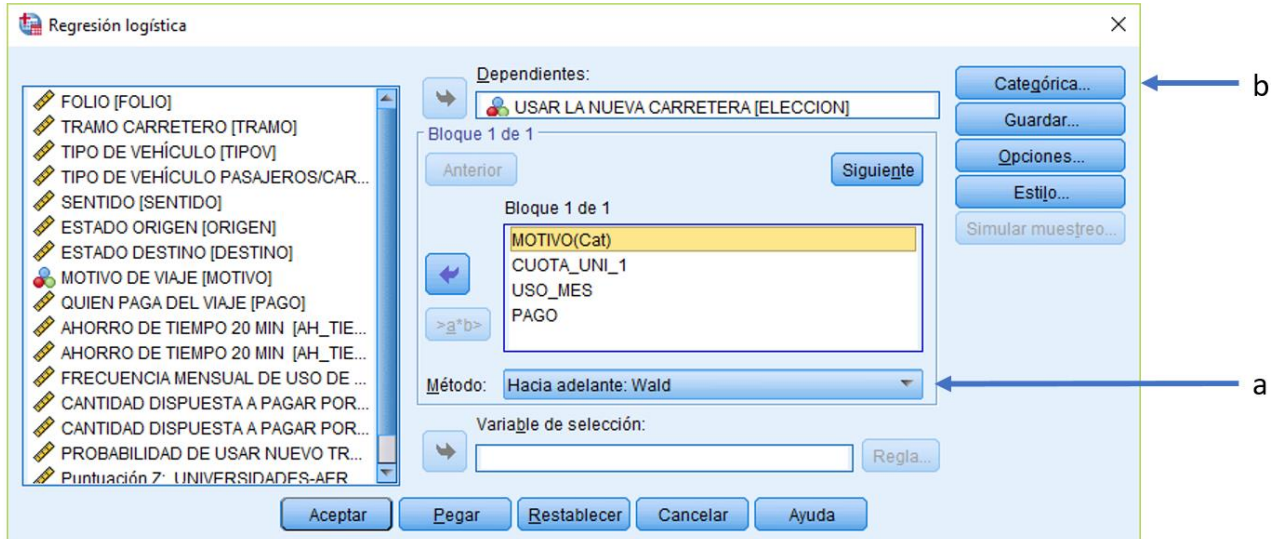


Fig. 69 Vista del recuadro de selección de la variable dependiente y las independientes en el Software SPSS para realizar la regresión logística binaria

- a) Método de selección de variables: se seleccionó el método automático por pasos *Wald hacia adelante* o *FORWARD*, este tipo de métodos son convenientes para obtener algunos modelos con finalidad predictiva y ayudan al investigador a encontrar los más parsimoniosos. El método *FORWARD* hace uso de los estadísticos la *Puntuación eficiente de Raoy* el estadístico de *Wald* para corroborar las covariables que deberían ser incluidas o excluidas del modelo. Sin embargo, uno de los aspectos más importantes al encontrar el modelo de ajuste más adecuado para explicar la variabilidad de una característica cuantitativa, es la correcta especificación del nombrado modelo teórico.
- b) Si las variables independientes están en cadena en la base de datos el software las introduce como categóricas al modelo, por otro lado, si las covariables son numéricas entonces son consideradas cuantitativas. En la práctica puede suceder que las variables categóricas sean numéricas, cuyos valores numéricos son etiquetas y corresponden a categorías, y en este caso SPSS tiene una opción mediante el botón *Categorica* del cuadro de dialogo, en el cual es posible enlistar las covariables categóricas, es decir, el sistema recodifica las variables en categóricas, si son dicotómicas se codifican en 1 y 0 (variables dummy), para cada categoría de la variable se calcula una variable dummy, así, en el caso de tener variables politómicas, el software crea tantas variables como categorías tenga cada variable menos 1 (la original) asignando de nuevo 0 -1 a cada nueva variable. En la imagen siguiente se muestra el cuadro de dialogo donde se

introducen las variables categóricas manualmente para que el programa las recodifique automáticamente; el caso específico es para las variables usadas para vehículos particulares.

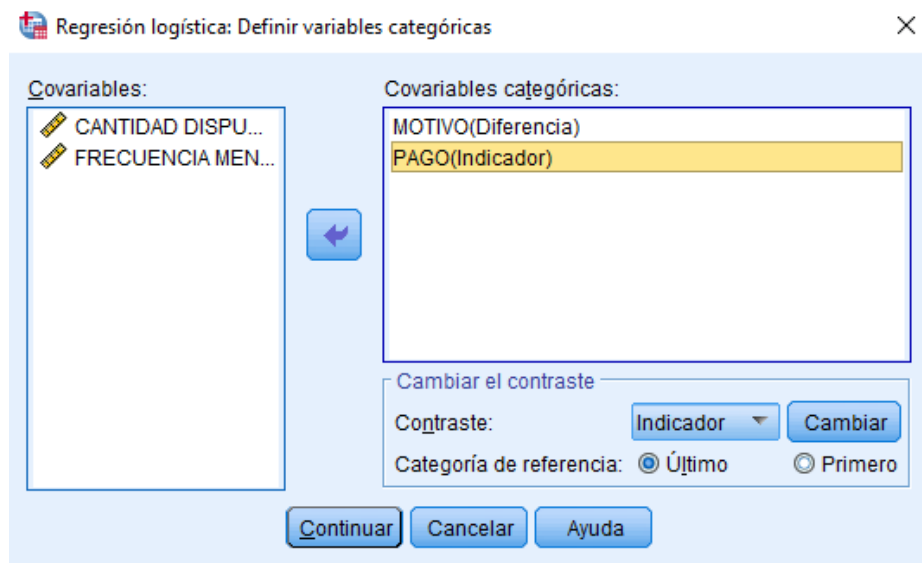


Fig. 70 Vista del recuadro para establecer las variables independientes categóricas en el Software SPSS para realizar la regresión logística binaria

Al dar clic en el botón continuar se regresará al cuadro principal de la regresión logística, adicionalmente es posible obtener y modificar distintos atributos con el botón *Opciones*, si manualmente se solicita hacerlo en el análisis, algunos son:

- *Estadísticos y gráficos.*
- *Probabilidad para el método por pasos.*
- *Punto de corte para la clasificación.*
- *Número máximo de iteraciones.*
- *Incluir constante en el modelo.*

4.13 Presentación de resultados e interpretación del modelo de regresión logística

Los resultados u outputs generados por el programa SPSS son los parámetros estimados por el modelo de regresión logística: los coeficientes de regresión, los errores estándar (E.T.) asociados a cada coeficiente (con los cuales es posible calcular los intervalos de confianza), un valor del estadístico de Wald que permite evaluar la hipótesis nula ($\beta_i = 0$), la significación estadística y el valor de la OR (Exp(B)).

- **Vehículos particulares**

En la tabla siguiente se presentan los coeficientes para el segmento de demanda Vehículos Particulares de la EPD:

Tabla 30 Resultados de la regresión logística binaria en SPSS para vehículos particulares. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V.

		Variables en la ecuación					
		B	Error estándar	Wald	gl	Sig.	Exp(B)
Paso 1 ^a	CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR POR AHORRAR 20 MIN P UNIV-AEROP-CARR 57	-0.038	.005	57.249	1	.000	.963
	Constante	-1.977	.207	91.004	1	.000	.138
Paso 2 ^b	MOTIVO DE VIAJE			11.387	2	.003	
	MOTIVO DE VIAJE(1)	1.433	.438	10.710	1	.001	4.190
	MOTIVO DE VIAJE(2)	.725	.286	6.435	1	.011	2.064
	CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR POR AHORRAR 20 MIN P UNIV-AEROP-CARR 57	-0.038	.005	55.477	1	.000	.962
	Constante	-2.325	.249	87.213	1	.000	.098

a. Variables especificadas en el paso 1: CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR POR AHORRAR 20 MIN P UNIV-AEROP-CARR 57.

b. Variables especificadas en el paso 2: MOTIVO DE VIAJE.

Los resultados de la tabla anterior indican que en la ecuación solo aparecerán las variables MOTIVO y CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR más la constante específica, y se excluyeron las variables FRECUENCIA MENSUAL DE USO y PAGO (Quien paga gastos del viaje), ya que en un primer paso del método la variable CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR fue seleccionada mediante el estadístico "Puntuación eficiente de Rao", consecuentemente continuando con el proceso para seleccionar variables de entre el resto, las candidatas a ser elegidas fueron MOTIVO y FRECUENCIA MENSUAL DE USO, pero en la etapa final a través del estadístico de Wald se eliminó la FRECUENCIA MENSUAL DE USO.

En otras palabras, mediante el método por pasos “hacia adelante: Wald” (FORWARD) se efectuaron tres etapas en las cuales se agregaron al modelo 4 variables, pero se eliminaron las que no fueron significativas, es decir, en la etapa final se repitió todo el proceso para encontrar que ninguna variable no seleccionada ha satisfecho el criterio de selección y por lo tanto ninguna de las covariables seleccionadas cumplió el criterio de eliminación. Posteriormente con base en los datos de la tabla anterior se construye la ecuación de regresión logística:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k$$

Sustituyendo con los valores correspondientes la ecuación resulta:

$$Y = -2.325 + \beta_1(MOTIVO) + \beta_2(CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR)$$

Resolviendo el siguiente modelo Logit Binomial con ayuda de una hoja de cálculo se tienen las probabilidades asociadas a la variable dependiente, es decir que los viajes sean captados hacia la nueva alternativa carretera de cuota:

$$p = \frac{1}{1 + e^{-Y}} = \frac{1}{1 + e^{-(-2.325 + \beta_1(MOTIVO) + \beta_2(CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR))}} \quad 0 < p < 1$$

Tabla 31 Cálculo de las probabilidades de elección con base en los resultados de la regresión logística binaria en SPSS para vehículos particulares

Probabilidades de viajes captados a USAR LA NUEVA CARRETERA (Vehículos Particulares)										
	Cuota (MXN)									
Motivo de viaje	\$10.00	\$20.00	\$30.00	\$40.00	\$50.00	\$60.00	\$70.00	\$80.00	\$90.00	\$100.00
1 Vacaciones	0.218	0.160	0.114	0.081	0.057	0.039	0.027	0.019	0.013	0.009
2 Trabajo/Negocios/Estudios	0.121	0.086	0.060	0.042	0.029	0.020	0.014	0.009	0.006	0.004

Las cuales expresadas como porcentajes son:

Tabla 32 Cálculo de los porcentajes de elección con base en los resultados de la regresión logística binaria en SPSS para vehículos particulares.

Porcentajes de viajes captados a USAR LA NUEVA CARRETERA (Vehículos Particulares)										
	Cuota (MXN)									
Motivo de viaje	\$10.00	\$20.00	\$30.00	\$40.00	\$50.00	\$60.00	\$70.00	\$80.00	\$90.00	\$100.00
1 Vacaciones	21.80%	15.96%	11.45%	8.09%	5.66%	3.92%	2.70%	1.86%	1.27%	0.87%
2 Trabajo/Negocios/Estudios	12.08%	8.56%	5.99%	4.16%	2.87%	1.97%	1.35%	0.92%	0.63%	0.43%

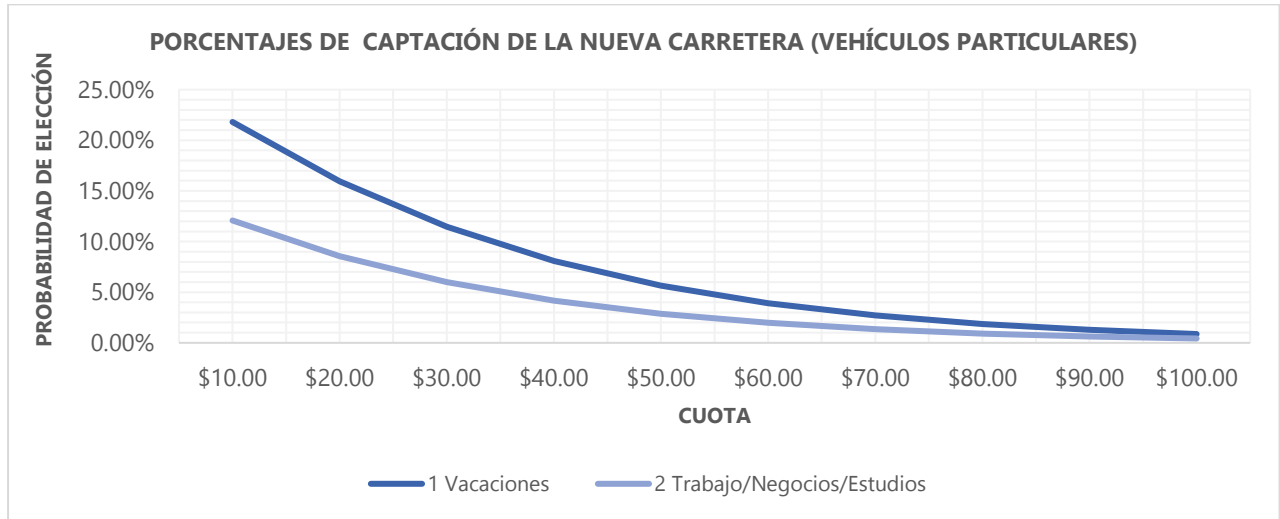


Fig. 71 Gráfica de los porcentajes de elección con base en los resultados de la regresión logística binaria en SPSS para vehículos particulares.

De la gráfica anterior se observa cómo en la medida en que aumenta el valor de la cuota, el porcentaje de usuarios que elige usar el nuevo tramo carretero proyecto "Universidades – Aeropuerto – Carretera 57" disminuye.

Por otro lado, también es posible deducir que los viajes por recreación (Motivo: Vacaciones) tienen una mayor probabilidad de ser realizados por el nuevo tramo asumiendo el pago de cuota, en comparación con los viajes obligados (Motivo: Trabajo/Negocios/Estudios).

• **Vehículos de autotransporte de carga**

Los coeficientes obtenidos mediante la regresión logística en SPSS para el segmento de demanda Vehículos de autotransporte de carga de la EPD se muestran en el siguiente cuadro:

Tabla 33 Cálculo de las probabilidades de elección con base en los resultados de la regresión logística binaria en SPSS para vehículos de carga.

		Variables en la ecuación					
		B	Error estándar	Wald	gl	Sig.	Exp(B)
Paso 1 ^a	CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR POR AHORRAR 20 MIN P UNIV-AEROP-CARR 57	.030	.005	40.523	1	.000	1.031
	Constante	-3.038	.443	47.068	1	.000	.048
Paso 2 ^b	SENTIDO	-1.972	.309	40.832	1	.000	.139
	CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR POR AHORRAR 20 MIN P UNIV-AEROP-CARR 57	.038	.006	45.563	1	.000	1.039
	Constante	-.774	.573	1.825	1	.177	.461
Paso 3 ^c	SENTIDO	-1.671	.320	27.342	1	.000	.188
	FRECUENCIA MENSUAL DE USO DE LA CARRETERA	-.104	.035	9.101	1	.003	.901
	CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR POR AHORRAR 20 MIN P UNIV-AEROP-CARR 57	.035	.006	36.653	1	.000	1.036
	Constante	-.016	.631	.001	1	.980	.984

a. Variables especificadas en el paso 1: CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR POR AHORRAR 20 MIN P UNIV-AEROP-CARR 57.

b. Variables especificadas en el paso 2: SENTIDO.

c. Variables especificadas en el paso 3: FRECUENCIA MENSUAL DE USO DE LA CARRETERA.

Los coeficientes obtenidos que serán incluidos en la ecuación son los que están asociados a las variables SENTIDO, FRECUENCIA MENSUAL DE USO y CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR además la constante específica (en principio ésta debería ser excluida), y han quedado fuera del modelo las variables TIPO DE VEHÍCULO (tipos de vehículos de carga) y PAGO (Quién paga gastos del viaje). En un primer paso del método la variable CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR fue seleccionada mediante el estadístico "Puntuación eficiente de Rao", en el segundo paso se incluyó la variable SENTIDO, finalmente en el tercer paso continuando con el proceso para seleccionar variables de entre el resto, la candidata a ser elegida fue FRECUENCIA MENSUAL DE USO.

En resumen, por el método por pasos “hacia adelante: Wald” (FORWARD) se realizaron cuatro etapas en las cuales se agregaron al modelo 5 variables, pero se eliminaron las que no fueron significativas, es decir, en la etapa final se repitió todo el proceso para encontrar que ninguna variable no seleccionada ha satisfecho el criterio de selección y por lo tanto ninguna de las variables independientes seleccionadas cumplió el criterio de eliminación.

Igual al caso de Vehículos particulares, los datos de la tabla anterior son utilizados para construir la ecuación de regresión logística:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots \beta_k X_k$$

Y sustituyendo con los valores correspondientes la ecuación resulta:

$$Y = -0.016 + \beta_1(\text{SENTIDO}) + \beta_2(\text{FRECUENCIA MENSUAL DE USO}) + \beta_3(\text{CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR})$$

Resolviendo el siguiente modelo Logit Binomial con ayuda de una hoja de cálculo se tienen las probabilidades asociadas a la variable dependiente:

$$p = \frac{1}{1 + e^{-Y}} = \frac{1}{1 + e^{-(-0.016 + \beta_1(\text{SENTIDO}) + \beta_2(\text{FRECUENCIA MENSUAL DE USO}) + \beta_3(\text{CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR}))}} \quad 0 < p < 1$$

Tabla 34 Cálculo de las probabilidades de elección con base en los resultados de la regresión logística binaria en SPSS para vehículos de carga en sentido desde CDMX.

Probabilidades de viajes captados a USAR LA NUEVA CARRETERA (Vehículos de Autotransporte de carga)												
Sentido = 0 desde CDMX	Cuota (MXN)											
	\$20.00	\$40.00	\$60.00	\$80.00	\$100.00	\$120.00	\$140.00	\$160.00	\$180.00	\$200.00	\$220.00	\$240.00
Frecuencia mensual de uso (veces)												
2	0.3756	0.2299	0.1290	0.0685	0.0352	0.0178	0.0089	0.0044	0.0022	0.0011	0.0005	0.0003
4	0.4256	0.2688	0.1543	0.0830	0.0430	0.0218	0.0109	0.0055	0.0027	0.0013	0.0007	0.0003
6	0.4772	0.3117	0.1835	0.1003	0.0524	0.0267	0.0134	0.0067	0.0033	0.0017	0.0008	0.0004
8	0.5292	0.3580	0.2168	0.1207	0.0638	0.0327	0.0165	0.0083	0.0041	0.0020	0.0010	0.0005
10	0.5806	0.4072	0.2542	0.1447	0.0774	0.0400	0.0202	0.0101	0.0051	0.0025	0.0013	0.0006
12	0.6303	0.4583	0.2957	0.1724	0.0937	0.0488	0.0248	0.0125	0.0062	0.0031	0.0015	0.0008
14	0.6774	0.5103	0.3408	0.2042	0.1129	0.0594	0.0304	0.0153	0.0077	0.0038	0.0019	0.0009
16	0.7212	0.5621	0.3891	0.2401	0.1355	0.0722	0.0372	0.0188	0.0094	0.0047	0.0023	0.0012
18	0.7611	0.6125	0.4396	0.2802	0.1619	0.0874	0.0454	0.0230	0.0116	0.0058	0.0029	0.0014

Expresadas como porcentajes son:

Tabla 35 Cálculo de los porcentajes de elección con base en los resultados de la regresión logística binaria en SPSS para vehículos de carga en sentido desde CDMX.

Porcentajes de viajes captados a USAR LA NUEVA CARRETERA (Vehículos de Autotransporte de carga)												
Sentido = 0 desde CDMX	Cuota (MXN)											
Frecuencia mensual de uso (veces)	\$20.00	\$40.00	\$60.00	\$80.00	\$100.00	\$120.00	\$140.00	\$160.00	\$180.00	\$200.00	\$220.00	\$240.00
2	37.56%	22.99%	12.90%	6.85%	3.52%	1.78%	0.89%	0.44%	0.22%	0.11%	0.05%	0.03%
4	42.56%	26.88%	15.43%	8.30%	4.30%	2.18%	1.09%	0.55%	0.27%	0.13%	0.07%	0.03%
6	47.72%	31.17%	18.35%	10.03%	5.24%	2.67%	1.34%	0.67%	0.33%	0.17%	0.08%	0.04%
8	52.92%	35.80%	21.68%	12.07%	6.38%	3.27%	1.65%	0.83%	0.41%	0.20%	0.10%	0.05%
10	58.06%	40.72%	25.42%	14.47%	7.74%	4.00%	2.02%	1.01%	0.51%	0.25%	0.13%	0.06%
12	63.03%	45.83%	29.57%	17.24%	9.37%	4.88%	2.48%	1.25%	0.62%	0.31%	0.15%	0.08%
14	67.74%	51.03%	34.08%	20.42%	11.29%	5.94%	3.04%	1.53%	0.77%	0.38%	0.19%	0.09%
16	72.12%	56.21%	38.91%	24.01%	13.55%	7.22%	3.72%	1.88%	0.94%	0.47%	0.23%	0.12%
18	76.11%	61.25%	43.96%	28.02%	16.19%	8.74%	4.54%	2.30%	1.16%	0.58%	0.29%	0.14%

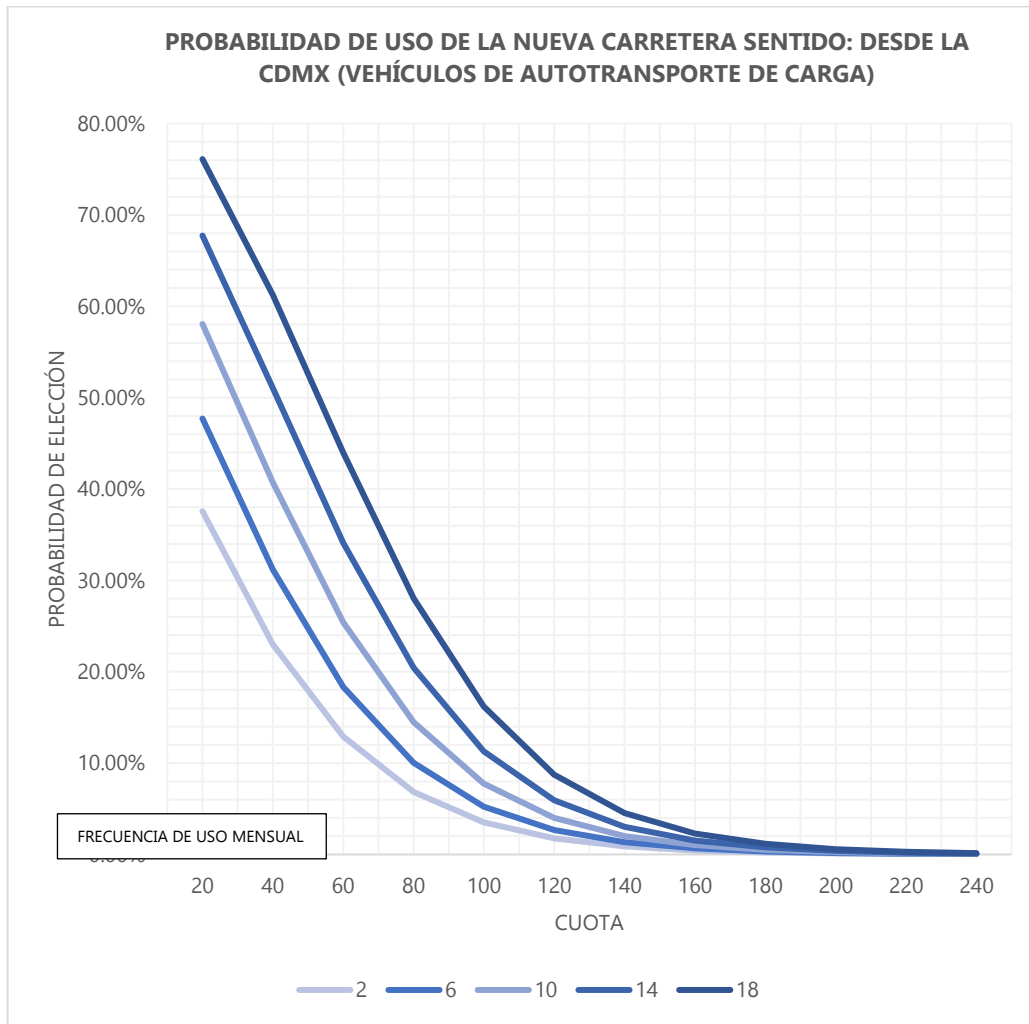


Fig. 72 Gráfica de los porcentajes de elección con base en los resultados de la regresión logística binaria en SPSS para vehículos de carga en sentido = 0.

En la Figura 69 se describe la probabilidad de que los individuos en sentido desde la Ciudad de México elijan usar el nuevo tramo: si el peaje tiende a ser más barato la probabilidad de que los usuarios elijan usar el proyecto de cuota "Universidades – Aeropuerto – Carretera 57" es más alta y en la medida en que el viaje se realice con mayor frecuencia la probabilidad de hacerlo a través de la nueva alternativa también tiene mayor certeza. Este patrón se repite para los usuarios en el sentido hacia la Ciudad de México, sin embargo, es importante identificar que el porcentaje de viajes captados hacia la nueva alternativa propuesta, en sentido desde la Ciudad de México es mucho menor que en el sentido contrario, para poner esto en contexto se hace la siguiente comparación que indica el doble de usuarios para los atributos de viaje considerados:

Tabla 36 Comparación de los porcentajes de elección de usuarios de vehículos de carga sobre la nueva alternativa con base en el sentido de circulación

Sentido: desde la CDMX	Cuota	Sentido: hacia la CDMX	Cuota
Frecuencia mensual de uso (veces)	\$20.00	Frecuencia mensual de uso (veces)	\$20.00
2	37.56%	2	76.19%

Tabla 37 Cálculo de las probabilidades de elección con base en los resultados de la regresión logística binaria en SPSS para vehículos de carga en sentido hacia CDMX.

Probabilidades de USAR LA NUEVA CARRETERA (Vehículos de Autotransporte de carga)												
Sentido = 1 hacia CDMX	Cuota (MXN)											
	\$20.00	\$40.00	\$60.00	\$80.00	\$100.00	\$120.00	\$140.00	\$160.00	\$180.00	\$200.00	\$220.00	\$240.00
Frecuencia mensual de uso (veces)												
2	0.7619	0.6135	0.4406	0.2810	0.1624	0.0878	0.0456	0.0231	0.0116	0.0058	0.0029	0.0014
4	0.7976	0.6616	0.4924	0.3249	0.1928	0.1060	0.0555	0.0283	0.0143	0.0071	0.0036	0.0018
6	0.8292	0.7066	0.5444	0.3722	0.2273	0.1274	0.0675	0.0347	0.0175	0.0088	0.0044	0.0022
8	0.8567	0.7479	0.5954	0.4220	0.2660	0.1524	0.0819	0.0424	0.0215	0.0108	0.0054	0.0027
10	0.8804	0.7851	0.6445	0.4735	0.3086	0.1813	0.0990	0.0517	0.0263	0.0132	0.0066	0.0033
12	0.9007	0.8182	0.6907	0.5256	0.3547	0.2143	0.1192	0.0629	0.0322	0.0163	0.0081	0.0041
14	0.9178	0.8471	0.7333	0.5771	0.4037	0.2514	0.1429	0.0764	0.0394	0.0200	0.0100	0.0050
16	0.9322	0.8722	0.7720	0.6269	0.4547	0.2927	0.1703	0.0924	0.0481	0.0245	0.0123	0.0061
18	0.9443	0.8937	0.8066	0.6743	0.5067	0.3376	0.2018	0.1115	0.0586	0.0300	0.0151	0.0075

Tabla 38 Cálculo de los porcentajes de elección con base en los resultados de la regresión logística binaria en SPSS para vehículos de carga en sentido hacia CDMX.

Porcentajes de USAR LA NUEVA CARRETERA (Vehículos de Autotransporte de carga)												
Sentido = 1 hacia CDMX	Cuota (MXN)											
	\$20.00	\$40.00	\$60.00	\$80.00	\$100.00	\$120.00	\$140.00	\$160.00	\$180.00	\$200.00	\$220.00	\$240.00
Frecuencia mensual de uso (veces)												
2	76.19%	61.35%	44.06%	28.10%	16.24%	8.78%	4.56%	2.31%	1.16%	0.58%	0.29%	0.14%
4	79.76%	66.16%	49.24%	32.49%	19.28%	10.60%	5.55%	2.83%	1.43%	0.71%	0.36%	0.18%
6	82.92%	70.66%	54.44%	37.22%	22.73%	12.74%	6.75%	3.47%	1.75%	0.88%	0.44%	0.22%
8	85.67%	74.79%	59.54%	42.20%	26.60%	15.24%	8.19%	4.24%	2.15%	1.08%	0.54%	0.27%
10	88.04%	78.51%	64.45%	47.35%	30.86%	18.13%	9.90%	5.17%	2.63%	1.32%	0.66%	0.33%
12	90.07%	81.82%	69.07%	52.56%	35.47%	21.43%	11.92%	6.29%	3.22%	1.63%	0.81%	0.41%
14	91.78%	84.71%	73.33%	57.71%	40.37%	25.14%	14.29%	7.64%	3.94%	2.00%	1.00%	0.50%
16	93.22%	87.22%	77.20%	62.69%	45.47%	29.27%	17.03%	9.24%	4.81%	2.45%	1.23%	0.61%
18	94.43%	89.37%	80.66%	67.43%	50.67%	33.76%	20.18%	11.15%	5.86%	3.00%	1.51%	0.75%

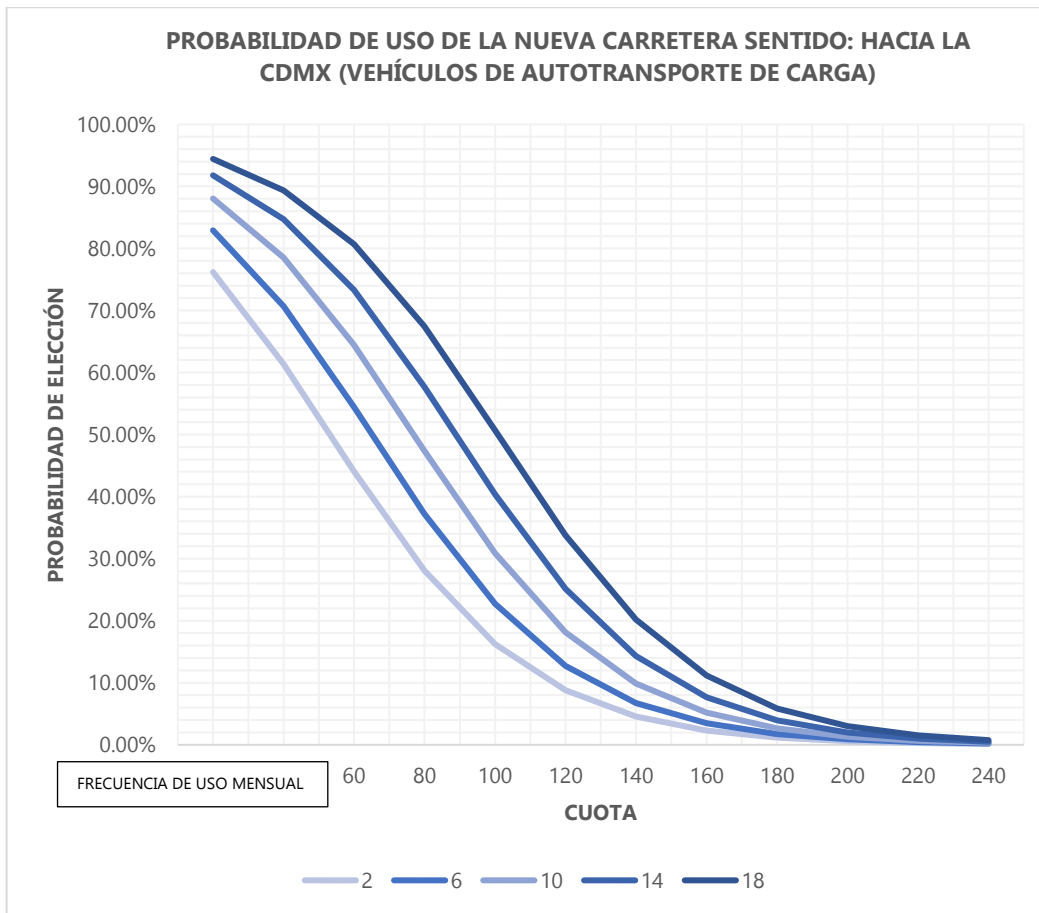


Fig. 73 . Gráfica de los porcentajes de elección con base en los resultados de la regresión logística binaria en SPSS para vehículos de carga en sentido = 1.

4.14 Calidad estadística del ajuste

Después de haber estimado los coeficientes del modelo, es conveniente analizar tanto su precisión como significancia.

- Precisión es determinar el margen de error que tiene la estimación
- Significancia es el nivel en que contribuye cada variable al modelo mediante su coeficiente

4.14.1 Precisión de la estimación

Para determinar la precisión se calcularon los niveles de confianza de cada coeficiente obtenido en la estimación, en la práctica el nivel de confianza más usado es del 95%, la fórmula para obtener dicho intervalo es:

$$B \pm Z\sigma_{\hat{b}}$$

Donde **B** es el coeficiente estimado, **Z** es el valor crítico de la tabla de distribución normal estándar (1.96 para 95%Nc) y $\sigma_{\hat{b}}$ es el error estándar del coeficiente (calculado también en la estimación por el software). En la siguiente tabla se muestran los intervalos de confianza para cada coeficiente estimado:

- Vehículos particulares

Tabla 39 Intervalos de confianza para los coeficientes del modelo estimados por regresión logística para vehículos particulares

Variable		b	e ^b
MOTIVO DE VIAJE (1)	Lim. Superior	2.29067	9.88152
	coeficiente	1.43300	4.19125
	Lim. Inferior	0.57463	1.77647
MOTIVO DE VIAJE (2)	Lim. Superior	1.28485	3.61414
	coeficiente	0.72500	2.06473
	Lim. Inferior	0.16479	1.17914
CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR POR AHORRAR 20 MIN P UNIV-AEROP-CARR 57	Lim. Superior	-0.02832	0.97208
	coeficiente	-0.03800	0.96271
	Lim. Inferior	-0.04854	0.95262
Constante	Lim. Superior	-1.83737	0.15924
	coeficiente	-2.32500	0.09778
	Lim. Inferior	-2.81348	0.06000

- Vehículos de Autotransporte de carga

Tabla 40 Intervalos de confianza para los coeficientes del modelo estimados por regresión logística para vehículos de autotransporte de carga

Variable		b	e ^b
SENTIDO	Lim. Superior	-1.04472	0.35179
	coeficiente	-1.67111	0.18804
	Lim. Inferior	-2.29750	0.10051
FRECUENCIA MENSUAL DE USO DE LA CARRETERA	Lim. Superior	-0.03650	0.96416
	coeficiente	-0.10419	0.90106
	Lim. Inferior	-0.17187	0.84209
CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR POR AHORRAR 20 MIN P UNIV-AEROP-CARR 57	Lim. Superior	0.04638	1.04748
	coeficiente	0.03504	1.03566
	Lim. Inferior	0.02370	1.02398
Constante	Lim. Superior	1.22012	3.38758
	coeficiente	-0.01573	0.98439
	Lim. Inferior	-1.25157	0.28605

Analizando el intervalo de confianza al 95% para cada coeficiente estimado se puede afirmar que dentro de éstos no se encuentra el valor 0 por lo tanto con una alta probabilidad, b para cada variable no puede ser nulo y los OR (e^b) tampoco (OR = 1 significa que la variable no tiene efecto en el modelo), consecuentemente se puede rechazar la hipótesis nula que indica b = 0 o e^b = 1. Sin embargo, existe una excepción para la constante asociada a los vehículos de autotransporte de carga.

4.14.2 Significancia de los coeficientes

Según Ortúzar y Willumsen (2008) se podría cuestionar si el coeficiente β_k calculado es significativamente distinto de cero o no, por una variación estocástica de las variables de la muestra. En consecuencia, se plantea una prueba de hipótesis:

- Hipótesis nula $\beta_k = 0$, lo cual indica que la variable asociada no puede aportar información y por lo tanto debe ser omitida del modelo
Vs
- Hipótesis alterna $\beta_k \neq 0$

A) Criterio de la variable aleatoria "t"

El estadístico de esta prueba de significancia es la variable "t" que para un nivel de confianza de 95% o un nivel de significación de 5% si:

- $t \geq 1.96$ se rechaza la prueba de hipótesis nula $\beta_k = 0$ en consecuencia $\beta_k \neq 0$

- $t < 1.96$ se acepta la prueba de hipótesis nula $\beta_k = 0$ e indica que el coeficiente no aporta información al modelo y es recomendable descartar su variable asociada o incluso cambiar el modelo

$$t = \frac{\beta_k}{\text{Error \u00c9standar de } \beta_k}$$

Para la estimaci\u00f3n de coeficientes del estudio de caso se tiene:

- Veh\u00edculos particulares

Tabla 41 C\u00e1lculo de la "t" para los coeficientes del modelo estimados por regresi\u00f3n log\u00edstica para veh\u00edculos particulares

Variable	Coficiente	Error	Variable "t"
MOTIVO DE VIAJE(1)	1.433	0.438	3.27264
MOTIVO DE VIAJE(2)	0.725	0.286	2.53673
CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR POR AHORRAR 20 MIN P UNIV-AEROP-CARR 57	-0.038	0.005	-7.44828
Constante	-2.325	0.249	-9.33881

- Veh\u00edculos de Autotransporte de carga

Tabla 42 C\u00e1lculo de la "t" para los coeficientes del modelo estimados por regresi\u00f3n log\u00edstica para veh\u00edculos de autotransporte de carga

Variable	Coficiente	Error	Variable "t"
SENTIDO	-1.67111	0.31959	-5.22898
FRECUENCIA MENSUAL DE USO DE LA CARRETERA	-0.10419	0.03453	-3.01686
CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR POR AHORRAR 20 MIN P UNIV-AEROP-CARR 57	0.03504	0.00579	6.05415
Constante	-0.01573	0.63053	-0.02495

En todos los casos los resultados indican que los coeficientes son significativos para el modelo, por lo tanto, las variables s\u00ed aportan informaci\u00f3n explicativa sobre las decisiones de los individuos de la muestra. El \u00fanico valor que result\u00f3 menor a 1.96 fue la constante del modelo para veh\u00edculos de autotransporte de carga, en principio podr\u00eda ser excluida del modelo, sin embargo en el uso del criterio de significancia mediante la variable aleatoria "t" seg\u00fan Horowitz et al (1986) citado por (Quintero Moreno, 2011) se sugiere lo siguiente:

- Para la eliminaci\u00f3n de una variable de un modelo, si el valor "t" para una variable est\u00e1 comprendido entre $[-1,1]$, en principio deber\u00eda ser descartada del modelo, sin embargo, antes de tomar la decisi\u00f3n definitiva de omitirla, es conveniente analizar la especificaci\u00f3n del modelo para verificar la presencia de errores.

B) Criterio de la χ^2

Para la prueba individual de significancia para cada coeficiente estimado, puede usarse la estadística de Wald que bajo la hipostasis nula se distribuye asintóticamente como χ^2 con 1 grado de libertad:

$$Wald = \left(\frac{B}{ErrStd(B)} \right)^2$$

Como se mencionó en el capítulo 3 cuando se usa un software para el cálculo por el método de la máxima verosimilitud, en la lista de outputs generalmente se entrega dentro del resultado la estadística de Wald. El software SPSS Statistics entrega la significación de los coeficientes bajo el título de 'Sig.' en la práctica se adopta un 5% de significación (0.05) así que entre más pequeño es el valor de ésta, es más seguro el rechazo de la hipótesis nula H_0 y la aceptación de la hipótesis alterna, como consecuencia se deduce que los coeficientes B estimados, son estadísticamente diferentes de cero y la elección del usuario está explicada correctamente por los parámetros estimados. En las tablas siguientes se muestra el estadístico de Wald y la significación de cada coeficiente, obtenidos en el software SPSS tanto para las variables seleccionadas en el modelo de los vehículos particulares como el de los vehículos de autotransporte de carga:

- Vehículos particulares

Tabla 43 Criterio del estadístico de Wald y la significancia estadística para los coeficientes del modelo estimados por regresión logística mediante SPSS para vehículos particulares

Variables en la ecuación						
Variable	B	Error estándar	Wald	gl	Sig.	Exp(B)
MOTIVO DE VIAJE			11.387	2	.003	
MOTIVO DE VIAJE (1)	1.433	.438	10.710	1	.001	4.190
MOTIVO DE VIAJE (2)	.725	.286	6.435	1	.011	2.064
CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR POR AHORRAR 20 MIN P UNIV-AEROP-CARR 57	-.038	.005	55.477	1	.000	.962
Constante	-2.325	.249	87.213	1	.000	.098

La significación de cada coeficiente se evalúa con base en el estadístico de Wald, el cual permite contrastar la hipótesis nula ($B_i = 0$) en la muestra y está calculado elevando al cuadrado el cociente del valor estimado del coeficiente B entre su error típico (error estándar):

$$Estadístico\ de\ Wald = \left(\frac{Coeficiente}{E.\ estándar} \right)^2$$

El estadístico de Wald es similar a una t^2 , si el nivel crítico (Sig.) asociado al estadístico de Wald es menor a 0.05, es posible rechazar la hipótesis nula y afirmar que la variable independiente correspondiente sí está relacionada significativamente con la variable dependiente. En la tabla anterior se puede ver que el valor Sig. para cada estadístico de Wald es < 0.05 por lo tanto las variables MOTIVO (variable categórica) y CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR POR AHORRAR 20 MIN P UNIV-AEROP-CARR57 pueden explicar a la variable dependiente: USAR LA NUEVA CARRETERA.

Adicionalmente, en la columna $Exp(B)$ se muestran los valores llamados *razón de las ventajas*, este permite cuantificar en qué medida aumenta el peso de cada coeficiente tomado como referencia el valor 1, por ejemplo para el motivo de viaje 1 se puede ver que es casi el doble con respecto al motivo de viaje 2, lo cual indica la ventaja de los individuos con motivo de viaje Recreación respecto a los individuos con motivo de viaje Trabajo/Negocios/Estudios/ referente a tomar la decisión de usar la nueva alternativa (el nuevo tramo carretero de cuota)

- Vehículos de Autotransporte de carga

Tabla 44 Criterio del estadístico de Wald y la significancia estadística para los coeficientes del modelo estimados por regresión logística mediante SPSS para vehículos de autotransporte de carga

Variables en la ecuación						
Variable	B	Error estándar	Wald	gl	Sig.	Exp(B)
SENTIDO	-1.671	.320	27.342	1	.000	.188
FRECUENCIA MENSUAL DE USO DE LA CARRETERA	-.104	.035	9.101	1	.003	.901
CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR POR AHORRAR 20 MIN P UNIV-AEROP-CARR 57	.035	.006	36.653	1	.000	1.036
Constante	-.016	.631	.001	1	.980	.984

Para el caso de vehículos de autotransporte de carga, las variables SENTIDO (variable categórica), FRECUENCIA MENSUAL DE USO y CANTIDAD DISPUESTA A PAGAR POR AHORRAR 20 MIN P UNIV-AEROP-CARR57 pueden explicar a la variable dependiente: USAR LA NUEVA CARRETERA, la constante en el modelo debe ser eliminada.

4.15 Comprobación del desempeño de la estimación del modelo Logit

Como se mencionó anteriormente dentro del Capítulo 3 no se tiene definida una forma para la evaluación del ajuste de un Modelo Logit, como en el caso del Método de mínimos cuadrados ordinarios y su coeficiente de determinación R^2 , sin embargo, existen propuestas de medición de ajuste. Una forma fácil de efectuar la evaluación de un modelo Logit, es mediante una tabla de clasificación que es una herramienta que puede ayudar a valorar la capacidad predictiva del modelo respecto a los datos:

Tabla 45 Tabla de clasificación de casos genérica para la comprobación del desempeño de la estimación de los coeficientes por regresión logística

Tabla de clasificación de casos		
	Predicciones NO	Predicciones SI
Observaciones NO	Número de observaciones predichas como NO y observadas como NO	Número de observaciones predichas como SI y observadas como NO
Observaciones SI	Número de observaciones predichas como NO y observadas como SI	Número de observaciones predichas como SI y observadas como SI

Cuando se tenga un mayor número de predicciones correctas el modelo está mejor especificado. (Quintero Moreno, 2011)

La tabla de clasificación relaciona los casos observados con los pronosticados y con base en ésta es posible obtener diferentes medidas asociadas a la capacidad predictiva del modelo; para esto la tabla anterior será representada de la siguiente forma:

Tabla 46 Tabla de clasificación de casos genérica para la comprobación del desempeño de la estimación de los coeficientes por regresión logística

Tabla de clasificación de casos			
	Predicciones NO	Predicciones SI	
Observaciones NO	A	B	
Observaciones SI	C	D	N= Total de casos

Las tablas de clasificación para el modelo para vehículos particulares y de autotransporte de carga son:

- Vehículos particulares

Tabla 47 Tabla de clasificación de casos para la comprobación del desempeño de la estimación de los coeficientes por regresión logística mediante SPSS para vehículos particulares

Tabla de clasificación					
			Pronosticado		
			USAR LA NUEVA CARRETERA		Porcentaje correcto
Observado			NO	SI	
Paso 1	USAR LA NUEVA CARRETERA	NO	273	22	92.5
		SI	117	24	17.0
	Porcentaje global				68.1
Paso 2	USAR LA NUEVA CARRETERA	NO	259	36	87.8
		SI	97	44	31.2
	Porcentaje global				69.5
a. El valor de corte es .500					

El porcentaje de casos que el modelo predice perfectamente, es decir que pronostica como negativos y son negativos y aquellos que pronostica como positivos y fueron observados positivos es:

$$\frac{(A + D)}{N} \times 100 = \frac{(259 + 44)}{436} \times 100 = 69.5$$

Este porcentaje es relativamente bajo, por lo tanto, para valorar la capacidad predictiva del modelo se calcularon los valores de sensibilidad y especificidad (Ferrán, 2001). Un modelo con buena capacidad predictiva debería tener valores altos de sensibilidad y de especificidad.

La *sensibilidad* es la capacidad del modelo para detectar como positivos los casos que poseen la característica:

$$Sensibilidad = \frac{D}{(C + D)} \times 100 = \frac{44}{97 + 44} \times 100 = 31.2$$

La especificidad del modelo se refiere a la capacidad que tiene para discriminar correctamente los casos que no poseen la característica:

$$Especificidad = \frac{A}{(A + B)} \times 100 = \frac{259}{259 + 36} \times 100 = 87.8$$

En resumen, el modelo para vehículos particulares tiene una especificidad alta de 87.8% y una sensibilidad baja 31.2%

Por otro lado, la tabla de clasificación para el modelo de los vehículos de autotransporte de carga es:

- Vehículos de autotransporte de carga

Tabla 48 Tabla de clasificación de casos para la comprobación del desempeño de la estimación de los coeficientes por regresión logística mediante SPSS para vehículos de autotransporte de carga

Tabla de clasificación					
Observado			Pronosticado		
			USAR LA NUEVA CARRETERA		Porcentaje correcto
			NO	SI	
Paso 1	USAR LA NUEVA CARRETERA	NO	142	51	73.6
		SI	67	51	43.2
	Porcentaje global				62.1
Paso 2	USAR LA NUEVA CARRETERA	NO	162	31	83.9
		SI	35	83	70.3
	Porcentaje global				78.8
Paso 3	USAR LA NUEVA CARRETERA	NO	160	33	82.9
		SI	34	84	71.2
	Porcentaje global				78.5

a. El valor de corte es .500

Para este segmento el porcentaje global de casos que el modelo pronostica correctamente es:

$$\frac{(A + D)}{N} \times 100 = \frac{(160 + 84)}{311} \times 100 = 78.50$$

La *sensibilidad* del modelo es:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{D}{(C + D)} \times 100 = \frac{84}{34 + 84} \times 100 = 71.2$$

La especificidad del modelo es:

$$\text{Especificidad} = \frac{A}{(A + B)} \times 100 = \frac{160}{160 + 33} \times 100 = 82.90$$

Finalmente, el modelo para vehículos de autotransporte de carga tiene una especificidad y sensibilidad relativamente alta de 82.9% y 71.2% respectivamente, lo cual indica que éste clasifica adecuadamente a los individuos de la muestra.

4.16 Estimación de la demanda

Con base en las probabilidades obtenidas en el punto 4.13 mediante el análisis de la muestra tomada en campo a través de la aplicación de Encuestas de Preferencias Declaradas para vehículos particulares y vehículos de autotransporte de carga y tomando en cuenta los viajes potenciales obtenidos de la EOD de la SCT es posible realizar el cálculo de la cantidad de viajes que podrían ser captados por el nuevo proyecto de carretera de cuota "Universidades – Aeropuerto – Carretera 57", para esto es necesario segmentar los viajes potenciales de la EOD de la misma manera que los viajes de los usuarios en la EPD, es decir, para usuarios de auto se diferencian por MOTIVO DE VIAJE y para vehículos de autotransporte de carga la segmentación será por cada SENTIDO de circulación (en dirección hacia Querétaro o hacia la Ciudad de México), esto se muestra en la tabla 47:

- Vehículos particulares

Tabla 49 Segmentación de los viajes potenciales de la EOD por MOTIVO principal de viaje de los usuarios de automóviles. Fuente: elaboración propia con datos del Estudio O-D 2016 de SCT

Motivo de viaje usuarios de auto por estación EOD				
Estación	Motivo	M2 Trabajo	M1 Recreación	Total
1: P.C. Palmillas	TPD	6482	7094	13576
	Proporción del total	48%	52%	100%
	TDP Potencial	3193	3459	6652
2: Puerta Palmillas	TPD	1343	1311	2654
	Proporción del total	51%	49%	100%
	TDP Potencial	1003	964	1967
3: San Sebastián	TPD	2852	1796	4648
	Proporción del total	61%	39%	100%
	TDP Potencial	1904	1217	3121
	Total TDP	10677	10201	20878
	Total TDP Potencial	6100	5640	11740

Multiplicando las probabilidades obtenidas en el punto 4.13 para vehículos particulares por los viajes potenciales de la tabla anterior resultan los viajes captados por el nuevo proyecto carretero de cuota los cuales serán menos al incrementar el precio de la cuota:

Capítulo 4. Estudio de caso: Aplicación del modelo Logit Binomial para la estimación de demanda de Transporte

Tabla 50 Cálculo de la cantidad de viajes captados a USAR LA NUEVA CARRETERA usuarios de vehículos particulares

Número de viajes captados a USAR LA NUEVA CARRETERA (Vehículos Particulares)										
	Cuota (MXN)									
Motivo de viaje	\$10.00	\$ 20.00	\$ 30.00	\$ 40.00	\$ 50.00	\$ 60.00	\$ 70.00	\$ 80.00	\$ 90.00	\$100.00
1 Vacaciones	1230	900	646	456	319	221	153	105	72	49
2 Trabajo/Negocios/Estudios	737	522	365	254	175	120	82	56	38	26

- Vehículos de carga

Tabla 51 Segmentación de los viajes potenciales de la EOD por SENTIDO de circulación de los usuarios de vehículos de carga. Fuente: elaboración propia con datos del Estudio O-D 2016 de SCT

Sentido de circulación vehículos de carga por estación				
Estación	Sentido	0		Total
		Hacia Querétaro	Hacia Cd. De México	
1: P.C. Palmillas	TPD	6517	8441	14957
	Proporción del total	44%	56%	100%
	TDP Potencial	3158	4090	7248
2: Puerta Palmillas	TPD	1156	1064	2220
	Proporción del total	52%	48%	100%
	TDP Potencial	481	442	923
3: San Sebastián	TPD	1425	1365	2790
	Proporción del total	51%	49%	100%
	TDP Potencial	669	641	1310
	Total TDP	9097	10870	19966
	Total TDP Potencial	4307	5174	9481

De manera similar al caso automóviles, para obtener el número de viajes en vehículos de carga que serían captados por el nuevo proyecto, se toman en cuenta los viajes seleccionados como potenciales en la EOD y las probabilidades de escoger la nueva alternativa, obtenidas en el punto 4.13 por el modelo Logit Binomial definido:

Tabla 52 Cálculo de la cantidad de viajes captados a USAR LA NUEVA CARRETERA usuarios de vehículos de carga en el sentido de circulación 0

Número de viajes captados a USAR LA NUEVA CARRETERA (Vehículos de carga)										
sentido = 0 desde CDMX	Cuota (MXN)									
	\$ 60.00	\$ 80.00	\$100.00	\$120.00	\$140.00	\$160.00	\$180.00	\$200.00	\$220.00	\$240.00
Frecuencia mensual de uso (veces)										
2	556	295	152	77	38	19	9	5	2	1
4	664	357	185	94	47	24	12	6	3	1
6	790	432	226	115	58	29	14	7	4	2
8	934	520	275	141	71	36	18	9	4	2
10	1095	623	333	172	87	44	22	11	5	3
12	1274	743	403	210	107	54	27	13	7	3
14	1468	879	486	256	131	66	33	16	8	4
16	1676	1034	584	311	160	81	41	20	10	5
18	1893	1207	697	377	195	99	50	25	12	6

Tabla 53 Cálculo de la cantidad de viajes captados a USAR LA NUEVA CARRETERA usuarios de vehículos de carga en el sentido de circulación 1

Número de viajes captados a USAR LA NUEVA CARRETERA (Vehículos de carga)										
sentido = 1 hacia CDMX	Cuota (MXN)									
Frecuencia mensual de uso (veces)	\$60.00	\$80.00	\$100.00	\$120.00	\$140.00	\$160.00	\$180.00	\$200.00	\$220.00	\$240.00
2	2280	1454	840	454	236	120	60	30	15	7
4	2548	1681	997	548	287	147	74	37	18	9
6	2817	1926	1176	659	349	179	91	45	23	11
8	3081	2184	1376	788	424	219	111	56	28	14
10	3334	2450	1596	938	512	267	136	69	34	17
12	3573	2719	1835	1109	617	326	167	84	42	21
14	3794	2986	2089	1301	739	395	204	103	52	26
16	3994	3244	2353	1514	881	478	249	127	64	32
18	4173	3488	2621	1747	1044	577	303	155	78	39

Al visualizar los números obtenidos en estas dos últimas tablas, es importante identificar que, de manera análoga a los viajes en automóvil, la cantidad de usuarios de camiones de carga que elegirían usar la nueva alternativa de cuota, disminuye cuando el costo del peaje aumenta.

Por otro lado, es conveniente realizar una desagregación de los vehículos de carga ya que los costos de los peajes establecidos en las carreteras de cuota en México generalmente son diferentes para cada tipo y/o tamaño en que la SCT clasifica a los vehículos. Con ese propósito los viajes potenciales de vehículos de carga de la EOD de manera desagregada por tipo de vehículo se muestran a continuación:

Tabla 54 Desagregación de los viajes potenciales de los usuarios de vehículos de carga en la EOD por cada SENTIDO de circulación. Fuente: elaboración propia con datos del Estudio O-D 2016 de SCT

Desagregación de viajes en vehículos de carga en la EOD									
Estación		B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	OTROS	Total
1: P.C. Palmillas	Sentido = 0 Hacia Querétaro	418	373	382	1569	124	304	123	
	Sentido = 1 Hacia Cd. De México	502	447	459	1884	149	365	148	
2: Puerta Palmillas	Sentido = 0 Hacia Querétaro	21	118	58	109	59	37	17	
	Sentido = 1 Hacia Cd. De México	26	142	69	131	71	44	21	
3: San Sebastián	Sentido = 0 Hacia Querétaro	82	191	95	185	22	8	13	
	Sentido = 1 Hacia Cd. De México	98	229	115	222	27	9	15	
Subtotales	Sentido = 0 Hacia Querétaro	521	681	535	1863	205	349	153	4308
	Sentido = 1 Hacia Cd. De México	626	819	643	2237	247	419	184	5174
Total									9481

Con la anterior desagregación es posible calcular la demanda potencial en viajes (TDP) que podrían ser captados para usar el nuevo proyecto carretero “Universidades – Aeropuerto – Carretera 57” bajo un esquema hipotético de precios del peaje o cuota para cada tipo de vehículo, para esto, se han obtenido los precios actuales de los peajes establecidos en las casetas de cobro P.C. Palmillas (Carretera Federal 57) y Chichimequillas (Libramiento Noreste de Querétaro) con el propósito de hacer una propuesta del costo monetario o cuota que podría asignársele a la nueva alternativa:

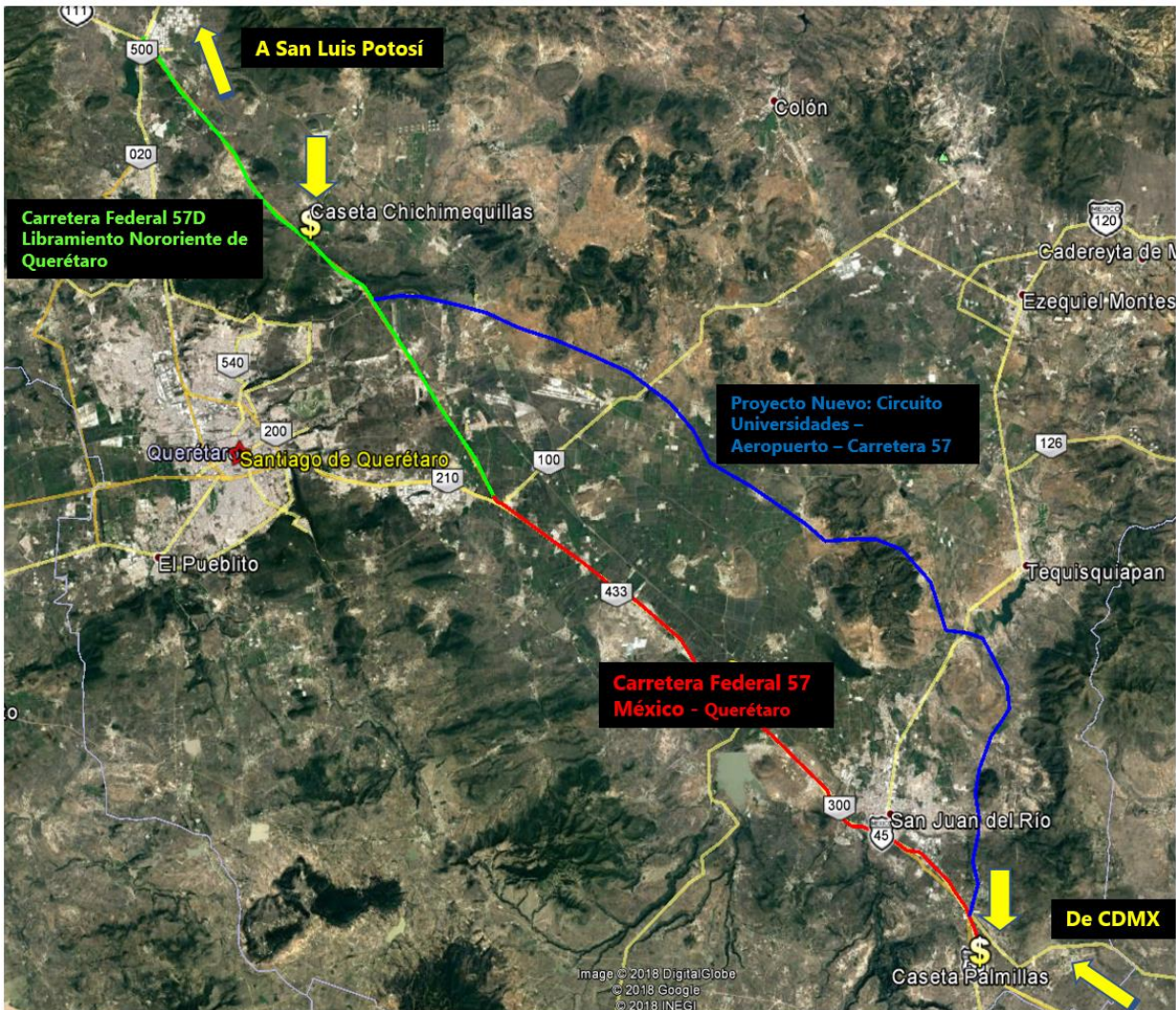


Fig. 74 Localización geográfica de las casetas de cobro “P.C. Palmillas” y “Chichimequillas” sobre vialidades del área de interés. Fuente: Google Earth 2018

Tabla 55 Tarifas actuales de los peajes establecidos en la plaza de cobro No. 5 “P.C. Palmillas”. Fuente: Portal Web de SCT, Tarifas vigentes 2018

Cuotas actuales P.C. Palmillas											
Autos	Autobuses			Camiones							
	2 ejes	3 ejes	4 ejes	2 ejes	3 ejes	4 ejes	5 ejes	6 ejes	7 ejes	8 ejes	9 ejes
\$ 83.00	\$ 175.00	\$ 175.00	\$ 175.00	\$ 167.00	\$ 167.00	\$ 336.00	\$ 336.00	\$ 489.00	\$ 489.00	\$ 489.00	\$ 489.00

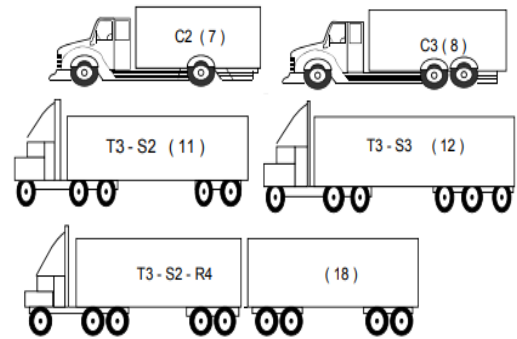
Tabla 56 Tarifas actuales de los peajes establecidos en la plaza de cobro “Chichimequillas”. Fuente: Portal Web de SCT, Tarifas vigentes 2018

Cuotas actuales Libramiento Noreste de Querétaro											
Autos	Autobuses			Camiones							
	2 ejes	3 ejes	4 ejes	2 ejes	3 ejes	4 ejes	5 ejes	6 ejes	7 ejes	8 ejes	9 ejes
\$ 47.00	\$ 65.00	\$ 65.00	\$ 65.00	\$ 65.00	\$ 65.00	\$ 65.00	\$ 70.00	\$ 70.00	\$ 90.00	\$ 90.00	\$ 90.00

Partiendo del hecho que en la EOD la clasificación para vehículos de carga considera cinco tipos diferentes de camiones, se identificaron cuáles son las cuotas que éstos pagan actualmente en las casetas de cobro del área de interés.

Tabla 57 Cuadro comparativo de cuotas vigentes para cada tipo de vehículo de carga. Fuente: SCT, 2018

Tipo de vehículo	Cuota P.C. Palmillas	Cuota Chichimequillas
C2	\$ 167.00	\$ 65.00
C3	\$ 167.00	\$ 65.00
T3-S2	\$ 336.00	\$ 70.00
T3-S3	\$ 489.00	\$ 70.00
T3-S2-R4	\$ 489.00	\$ 90.00



Y de la EPD se obtuvieron la cuota o cantidad monetaria promedio dispuesta a pagar de los usuarios de la muestra para hacer uso de un nuevo tramo de carretera de cuota:

Tabla 58 Cantidad promedio dispuesta a pagar como cuota de cada segmento de usuarios de camiones de carga, para hacer uso de la nueva alternativa propuesta. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V.

Tipo de vehículo	Disponibilidad promedio al pago de cuota (MXN)
CAMIÓN DE 2 EJES	\$ 27.05
CAMIÓN DE 3 EJES	\$ 57.14
CAMIÓN DE 4 EJES	\$ 86.69
CAMIÓN DE 5 EJES	\$ 95.93
CAMIÓN DE 6 EJES	\$ 91.78
CAMIÓN DE 7 O MÁS EJES	\$ 86.84

Esta información demuestra que las cuotas que podrían establecerse para los vehículos de carga en el nuevo proyecto “Universidades – Aeropuerto – Carretera 57” deberían ser parecidas a aquellas con las que opera el Libramiento Noreste de Querétaro (caseta de cobro Chichimequillas), ya que de ser más costosas la captación hacia esta nueva alternativa sería menor.

Para el caso de los usuarios de automóvil esta situación se repite y el monto dispuesto a pagar como cuota para este segmento de demanda en la EPD es:

Tabla 59 Cantidad promedio dispuesta a pagar como cuota de los usuarios de camiones de carga, para hacer uso de la nueva alternativa propuesta. Fuente: Elaboración propia con base de datos del Informe O-D Empresa Berumen, S.A. de C.V.

Tipo de vehículo	Disponibilidad promedio al pago de cuota (MXN)
VEH PARTICULARES	\$ 29.70

Con base en estos datos se propone a continuación un escenario hipotético en el cobro de las cuotas para cada tipo de vehículo con el fin de obtener la demanda en el nuevo proyecto carretero para su año base, las consideraciones más importantes son las disponibilidades al pago por parte de los usuarios tanto de automóviles como camiones de carga, y la frecuencia de uso mensual (sólo para el caso de los vehículos de carga).

Tabla 60 Propuesta de un escenario hipotético: Cuotas proyecto: Circuito “Universidades – Aeropuerto – Carretera 57”

Escenario hipotético: Cuotas proyecto: Circuito “Universidades – Aeropuerto – Carretera 57”											
Autos	Autobuses			Camiones							
Autos	2 ejes	3 ejes	4 ejes	2 ejes	3 ejes	4 ejes	5 ejes	6 ejes	7 ejes	8 ejes	9 ejes
\$ 47.00	\$ 65.00	\$ 65.00	\$ 65.00	\$ 65.00	\$ 65.00	\$ 65.00	\$ 70.00	\$ 70.00	\$ 90.00	\$ 90.00	\$ 90.00

Recalculando con base en la desagregación de vehículos de carga y tomando en cuenta el escenario hipotético en el cobro de cuotas, la captación del nuevo proyecto: circuito “Universidades – Aeropuerto – Carretera 57” mediante el modelo Logit definido tanto para camiones de carga y vehículos particulares, con ayuda de una hoja de cálculo se tienen los siguientes resultados:

Tabla 61 Estimación del Transito Promedio Diario captado por el proyecto: Circuito “Universidades – Aeropuerto – Carretera 57” bajo un escenario hipotético de cuotas. Fuente: Elaboración propia

Estimación del TPD proyecto "Universidades - Aeropuerto - Carretera 57"											
A+U	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	OTROS	A + U	B	C	Total
551	494	646	507	1616	178	200	87	551	494	3234	4279

El número de usuarios que podrían ser captados diariamente por la nueva alternativa de cuota permite calcular también los ingresos monetarios que sería posible tener al ser puesta en operación, en la práctica se suelen requerir distintos periodos de tiempo (semanal, mensual, anual) para obtener este indicador. Para ilustrar lo anterior en este caso específico se presenta la recaudación de ingresos anuales que del proyecto circuito “Universidades – Aeropuerto – Carretera 57” se podría redituarse:

Tabla 62 Estimación de los ingresos económicos del proyecto: Circuito “Universidades – Aeropuerto – Carretera 57” bajo un escenario hipotético de cuotas. Fuente: Elaboración propia

Estimación de ingresos anuales del proyecto "Universidades - Aeropuerto - Carretera 57" (MXN millones)											
A+U	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	OTROS	A + U	B	C	Total
\$9.45	\$11.72	\$15.33	\$12.03	\$41.29	\$4.55	\$6.57	\$2.86	\$9.45	\$11.72	\$82.62	\$103.79

Para complementar el análisis a continuación se presentan las condiciones operativas actuales del Libramiento Noreste de Querétaro con el fin de poder plantear una comparación entre los resultados obtenidos para el nuevo proyecto de cuota y las características actuales del libramiento existente, ya que éste representa una infraestructura similar al proyecto planteado:

Tabla 63 TPDA actual en la plaza de cobro “Chichimequillas”

TPDA Caseta de cobro Chichimequillas (Libramiento Noreste de Querétaro)											
A+U	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	OTROS	A + U	B	C	Total
7424	746	746	1119	5275	586	1172	693	7424	746	9590	17760

Tabla 64 Estimación de ingresos económicos en la plaza de cobro “Chichimequillas” con base en el TPDA actual y las cuotas vigentes establecidas.

Estimación de ingresos anuales Caseta de cobro Chichimequillas (Libramiento Noreste de Querétaro) (MXN millones)											
A+U	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	OTROS	A + U	B	C	Total
\$127.36	\$17.70	\$17.70	\$26.55	\$134.77	\$14.97	\$38.51	\$22.75	\$127.36	\$17.70	\$255.24	\$400.30

En términos generales el volumen de vehículos captados a usar el nuevo proyecto de cuota: circuito “Universidades – Aeropuerto – Carretera 57” es bajo, sobre todo si se plantea una comparación con respecto a la captación que presenta otra infraestructura carretera ya existente que tiene características operativas similares (Libramiento Noreste de Querétaro), ya que bajo la metodología aplicada en este estudio de caso, el proyecto propuesto sólo puede captar aproximadamente el 25% tanto del volumen de TPD así como de los recursos económicos captados por el Libramiento Nororiente de Querétaro, por lo tanto se podría afirmar que la nueva alternativa carretera de cuota propuesta no es una solución rentable o redituable en este punto.

El análisis llevado a cabo puede establecer que una razón para describir este resultado es la poca disposición de los usuarios para el pago de cuotas, sin embargo, cabe señalar que los resultados obtenidos para el caso de vehículos de carga resultan susceptibles para la realización de un estudio financiero más profundo porque se obtuvo que, entre más frecuente es el uso del tramo carretero, es más probable que se tenga la disposición de pagar una cuota o peaje por parte de esos usuarios.

Conclusiones

La planeación de cualquier sistema de transporte tiene como componente fundamental la estimación de demanda, ya que en todos los casos se requerirán saber los volúmenes aproximados de usuarios que la implementación o ampliación de un servicio podrían captar. El proceso de estimación de demanda de transporte parte de identificar y analizar las causas o factores que provocan que los individuos tomen la decisión de usar cierto sistema de transporte para realizar su viaje, por lo tanto, es importante la obtención de datos de dichas causas mediante algún método especializado, con el propósito de aplicar una metodología que ayude a explicar el comportamiento de los usuarios respecto de sus elecciones.

En este trabajo se encontró que dentro de la literatura existente, entre los años 60 y hasta los 80 la estimación de demanda dentro del campo de estudios de transporte se realizaba partiendo de un enfoque agregado, es decir, que para las estimaciones se usaban promedios de datos obtenidos mediante la observación de grandes muestras (enfoque de preferencias reveladas), lo cual fue un referente para la posterioridad pero los resultados que se obtenían no eran tan precisos como se necesitaba, así que como una solución alternativa, a finales de la década de los años 70 surgieron las estimaciones de demanda en el campo de investigación de mercados, basadas en un enfoque desagregado de elección de los usuarios, ya que se comenzaron a utilizar datos obtenidos mediante encuestas elaboradas con más especialización en las cuales se pudieron incluso obtener información de las preferencias de los individuos y atributos de servicios aun inexistentes en el mercado (enfoque de preferencias declaradas).

En el campo de estudios de transporte actualmente la modelación de demanda se fundamenta en métodos basados en el enfoque desagregado y se parte de la Teoría de la Utilidad, la cual establece que los usuarios elegirán de entre un conjunto de opciones disponibles, aquella alternativa que les produzca una mayor utilidad, si bien esta teoría surgió en el campo de la economía, aplicada al transporte, es útil para la modelación de las preferencias de elección de los usuarios del sistema, enfrentados a un conjunto de opciones o alternativas de transporte, ya que éstos siempre buscarán las condiciones de viaje menos inconvenientes, lo que significa que tenderán a maximizar su utilidad de viaje.

Para la modelación de demanda de transporte es necesario un modelo matemático que permita al menos replicar el proceso de decisión de los usuarios, dicho modelo se debe desarrollar en el contexto probabilístico porque debe explicar situaciones en las cuales se tiene una variación en la elección de los individuos, ya que puede presentarse que éstos eligen de manera distinta cuando son enfrentados a una misma oferta de opciones, pero circunstancias diferentes. En la práctica, para la solución del problema de estimación de demanda, es común el uso de modelos de elección discreta, particularmente el modelo Logit suele ser una alternativa recurrente, porque es relativamente fácil de operar.

En este trabajo el uso del modelo Logit Binomial permite dar solución a una situación para la cual la metodología de las elecciones discretas resulta ser conveniente, ya que se analizó el escenario en el cual los usuarios deben elegir entre un conjunto de opciones de ruta para realizar su viaje, aunque en este caso se presentó una dicotomía simple que consiste en elegir entre la alternativa actual: tramo libre (Carretera Federal 57) y una alternativa propuesta: tramo de cuota circuito "Universidades – Aeropuerto – Carretera 57" (situación hipotética planteada), se ha ilustrado la importancia del análisis de datos obtenidos tanto de preferencias reveladas (como las Encuestas Origen – Destino), así como de preferencias declaradas (encuestas de preferencias declaradas EPD) para la construcción de un modelo que ayude a replicar el comportamiento de los usuarios observado en la muestra, respecto de la variable independiente (elección Sí o No usar el nuevo tramo de cuota), definido o explicado por las variables independientes que permiten conocer cuáles son los factores que influyen a que los usuarios tomen la decisión de elegir o descartar una opción en particular para realizar su viaje. Dado que se usó un contexto probabilista, los resultados obtenidos son probabilidades de elección de los usuarios, específicamente de elegir la nueva alternativa propuesta, descartando la alternativa existente o actual, de esta manera fue posible calcular la captación en unidades de viajes.

Finalmente, con la cantidad de viajes captados se planteó el escenario hipotético en el cual se propusieron los precios de las cuotas que podrían ser establecidas por la entidad que operaría la nueva infraestructura para cada tipo de vehículo, de esta manera se obtuvieron los ingresos anuales que se producirían, lo cual serían parte de un conjunto de factores a tomar en consideración para la toma de decisiones.

El uso del modelo Logit binomial en este caso específico es adecuado porque es posible identificar sólo pocas rutas alternativas y mediante encuestas obtener los pares O-D relevantes. Por lo tanto, aplicar modelos de elección discreta resulta ser lo más conveniente al revisar dentro de la literatura

de modelación de transporte. Dado que se aborda la situación de una carretera interurbana (alternativa actual única), puede establecerse que se trata de un *proyecto simple*, el cual tiene un número limitado de alternativas, es decir, una ruta existente y una alternativa de cuota propuesta; además, es posible agrupar a los usuarios potenciales de la nueva alternativa de cuota, dentro de una cantidad limitada de zonas.

En el modelo Logit, la aplicación de una función exponencial permite calcular la captura de usuarios con base en la diferencia de costos generalizados de viaje entre la alternativa actual y la propuesta (con cobro de cuota). Las desventajas o limitaciones de modelo Logit binario son que deja de ser adecuado cuando además de la ruta de cuota propuesta, existen múltiples rutas alternativas.

Adicionalmente y con base en los resultados obtenidos con el modelo Logit para el estudio de caso presentado en este trabajo, algunas recomendaciones pueden centrarse en abordar la problemática desde un punto de vista enfocado en el mejoramiento de las condiciones físicas de la vialidad existente (Carretera Federal 57) para aumentar su capacidad, específicamente analizar la posibilidad de aumentar el número de carriles. Según el Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras de la SCT (2018), el número de carriles depende de la jerarquía de la carretera, de la calidad operativa que se planea y también de la localización geográfica de ésta respecto al entorno ya sea rural o urbano. Dado que las carreteras se construyen con base en la demanda esperada, el número de carriles debe ser el necesario para alcanzar el nivel de servicio establecido o planeado, pero pueden realizarse ampliaciones por etapas y cada una de estas fases deben cubrir un horizonte de al menos 20 años. Es importante señalar que, en los puentes, viaductos y túneles, se deben mantener las secciones transversales definidas en el proyecto. Por otro lado, el análisis de capacidad y nivel de servicio se llevan a cabo con especificaciones técnicas sustentadas en el Reglamento sobre Peso, Dimensiones y Capacidad de los Vehículos de Autotransporte que Transitan en los Caminos y Puentes de Jurisdicción Federal publicado en el DOF (Diario Oficial de la Federación) publicado en octubre 19 del 2000.

Bibliografía

- Arancibia C., S. (2012). *Estadística Aplicada y Econometría*. Obtenido de Presentación académica Magister en Gestión y Políticas Públicas, Universidad de Chile:
<https://es.slideshare.net/wneyra/presentacin-cursomultivariable>
- Berlanga-Silvente, V., & Villá-Baños, R. (2014). Cómo obtener un modelo de regresión Logística Binaria con SPSS. *REIRE Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, 105-117.
- Cal y Mayor R, R., & Cárdenas G., J. (2007). *Ingeniería de Tránsito, Fundamentos y aplicaciones 8a Edición*. México, D.F. : Alfaomega.
- Camareno Rioja, L., Almazán Llorente, A., & Mañas Ramírez, B. (s.f.). *Regresión Logística: Fundamentos y aplicación a la investigación sociológica*. Obtenido de
https://www2.uned.es/socioestadistica/Multivariante/Odd_Ratio_LogitV2.pdf
- Figueroa, L. M. (26 de Noviembre de 2014). *Tabla de Distribución Normal*. Obtenido de
http://lmiguel50.blogspot.com/2014/11/tabla-de-la-distribucion-normal_26.html
- Gámez Ortiz, J. M. (2016). *Modelización mediante regresión logística para estimación de proporciones en encuestas complejas*. Granada: Trabajo de fin de Máster, Universidad de Granada.
- Gobierno del Estado de Querétaro. (2016). *PLAN ESTATAL DE DESARROLLO QUERÉTARO 2016-2018*. Obtenido de Portal del Gobierno de Querétaro:
http://www.queretaro.gob.mx/BS_ped16-21/
- Grupo Radar: Investigación de mercado y opinión. (5 de Enero de 2019). *Grupo Radar*. Obtenido de <http://www.gruporadar.com.uy/01/?p=567>
- Hernández García , S., Cruz González , G., Arroyo Osorno , J., González García , J., & Torres Vargas , G. (2017). *Concesiones carreteras en México, una aproximación a su productividad económica como medida de desempeño*. Obtenido de Portal del Instituto Mexicano del Transporte :
<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt497.pdf>
- INEGI. (s.f.). *Mapa de la Red Nacional de Caminos 2016 (SHP)*. Obtenido de Portal INEGI versión beta: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825219000>
- INEGI. (s.f.). *Mapas de Querétaro (SHP)*. Obtenido de Portal INEGI versión beta:
<http://www.beta.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=22>
- INEGI. (s.f.). *México en cifras*. Obtenido de Mapas de áreas geograficas de México:
<http://www.beta.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/>
- ITDP Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo. (2012). *Planes Integrales de Movilidad: Lineamientos para una movilidad urbana sustentable*. Obtenido de ITDP:
<http://mexico.itdp.org/multimedia/infografias/jerarquia-de-la-movilidad-urbana-piramide/>
- Mendoza Díaz , A., Abarca Pérez, E., & Saucedo Rojas , M. G. (2011). *Prácticas para evaluar la calidad de infraestructura carretera de cuota*. Obtenido de Portal del Instituto Mexicano del Transporte : <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt353.pdf>
- Mendoza, J. E. (2017). Financiarización y sector carretero en México. *Revista Problemas del Desarrollo*, 85-112.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú. (Enero de 2010). *METODOLOGÍA DE ACTUALIZACIÓN DEL MODELO DE TRANSPORTES DEL ÁREA METROPOLITANA*

- DE LIMA Y CALLAO*. Obtenido de <https://docplayer.es/1239121-1-1-el-enfoque-de-sistemas-6-2-los-modelos-de-transporte-10-2-1-modelo-secuencial-de-cuatro-etapas-11-2-1-1-generalidades.html>
- Olmedo López, J. L. (2013). *Estimación del Valor Subjetivo del Tiempo de los usuarios de carreteras de cobro de cuota*. México, D.F.: Tesis de Maestría Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ortúzar, J., & Román, C. (2003). El problema de modelación de demanda desde una perspectiva desagregada: el caso del transporte. *EURE*, vol. XXIX, núm. 88, 149-171.
- Ortúzar, J., & Willumsen, L. (2008). *Modelos de Transporte*. Santander, España: Ediciones de la Universidad de Cantabria.
- Poder Ejecutivo del Estado de Querétaro. (2016). *Proyectos carreteros Propuestos. Presentación de la Comisión Estatal de Infraestructura de Querétaro*. Santiago de Querétaro, Querétaro, México.
- Poon Hung, C. (s.f.). *CARRETERAS*. Obtenido de Portal Facultad de Ingeniería UNAM : <http://dicyg.fi-c.unam.mx/~eventos/Sistemas/Carreteras.pdf>
- Quintero Moreno, E. (2011). *Métodos de elección discreta en la estimación de la demanda de transporte*. Obtenido de Portal Web del Instituto Mexicano del Transporte: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt335.pdf>
- Raveau, S., Ortúzar, J., & Rizzi, L. (2017). *Introducción a los modelos de demanda de transporte*. Chile. Recuperado el 2017-2018, de <https://www.coursera.org/learn/demanda-de-transporte>
- Salas Esparza, C. P. (2013). Incidencia y equidad de acceso a las autopistas de cuota en México. *REALIDAD, DATOS Y ESPACIO. REVISTA INTERNACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA*, 54-65.
- SCT - Dirección General de Servicios Técnicos. (2016). *Estudio Origen y Destino*. Obtenido de Portal SCT: <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/origen-y-destino/2016/>
- SCT - Dirección General de Servicios Técnicos. (s.f.). *Capacidades y Niveles de Servicio 2014-2016*. Obtenido de Portal SCT: <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/capacidades-y-niveles-de-servicio/>
- SCT - Dirección General de Servicios Técnicos. (s.f.). *Datos Viales 2006 - 2017*. Obtenido de Portal SCT: <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/datos-viales/>
- SCT - Dirección General de Servicios Técnicos. (s.f.). *Estadística de Accidentes de Tránsito 2012-2017*. Obtenido de Portal SCT: <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/estadistica-de-accidentes-de-transito/>
- SCT. (Febrero de 2013). *Presentación Infraestructura de Transporte 2013-2018*. Obtenido de Publicaciones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes: http://www.sct.gob.mx/uploads/media/Presentacion_RMC_Infraestructura_de_Transporte_2013-2018_01.pdf
- SCT, Subsecretaría de Transporte. (2016). *Estadística Básica del Autotransporte Federal*. Obtenido de Portal Dirección General de Autotransporte Federal: http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGAF/EST_BASICA/EST_BASICA_2016/Estad%C3%ADstica_B%C3%A1sica_del_Autotransporte_Federal_2016.pdf
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (15 de Julio de 2013). *PROGRAMA DE INVERSIONES EN INFRAESTRUCTURA DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES*. Obtenido de Portal SCT: http://www.sct.gob.mx/fileadmin/GITS/PIITC_-_SCT.pdf

- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (12 de Junio de 2015). *Modificación de la clasificación de carreteras al Art 6 del Reglamento sobre el Peso, Dimensiones y Capacidad de los Vehículos de Autotransporte que Transitan en los Caminos y Puentes de Jurisdicción Federal*. Obtenido de Diario Oficial de la Federación:
http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/UE/2015/Marco_normativo/AVISO_por_el_que_se_modifica_la_clasificaci%C3%B3n_de_las_carreteras__previstas_en_el_Ap%C3%A9ndice_referido_en_el_art%C3%ADculo_6o..pdf
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2016). *Principales Estadísticas del Sector Comunicaciones y Transportes*. Obtenido de Portal SCT:
<http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGP/estadistica/Principales-Estadisticas/PE-2016.pdf>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2018). *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras 2018*. Obtenido de Secretaría de Comunicaciones y Transportes:
http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/manual-pg/MPGC_2018_310718.pdf
- Steer Davis Gleave y Transconsult para la SCT. (Septiembre de 2006). Modelación de Demanda para carreteras de cuota. *Manual de modelación 2006*. México.
- Veitch, T., Alaimo, A., & Walker, L. (2013). Demand Forecasting for Toll Roads: An Approach to More Accurately Forecasting Traffic Volumes. *Australasian Transport Research Forum 2013 Proceedings* (págs. 1-20). Brisbane, Australia: Publication website:
<http://www.patrec.org/atrf.aspx>.
- Wikipedia. (6 de Enero de 2019). *Wikipedia la Enciclopedia libre*. Obtenido de Tamaño de la muestra: https://es.wikipedia.org/wiki/Tama%C3%B1o_de_la_muestra
- World Bank/PPIAF Public-Private Infrastructure Advisory Facility. (March de 2009). Demand forecasting. *Toolkit for Publi-Private Partnerships in Roads and Highways*.