



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE
QUERÉTARO



FACULTAD DE
INGENIERÍA



DIPFI POSGRADO INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO ECONÓMICO Y
AMBIENTAL PRODUCIDO POR
CONGESTIONAMIENTOS EN CASSETAS DE COBRO
EN MÉXICO, MEDIANTE TÉCNICAS DE
MICROSIMULACIÓN**



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO ECONÓMICO Y AMBIENTAL PRODUCIDO
POR CONGESTIONAMIENTOS EN CASETAS DE COBRO EN MÉXICO,
MEDIANTE TÉCNICAS DE MICROSIMULACIÓN**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:

Ing. Víctor Hilario Pérez Echevarría

Dirigido por:

Dr. Eduardo Betanzo Quezada

Dr. Eduardo Betanzo Quezada
Presidente


Firma

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Secretario


Firma

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca
Vocal


Firma

Dr. Guillermo Torres Vargas
Suplente


Firma

M.C. Fernando Mendoza Sánchez
Suplente


Firma


Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la Facultad


Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Octubre de 2018

RESUMEN

Los sistemas de transporte inteligente (ITS) son tecnologías y aplicaciones integradas en las redes de transporte con el objetivo de crear un entorno de transporte seguro y eficiente. Centrándose en las autopistas, las casetas de peaje actualmente presentan problemas de congestión en horas pico, provocados principalmente por la necesidad de que los usuarios tengan que detenerse para pagar por el servicio carretero, generando así contaminación, retrasos de los usuarios, mayores consumos de combustible, entre otros aspectos negativos. Los ITS presentan tecnologías para la mitigación de estos efectos como los sistemas electrónicos de peaje (ETC), estos buscan reducir el congestionamiento producido por las casetas de cobro convencionales, debido a que permiten realizar la transacción del pago para el uso del servicio a altas velocidades, eliminando los tiempos de espera en las colas que se producen, los cuales pueden llegar a ser de 15 hasta 45 minutos. En ese sentido esta tesis tiene como objetivo evaluar ambos sistemas en cuestiones económicas y ambientales, implementando una metodología con el uso de modelos de micro simulación de tráfico mediante el *software* AIMSUN. Se crean escenarios reales e hipotéticos, con la finalidad de comprobar el mejoramiento de los parámetros del tráfico mediante los sistemas ETC. Para esto, se realizaron estudios de tránsito (aforos) en las casetas de cobro Querétaro-Celaya, Palmillas y Tepetzotlán de la autopista México-Querétaro. Además, mediante estadística descriptiva se obtuvieron los datos de entrada para el *software* y se calibraron, los escenarios se simularon, los datos de salida se validaron. Los resultados muestran efectivamente que el sistema de cobro manual genera un mayor impacto económico, reduciéndose este en un 48% a 81% con la implementación del sistema ETC y de un 71% a 91% con el sistema Free Flow Tolling (FFT).

(Palabras Clave: Carreteras de peaje, Optimización de tráfico, Sistemas electrónicos de peaje, micro-simulación, impacto económico, impacto ambiental).

SUMMARY

The intelligent transport systems (ITS) are integrated technologies and applications in transport networks with the aim to create an environment of safe and efficient transportation. Focusing on motorways, the toll booths currently have problems with congestion at peak hours, caused mainly by the need for users to have to stop to pay for the service road, thus generating pollution, delays of the users, higher fuel consumption, among other negative aspects. ITS present technologies for mitigation of these effects, such as the electronic toll collection (ETC), these are aimed at reducing the congestion caused by the conventional toll booths, due to that allow you to make the payment transaction for the use of the service at high speeds, eliminating waiting times in the queues that are produced, which can be up to 15 to 45 minutes. In this sense, the objective of this study is to evaluate both systems on economic and environmental questions, implementing a methodology with the use of micro-simulation models of traffic by the AIMSUN software, creating real and hypothetical scenarios, with the purpose of check with greater precision the optimization of the parameters of the traffic through the systems ETC; for this, studies were conducted in the toll booth of Palmillas, Queretaro-Celaya and Tepetzotlan of the Freeway México-Querétaro and by descriptive statistics were obtained from the input data for the software and calibrated, the scenarios were simulated, the output data is validated and the results, The results show that the manual collection system generates a greater economic impact, reducing this by 48% to 81% with the implementation of the ETC system and 71% to 91% with the Free Flow Tolling (FFT) system.

(Key Words: toll roads, traffic optimization, electronic tolling systems, micro-simulation, economic impact, environmental impact.)

Contenido	Pág.
1.1 Antecedentes	1
1.2 Descripción del problema	3
1.3 Justificación.....	4
1.4 Hipótesis y Objetivo.....	5
1.4.1 Hipótesis	5
1.4.2 Objetivo	5
2. MARCO TEORICO	6
2.1 Sistema de transporte	6
2.1.1 Congestionamiento vial.....	6
2.1.2 Clasificación de carreteras y vehículos	8
2.1.3 Estudios de tránsito	11
2.1.3.1 Herramientas de medición del tráfico vehicular	11
2.1.3.2 Volumen de tráfico.....	11
2.1.3.3 Velocidad, aceleración y desaceleración	12
2.1.3.4 Tasa de saturación del flujo y tiempo perdido.....	14
2.2 Simulación de tráfico	15
2.2.1 Modelos de micro-simulación de tráfico.	16
2.2.2 <i>Software</i> para micro-simulación de tráfico.....	18
2.3 Impacto económico.	18
2.3.1 Costos del usuario:	19
2.3.1.1 Costos por congestionamiento	19
2.3.1.2 Costo de consumo de gasolina o diésel	19
2.3.2.3 Costo del tiempo invertido.	20
2.3.2 Costos externos (externalidades).....	21
2.3.2.1 Externalidad provocada por el congestionamiento.....	22
2.4 Impacto Ambiental.....	22
2.4.1 Tipos de emisiones contaminantes en el transporte.....	23
2.4.2 El impacto de las emisiones.....	23
2.4.2 Modelos de emisiones contaminantes	24
2.4.3 Externalidad provocada por emisiones contaminantes.....	25
3. METODOLOGÍA	27
3.1 Análisis de la información requerida y zona de estudio	28
3.2 Obtención, análisis e interpretación de datos del tránsito	29

3.3	Elaboración del escenario	30
3.4	Simulación microscópica	31
3.5	Obtención, análisis y comparación de resultados	31
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
4.1	Análisis de la información requerida y análisis zona de estudio.....	32
4.1.1	Información requerida.	32
4.1.2	Análisis del área de estudio	32
4.1.3	Geometría y características específicas.....	33
4.2	Obtención análisis e interpretación de los datos del tránsito.....	34
4.2.1	Aforos de las áreas de estudio.....	34
4.2.1.1	Determinación de la hora de máxima demanda.....	35
4.2.2	Dimensiones por tipo de vehículo	37
4.2.3	Velocidades de operación.....	39
4.2.4	Aceleración y desaceleración.....	40
4.2.5	Tiempos de transacción.....	41
4.2.6	Emisiones contaminantes	43
4.3	Elaboración del escenario	44
4.3.1	Elaboración del grafo de la red actual	44
4.3.2	Creación de nodos.....	45
4.3.3	Incorporación de características vehiculares.....	46
4.3.4	Dispositivos de control de tráfico.....	47
4.3.5	Construcción del plan de control maestro	49
4.3.6	Matriz origen y destino	49
4.4.	Micro-simulación de tráfico	50
4.5.	Obtención, análisis y comparación de resultados de las simulaciones	51
4.5.1	Parámetros de influencia vehicular	51
4.5.1.1	Tiempo total de viaje	51
4.5.1.2	Consumo de combustible	53
4.5.1.3	Emisiones contaminantes.....	54
4.5.2	Impacto económico.....	58
4.5.2.1	Costo valor del tiempo.....	58
4.5.2.2	Costo de consumo de combustible	59
4.5.2.3	Costo de emisiones contaminantes	60
4.5.2.4	Impacto económico MTC vs ETC vs FFT	62
4.5.2.5	Punto de transición en tarifa- costo económico	63

5. CONCLUSIONES	65
6. BIBLIOGRAFÍA.....	68
7. ANEXOS.....	74

INDICE DE TABLAS, FIGURAS Y ECUACIONES

TABLA	Pág.
Tabla 1: Clasificación de carreteras.....	8
Tabla 2: Clasificación vehicular SCT.....	9
Tabla 3: Características específicas de las casetas.....	33
Tabla 4: Datos viales 2017.....	34
Tabla 5: Aforo caseta de cobro palmillas.....	35
Tabla 6: Cuarto horario de máxima demanda	36
Tabla 7: Hora de máxima demanda	36
Tabla 8: Dimensiones vehículos tipo C2	37
Tabla 9: Estadística de velocidad de operación en Palmillas.....	40
Tabla 10: Estadística de aceleración en Palmillas	40
Tabla 11: Estadística de desaceleración en Palmillas.....	41
Tabla 12: Estadística de tiempo de transacción en Palmillas	41
Tabla 13: Comparativa tiempos de transacción MTC y ETC.....	42
Tabla 14: Emisiones contaminantes vehículos ligeros.....	43
Tabla 15: Emisiones contaminantes autobuses y camiones C.....	43
Tabla 16: Emisiones contaminantes camiones pesados	44
Tabla 17: Tiempo total de viaje por sistema en palmillas.....	51
Tabla 18: Consumo de combustible por sistema en palmillas	53
Tabla 19: Dióxido de carbono por sistema en palmillas	54
Tabla 20: Dióxido de nitrógeno por sistema en palmillas.....	55
Tabla 21: Partículas suspendidas por sistema en palmillas	55
Tabla 22: VOC por sistema en palmillas.....	55
Tabla 23: Costo del tiempo total de viaje por sistema en palmillas.....	58
Tabla 24: Costo del consumo de combustible por sistema en palmillas	59
Tabla 25: Costo por emisiones contaminantes.....	60
Tabla 26: Costo por CO2 en palmillas	60
Tabla 27: Costo por NOx en palmillas.....	61
Tabla 28: Costo por Pm en palmillas.....	61
Tabla 29: Costo por VOC en palmillas	61
Tabla 30: Costo directos en palmillas.....	62
Tabla 31: Costo externos en palmillas	62
Tabla 32: Peaje acumulado vs Impacto economico	623

FIGURA	Pág.
Figura 1: Esquema metodología	27
Figura 2: Caseta de cobro palmillas	28
Figura 3: Puntos de referencia de levantamiento topográfico en la caseta de cobro palmillas	33
Figura 4: Comportamiento de la hora de máxima demanda (caseta de cobro Palmillas) ..	36
Figura 5: Gráfica de intervalos de largo.....	38
Figura 6: Histograma de largo.....	39
Figura 7: Gráfica comparativa tiempos de transacción	42
Figura 8: elaboración grafo en AutoCAD.....	45
Figura 9: Elaboración grafo AIMSUN	45
Figura 10: Creación de nodos	46
Figura 11: Incorporación de las características vehiculares.....	47
Figura 12: Incorporación dispositivos de control de tráfico.....	48
Figura 13: Incorporación tiempos de transacción	48
Figura 14: Creación del plan de control maestro.....	49
Figura 15: Incorporación de datos de tráfico en matriz O/D.....	50
Figura 16: Realidad vs 2D vs 3D	50
Figura 17: Gráfica tiempo total de viaje (h) por tipo de vehículo en Palmillas.....	52
Figura 18: Gráfica de consumo de combustible (l) por sistema de cobro	54
Figura 19: Gráfica de CO2 (g) por sistema de cobro	56
Figura 20: Gráfica de NOx (g) por sistema de cobro	56
Figura 21: Gráfica de Pm (g) por sistema de cobro	57
Figura 22: Gráfica de VOC(g) por sistema de cobro	57
Figura 23: Gráfica costos totales (\$) por congestión, en caseta de Palmillas	63
Figura 24: Gráfica de punto de transición tarifa-costo económico	63

ECUACIÓN	Pág.
Ecuación 1: Volumen de tráfico.....	12
Ecuación 2: Velocidad media de viaje	13
Ecuación 3: Aceleración.....	13
Ecuación 4: Desaceleración	14
Ecuación 5: Tiempo de transacción	14
Ecuación 6: Tiempo promedio de avance entre transacción.....	14
Ecuación 7: Tasa de saturación de flujo.....	15
Ecuación 8: Modelo de Gipps a flujo libre	16
Ecuación 9: Modelo de Gipps a flujo condicionado	17
Ecuación 10: Velocidad definitiva en el modelo de Gipps	17
Ecuación 11: Posición del vehículo n en la ecuación de movimiento.....	17
Ecuación 12: Costo de tiempo invertido	20
Ecuación 13: Valor de tiempo de pasajeros que viajan por trabajo	21

Ecuación 14: Valor de tiempo de pasajeros que viajan por paseo.....	21
Ecuación 15: Modelo de Panis para estimación de emisiones contaminantes.	25
Ecuación 16: Costo de externalidad	26

Anexo	Pág.
Anexo 1. Aforos de campo y gráficas de hora de máxima demanda.....	75
Anexo 2. Dimensiones de características físicas de los vehículos más representativos ...	80
Anexo 3. Velocidades de operación tomadas en campo y datos estadísticos	82
Anexo 4. Datos de aceleración y desaceleración tomados en campo, y datos estadísticos	87
Anexo 5. Tiempos de transacción tomados en campo y datos estadísticos	92
Anexo 6. Emisiones contaminantes por tipo de vehículo de acuerdo a normativa europea	97
Anexo 7. Tiempos de viaje en Querétaro-Celaya, Palmillas y Tepetzotlán	99
Anexo 8. Consumos de combustible en Querétaro-Celaya, Palmillas y Tepetzotlán	101
Anexo 9. Emisiones contaminantes Querétaro-Celaya, Palmillas y Tepetzotlán	103
Anexo 10. Costos de tiempos de viaje Querétaro-Celaya, Palmillas y Tepetzotlán.....	109
Anexo 11. Costos de consumos de combustible Querétaro-Celaya, Palmillas y Tepetzotlán.....	111
Anexo 12. Costos de emisiones contaminantes Querétaro-Celaya, Palmillas y Tepetzotlán	113
Anexo 13. Tabla y gráfica comparativa de impacto económico y ambiental en la hora de máxima demanda por tipo de sistema de peaje y tipo de día de aforo.....	119

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La utilización de casetas con cobro manual en diversos puntos de una arteria vial, pueden llegar a tener congestionamientos debido al tiempo que se pierde cobrando de manera manual, ya que el sistema tiene una capacidad finita y al mismo carácter aleatorio del proceso.

El cobro de cuotas por medio de un sistema electrónico moderno es el camino hacia un sistema eficaz de cobro de peajes. De acuerdo con Chen (2006), define el *Electronic Toll Collection* (ETC) como una parte de un sistema inteligente de transporte que utiliza las tecnologías de la comunicación para el pago de peajes. De manera similar Athanassiou *et al.* (2006) y Muma (2009) concuerdan que un ETC es un conjunto de tecnologías que permiten automatizar el proceso de pago de peaje por lo que los conductores no tienen que parar y pagar en efectivo; al implementar este tipo de sistemas los vehículos pueden circular de manera continua sin tener demoras de tiempo en este aspecto. Komada *et al.* (2009) dicen que los ETC son un sistema implementado para reducir el retraso que provoca los sistemas de cobro manuales por medio de la eliminación del cobro de peaje en efectivo. Por su parte, Abdelwahab (2016) determina que el método de pago manual afecta de manera directa en el retraso de los vehículos.

Existen también los *Open Road Tolling* (ORT), conocidos de igual manera como *Free Flow Tolling* (FFT) derivados de los ETC, que son definidos por Jadhav y Sabnis (2015) como un conjunto de sistemas tecnológicos que facilitan el cobro de peaje evitando que el conductor requiera de acciones, evitando la transacción en las casetas convencionales.

De una manera más específica, los ETC ayudan directamente a la reducción de tiempo de viaje. Según Soriguera *et al* (2010) y Ovelheiro (2011) el tiempo en una carretera es uno de los indicadores más importantes para estimar el nivel de servicio de esta; por otra parte Garrido (2012) señala que el tiempo de espera puede determinar el costo que provoca la congestión vial. En cambio Askoy y Celikoglu (2014) determinan que algunos de los indicadores más importantes en los niveles de servicio son los diferentes tiempos de espera que

puedan tenerse en una vialidad, por ende si los ETC reducen los tiempos, aumentarían de manera directa el nivel de servicio de dichas vialidades.

Tener tiempos elevados como los mencionados anteriormente por la forma en que operan las casetas de cobros manuales conlleva a producir congestión, provocando que los usuarios estén sujetos a un efecto constante de aceleración y desaceleración de sus vehículos generando un mayor consumo de combustible (Hao *et al*, 2017 y Yu *et al*, 2016) y una mayor generación de emisiones contaminantes como el CO₂, CO, NO_x (Lin y Yu, 2008; Cheng *et al*. 2010, Fu y Gu 2016), en comparación con una circulación a una velocidad de operación constante. En ese sentido Uzunova *et al*. (2012) determinan que los constantes cambios de velocidades y los diferentes cambios de flujo en la zona de las casetas impactan directamente en la cantidad de emisiones contaminantes generadas; por ende el reducir este congestión es crucial para reducir la contaminación, como afirman Hernandez *et al*. (2013), Perez (2014) y Weng *et al* (2015), al señalar que la implementación de los ETC hace que los automóviles no reduzcan su velocidad evitando la acumulación vehicular y promoviendo el ahorro de combustible.

El decremento de los factores mencionados anteriormente conllevan a un ahorro económico, ya que según Tseng *et al*. (2014) la utilización de los ETC impacta directamente en los costos externos. En ese sentido, Salgado *et al*. (2016) exponen que el reducir los tiempos de tráfico genera un ahorro económico importante, ya que el valor del ahorro de tiempo disminuye como consecuencia del congestión (Hensher *et al*, 2016).

En base a los ahorros económicos y ambientales que se puedan producir al cambiar un sistema de cobro por otro más eficiente, se puede emitir normas o políticas públicas para incentivar el uso o implementación de estos, ya que se ha demostrado que se pueden producir beneficios sociales al implementar políticas en países en relación a sus carreteras de peaje (Bao *et al*, 2017; Heras *et al*, 2017).

1.2 Descripción del problema

El sistema de cobro de peaje en las carreteras federales de México está vinculado directamente a la generación de ingresos para la rehabilitación y mantenimiento de los tramos de la misma autopista, y en carreteras concesionadas para recuperar la inversión y obtener la utilidad del operador. Es por eso que es necesario recabar los recursos para llevar a cabo la tarea mencionada anteriormente. Por ende las casetas de cobro son implementadas por razones económicas; y en un esquema básico, en su mayoría el sistema en práctica es de manera manual, en el cual una persona dentro de una caseta cobra en efectivo a los automóviles que circulan, y una vez cubierto el pago procede a dejar pasar al automóvil para que siga su recorrido. Sin embargo este sistema de cobro básico puede generar congestionamientos excesivos, ya que el tiempo de espera acumulado provoca que los automóviles se detengan por un periodo de tiempo o que estos mismos estén acelerando y desacelerando hasta el punto de cobro; por consiguiente, al estar en estas condiciones, los automóviles emiten diversos tipos de partículas derivadas de la combustión que se van acumulando en un cierto punto generando contaminación ambiental. Al mismo tiempo, esta contaminación puede dañar a los mismos usuarios y sobre todo a los operadores de las casetas al estar expuestos a un entorno contaminado, de igual manera se va gastando gasolina que bien podría ser aprovechada para el recorrido efectivo sobre la vía.

Aunque en México ya existen sistemas electrónicos de cobro (como los que emplean los llamados “tags”), son pocos los usuarios que utilizan este sistema, por lo que un gran flujo vehicular sigue pagado de manera manual. Todos estos factores mencionados anteriormente pueden ser relacionados con gastos económicos que impactan directamente a los usuarios, como puede ser el costo de la gasolina o diésel, el costo de tiempo perdido de los usuarios, el costo por inventarios de las mercancías en tránsito y las pérdidas por mermas o deterioro de productos perecederos, lo que de manera indirecta afecta la economía del país.

Si bien se da por hecho que esos congestionamientos tienen distintos impactos, no existen en México estudios en los que se haya calculado o estimado

su magnitud. De manera informal, se ha reportado en los medios de comunicación las consecuencias que puede llegar a tener un congestionamiento en una caseta de cobro, el cual puede generar tiempos de espera considerables como lo reportado por Morales (2016) y Villar (2016) incluso en períodos vacacionales o en puentes laborales. Como lo reportan las notas periodísticas vía internet de Ríos (2016) y Limón (2016) el congestionamiento en estas fechas puede triplicarse.

1.3 Justificación

Para estudiar y analizar de manera formal los beneficios que conlleva la utilización de los ETC y estimar sus potenciales impactos económicos y ambientales, se recomienda la implementación de modelos de simulación de tráfico. Según Barceló (2010) es recomendable implementar dicha simulación ya que “La capacidad para emular la variabilidad de tiempo de los fenómenos de tráfico hace que sea una herramienta única para la complejidad de los sistemas de tráfico”. De manera similar, Salgado *et al.* (2016) mencionan que la micro simulación analiza y evalúa escenarios diversos lo cual proporciona una visualización de tráfico actual, en lo que coinciden con Askoy y Celikoglu (2014) que determinan que la utilización de técnicas de micro-simulación de tráfico genera un análisis más realista.

Existen algunos estudios enfocados en el análisis de implementación de los ETC en las carreteras, algunos de estos están basados en modelos para la determinación de emisiones contaminantes provocadas por los vehículos, como las investigaciones realizada por Panis *et al.* (2006), Lin (2008), Cheng *et al.* (2010) y Uzunova *et al.* (2012). Otros estudios buscan determinar los tiempos de viaje o los niveles de servicio, como las investigaciones de Soriguera *et al.* (2010) Obelheiro (2011) y Askoy (2014) estos últimos implementando la micro-simulación de tráfico. Sin embargo, haciendo énfasis en dos estudios en específico se tiene por una parte la investigación de Tseng *et al.* (2014) quienes elaboraron un método en base a porcentajes para la determinación de emisiones contaminantes producidas por la baja velocidad en las casetas de peaje, tiempo de cobro en dichas casetas y el gasto externo generado por el congestionamiento en estas.

Por otro lado, se tiene otra elaborada por Rampinelli y Simic (2016) quienes elaboraron tres modelos de micro-simulación de tráfico para analizar las ventajas de esta técnica en términos de la optimización del tráfico que conduce a aplicar los ETC y ORT en comparación a las casetas de cobro manual.

1.4 Hipótesis y Objetivo

1.4.1 Hipótesis

La estimación del impacto económico y ambiental provocado por la congestión en casetas de peaje son factores que deben considerarse en la implementación de los sistemas de cobro en casetas de México.

1.4.2 Objetivo

Comparar los sistemas de casetas de cobro manual con respecto a las casetas de cobro electrónico, micro-simulando un escenario actual e hipotético, obteniendo tiempos de viaje, consumo de combustible y emisiones contaminantes, con la finalidad de evaluar el impacto económico y ambiental que generan estos parámetros de manera simultánea y proponer una metodología para justificar la implementación de sistemas de peaje.

Por ende, se aplicará un escenario de micro-simulación de tráfico que analice el sistema actual de caseta de cobro manual y estime cómo los tiempos de viaje, consumos de combustible, y emisiones contaminantes que se generan bajo las condiciones de congestionamiento afectan de manera simultánea a la economía de los usuarios y en externalidades, con la finalidad de que se pueda usar la metodología aplicada en otros áreas o países para considerar la implementación de ETC o la combinación de ambos tipos de sistemas y por ende mejorar el nivel de servicio de la red carretera y reduciendo el daño al medio ambiente.

2. MARCO TEORICO

Con el fin de analizar el congestionamiento inducido por los sistemas de cobro de carreteras federales de peaje en México y compararlos con la implementación de sistemas electrónicos de cobro más modernos, es preciso tener el conocimiento de los aspectos que influyan en este análisis. Por ende, el marco teórico está dividido en cuatro secciones que engloban todo el estudio realizado.

2.1 Sistema de transporte

De acuerdo con Islas (2007) un sistema de transporte es un medio para trasladarse, ligado principalmente a eventos económicos y sociales, los impactos que puede generar son tanto positivos como negativos dependiendo el preámbulo de dónde se vea. Los elementos que integran este sistema son el usuario, el vehículo, la infraestructura, los dispositivos para el control y el medio ambiente.

La calidad de un sistema de transporte puede ser medido a través de cinco principales dimensiones o aspectos determinantes, siendo estos: la fiabilidad, garantía, tangibilidad, empatía y sensibilidad. En cuestión de calidad de operación de las carreteras los parámetros que se miden son: el estado físico, índice de rugosidad internacional (IRI), profundidad de la rodera, nivel de servicio y resistencia a la fricción (Mendoza, 2011). Es necesario considerar que en la evaluación de un sistema de transporte se debe tomar en cuenta que no todos los efectos son medibles con el mismo criterio o patrón y que al ser el humano el usuario de estos sistemas existe mucho dinamismo en las características que pudiera presentar estos sistemas debido a muchos factores exógenos.

2.1.1 Congestionamiento vial

EL congestionamiento es definido como la obstrucción del paso, circulación o movimiento de algo (RAE, 2001). En ese sentido, Thomson y Bull (2002) definen el congestionamiento vial como un efecto en la cual es obstruido el

movimiento vehicular, es decir, una condición en la cual los vehículos que circulan sobre una vialidad avanzan de manera irregular a un flujo normal.

De manera similar, la Conferencia Europea de Ministros de Transporte (EMCT, 2007) define a la congestión vial como un estado de tráfico donde el flujo vehicular está en un constante cambio debido a los cambios de velocidades que tienen los vehículos que circulan por la vialidad, lo cual provoca una alteración de dicho flujo. Por su parte, el autor de esta tesis define el congestionamiento vial como un estado de tráfico en el cual el flujo vehicular se ve afectado por diversas condiciones que provocan la saturación de una red vial.

Este fenómeno se presenta en las carreteras federales cuando su capacidad se ve sobrepasada por el número de vehículos que transitan, teniéndose un nivel de servicio bajo (Moreno *et al.* 2014). Existen otros factores que pudieran afectar al congestionamiento siendo estos el mantenimiento de un tramo, los accidentes, los operativos policiales, la calidad del pavimento y las casetas de cobro, objeto de este estudio.

El congestionamiento vial está presente en las casetas de cobro debido a los cambios de velocidades que provoca la transacción para permitir el uso de dicha vialidad. Para contrarrestar el congestionamiento, el aumento del número de líneas puede beneficiar el flujo, como lo señalan Nagatani, (2014) y Nagatani, (2016) sin embargo según Muma (2009) la implementación de *Electronic Toll Collection* (ETC) puede beneficiar de manera directa en la reducción de dicho congestionamiento debido a que reduce los tiempos. De manera similar Komada *et al.* (2009) determinan que esos factores influyen sobre la densidad y la velocidad de desaceleración, y que el implementar los ETC mejoran el flujo vehicular de manera considerable, sin que ello amerita la ampliación de la infraestructura, es decir, la construcción de más carriles para el cobro. Por su parte Soriguera *et al.* (2010) determinan que el nivel de servicio en casetas de cobro se ve afectado por las longitudes de las colas generadas por el dicho congestionamiento.

2.1.2 Clasificación de carreteras y vehículos

Para micro-simular y analizar el congestionamiento que se presenta en las casetas de cobro y por ende lo que esto genera, es necesario determinar las características físicas de la red vial seleccionada como objeto de estudio, incluyendo a sus casetas de cobro. Por ello, es de suma importancia conocer los tipos de carreteras federales que existen en México, por lo cual se presenta la clasificación de carreteras y la tipología oficial que maneja la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 2016).

Red Nacional. Esta red de carreteras permite un flujo rápido y eficiente de altos volúmenes de tránsito. Conectan ciudades que tienen un elevado movimiento económico, en estas el control de acceso es total por medio de casetas de cobro.

Red Regional. Esta red de carreteras sirven para el transporte entre regiones, su volumen vehicular es de alto a medio, generalmente están conectadas con la red nacional, por ende el control puede ser total o parcial.

Red local. Esta red sirve para el transporte entre localidades de las regiones, el volumen es entre medio y bajo y no tienen control de acceso.

Tabla 1: Clasificación de carreteras.

Tipo de camino		
Camino	Característica	Control de accesos
ET4-A4	Carretera de cuota(Autopista	Total
ET2-A2		Total
A4	Autopista/ carretera libre	Parcial
A2		Parcial
B2	Carretera libre	Sin control de accesos
C		
D	Camino rural	

Fuente: Manual de diseño Geométrico SCT (2016)

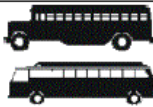


De igual manera, para efectos del trabajo de micro-simulación también es necesario conocer la clasificación vehicular que se va a analizar, por lo que se emplean las dimensiones y configuraciones vehiculares contenidas en la



clasificación oficial adoptada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 2016).





Dicha clasificación está basada en el uso y tamaño de los vehículos: autos (A), autobuses (B) y camiones unitarios (C). Para los camiones de carga articulados existe una tipología más detallada según sus características: la letra T se utiliza para el tracto camión, S para el semirremolque o primera unidad de carga, y por último R para una segunda unidad de carga. A cada una de las letras mencionadas (C, T, S o R) se les agrega un dígito según el número de ejes que acumulen.


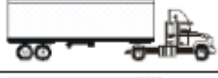



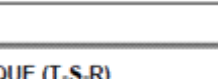
La Tabla 2 muestra la clasificación vehicular total de manera más detallada.

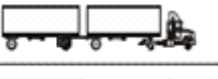
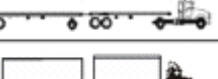
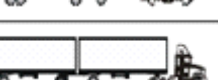


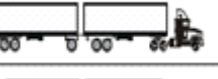

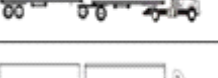
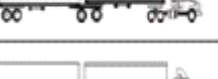
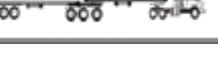

Tabla 2: Clasificación vehicular SCT

AUTOBÚS (B)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	VEHÍCULO
B2	2	6	
B3	3	8 o 10	
B4	4	10	

CAMIÓN UNITARIO (C)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	VEHÍCULO
C2	2	6	
C3	3	8-10	

CAMIÓN-REMOLQUE (C-R)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	VEHÍCULO
C2-R2	4	14	
C3-R2	5	18	
C2-R3	5	18	
C3-R3	6	22	

TRACTOCAMION ARTICULADO (T-S)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO
T2-S1	3	10	
T2-S2	4	14	
T2-S3	5	18	
T3-S1	4	14	
T3-S2	5	18	
T3-S3	6	22	

TRACTOCAMIÓN SEMIRREMOLQUE-REMOLQUE (T-S-R)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO
T2-S1-R2	5	18	
T2-S2-R2	6	22	
T2-S1-R3	6	22	
T3-S1-R2	6	22	
T3-S1-R3	7	26	
T3-S2-R2	7	26	
T3-S2-R3	8	30	
T3-S2-R4	9	34	
T2-S2-S2	6	22	
T3-S2-S2	7	26	
T3-S3-S2	8	30	

Fuente: Nom 012 (2017)

2.1.3 Estudios de tránsito

2.1.3.1 Herramientas de medición del tráfico vehicular

Para la determinación del tráfico vehicular, es decir, para medir la concentración de vehículos en las casetas de cobro, es necesario aforar el área de estudio. De acuerdo con Barceló (2010) el aforo es la base para obtener las variables de tráfico; de manera similar Reyes y Cardenas (2011) definen que para determinar los automóviles que transitan en ciertos intervalos de tiempo, una de las mediciones con mayor importancia es el conteo de vehículos.

Actualmente se cuenta con tecnologías modernas para poder elaborar un aforo. Según el *U.S Department of Transportation* (2006) el método que se está empleando actualmente en los *Electronic Toll Collection* son los radares de multidetección de microondas (Pickford y Blythe, 2006).

Por su parte, De La Llata (1991) define que existen dos métodos de aforo en carreteras federales: en el primero los aforos son permanentes y se realizan por medio de estaciones maestras, es decir por medio de las mismas casetas de cobro; en el segundo método sólo es necesario realizar el conteo durante una parte del año. En esta investigación se obtuvo el aforo por medio de los dos métodos mencionados anteriormente, el primero generado por las casetas de cobro y el segundo por medio de cámaras portátiles de video.

2.1.3.2 Volumen de tráfico

Cal y Mayor (2011) definen el volumen de tráfico como el número de vehículos que transitan por cierto punto a lo largo de una vialidad o de un carril por unidad de tiempo. De manera similar, Wolshon y Pande (2016) definen el volumen de tráfico como la demanda vehicular que se da en algún punto de alguna calzada.

El volumen de tráfico puede ser calculado por la siguiente formula:

$$V = (N)/(t)$$

Ecuación 1: Volumen de tráfico

Donde:

V= Volumen

N =Numero de vehículos

t = Tiempo

También es importante determinar la tasa de flujo, que es definida por el *Transportation Research Board* (TRB, 2010) como el número de vehículos que pasan por un intervalo de tiempo que generalmente es menor de 1 hora, usualmente de 15 minutos.

Teniendo esto en consideración, se determina la hora pico, la cual es el período del día donde la vialidad presenta el mayor volumen de vehículos. Posteriormente se determina el volumen horario de máxima demanda (V.H.M.D) el cual es la hora donde se presenta el mayor volumen dentro del rango de la hora pico, y se genera el factor horario de máxima demanda (FHMD) el cual es el máximo número de vehículos que pasan por una vialidad durante 60 minutos consecutivos.

Estos indicadores ayudan a identificar en qué momento del día es cuando el flujo sobrepasa la capacidad de la vialidad y se provoca el congestionamiento.

2.1.3.3 Velocidad, aceleración y desaceleración

La velocidad es definida como la distancia recorrida por unidad de tiempo, que generalmente es expresada en km/h (TRB, 2010; Mehar *et al*, 2013). Este parámetro es necesario considerarlo para el análisis a realizar, para esto se debe utilizar un valor representativo ya que en un flujo de tráfico se pueden presentar diferentes velocidades individuales. A este valor representativo se le puede llamar velocidad de desplazamiento promedio, el cual puede ser determinado de la siguiente manera.

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n}$$

Ecuación 2: Velocidad media de viaje

Dónde:

V= Es la velocidad media de viaje, en km/h

V_i= Es la velocidad del vehículo, en km/h

n = Es el tamaño de la muestra

Esta ecuación fue utilizada para el análisis de velocidades en flujo libre, debido a que en la zona de congestionamiento de la caseta de cobro se presentan diversas velocidades que no son consideradas de operación. Las velocidades observadas fueron obtenidas por medio de una pistola laser.

La aceleración y desaceleración son variables importantes para diversas aplicaciones, como puede ser los modelos de simulación de tráfico (Masish, 2011; Bokare y Maurya, 2017) En ese sentido y de acuerdo a Rakha *et al.* (2004) la aceleración se midió utilizando un cronómetro y el radar de control de velocidad (Ecuacion 3). De igual manera se calculó por tipo de vehículo, para posteriormente aplicar la estadística descriptiva y obtener la media, máximos y mínimos.

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

Ecuación 3: Aceleración

Dónde:

a = es la aceleración, en m/s²

v₁ = es la velocidad inicial, en m/s²

v₂ = es la velocidad final, en m/s

t₁ = es el tiempo inicial, en segundos (s)

t₂ = es el tiempo final, en segundos (s)

La desaceleración se midió de manera similar a la aceleración, utilizando un cronómetro y el radar de control de velocidad (Ecuación 4). A su vez, se calculó ésta por tipo de vehículo, para posteriormente aplicar la estadística descriptiva y obtener la media, máximos y mínimos.

$$d = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

Ecuación 4: Desaceleración

Dónde:

d = es la desaceleración, en m/s^2 .

v_1 = es la velocidad inicial, en m/s^2

v_2 = es la velocidad final , en m/s

t_1 = es el tiempo inicial, en segundos (s)

t_2 = es el tiempo final, en segundos (s)

2.1.3.4 Tasa de saturación del flujo y tiempo perdido

Según Aycin (2009) para determinar el tiempo perdido es de vital importancia estimar el tiempo de transacción que se genera en las casetas de cobro, el cual está dado por la capacidad que tiene el operador de para cobrar al usuario. Este tiempo está determinado por la siguiente ecuación:

$$C = 3600/\Delta t$$

Ecuación 5: Tiempo de transacción

Donde:

Δt = es el tiempo promedio de avance en segundos entre transacciones sucesivas de vehículos.

Δt puede ser calculado para casetas de peaje manual como las del tipo ETC con el siguiente método:

$$\Delta t_c = T_s + T_m$$

$$\Delta t_{ETC} = h_{ETC}$$

Ecuación 6: Tiempo promedio de avance entre transacción

Dónde:

Δt_c = tiempo de cobro manual

Δt_{ETC} = tiempo de cobro electrónico

T_s = tiempo de servicio

T_m = tiempo de movimiento

h_{ETC} = tiempo horario del ETC

Posteriormente se determina la tasa de saturación de flujo que según el HCM (2011) es el flujo de tráfico por línea.

$$S=3600/h$$

Ecuación 7: Tasa de saturación de flujo

Donde:

S= saturación del flujo (veh/h)

h= saturación horario

2.2 Simulación de tráfico

La simulación de tráfico es un medio con el cual se emulan los componentes de un vehículo cuando fluye por una vialidad, considerando a cada uno de estos como un componente autónomo. Según Barceló (2010) es recomendable implementar dicha simulación ya que “La capacidad para emular la variabilidad de tiempo de los fenómenos de tráfico hace que sea una herramienta única por la complejidad de los sistemas de tráfico”. Por ende, la simulación ayuda a generar soluciones para los problemas de tráfico que se presentan en los sistemas viales.

Existen dos tipos de simulación de tráfico, la macroscópica y la microscópica. Por una parte la simulación macroscópica está basada en la teoría de flujo de tráfico continuo y su objetivo consiste en describir la evolución en términos de espacio-tiempo de las variables que caracterizan los flujos macroscópicos, que son volumen, velocidad y densidad. Por su parte, la simulación microscópica está basada en la descripción de movimiento de cada unidad vehicular que compone la vialidad. Este modelo implica a las variables de aceleración, desaceleración y cambio de líneas, a las cuales cada conductor responde al tráfico que fluye (Barcelo, 2010).

Esta investigación está basada en este último modelo de simulación microscópica o de micro-simulación ya que puede representar de forma más representativa las reacciones de los vehículos que fluyen por las casetas de cobro a estudiar.

2.2.1 Modelos de micro-simulación de tráfico.

Con el objetivo de simular las variables microscópicas que se encuentran en una vialidad, es preciso emplear modelos de simulación ya que estos representan el comportamiento del tráfico en tiempo y espacio.

Los modelos más utilizados para la micro-simulación de tráfico son el de seguimiento vehicular y el de cambio de carril.

El modelo más empleado para el seguimiento vehicular es el propuesto por Gipps (1981), dicho modelo consiste en dos componentes principales: aceleración y desaceleración. El primer componente representa cómo el conductor intenta mantener una velocidad deseada. El segundo representa las limitaciones que tiene el conductor para intentar conducir a la velocidad deseada (Vasconcelos *et al*, 2014).

Este modelo establece la velocidad máxima a la que un vehículo (n) puede acelerar durante un período de tiempo (t, t+T), el cual que está dado por:

$$V_a(n, t + T) = V(n, t) + 2.5 + 2.5a(n)T \left(1 - \frac{V(n, t)}{V^*(n)}\right) \sqrt{0.025 + \frac{V(n, t)}{V^*(n)}}$$

Ecuación 8: Modelo de Gipps a flujo libre

Dónde:

$V(n,t)$ = es la velocidad del vehículo n en un tiempo t

$V^*(n)$ = es la velocidad deseada por el vehículo(n) para la sección dada

$a(n)$ = es la máxima aceleración para el vehículo n

T = es la reacción del tiempo

Por otra parte, la velocidad máxima que el mismo vehículo (n) puede conseguir en el mismo período de tiempo (t,t+T), conforme a las limitaciones y mismas características impuestas por la presencia de otro vehículo (n-1) es:

$$V_b(n, t + T) = d(n)T + \sqrt{(n)^2T^2 - d(n) \left[2\{(n - 1, t) - s - 1\} - x(n, t)\} - V(n, t)T - \frac{V(n - 1, t)^2}{d'(n - 1)} \right]}$$

Ecuación 9: Modelo de Gipps a flujo condicionado

Donde:

$d(n)$ (<0) = Es la máxima desaceleración deseada por el vehículo n

$x(n, t)$ = Es la posición del vehículo n en el tiempo t

$x(n-1,t)$ = Es la posición procedente del vehículo $(n-1)$ en el tiempo t

$s(n-1)$ = Es la longitud efectiva del vehículo $(n-1)$

$d'(n-1)$ = Es la estimación del vehículo $(n-1)$ por la desaceleración deseada

La velocidad del vehículo (n) durante el intervalo de tiempo $(t, t+T)$ es la mínima de las dos expresiones siguientes:

$$V(n, t + T) = \min\{V_a(n, t + T), V_b(n, t + T)\}$$

Ecuación 10: Velocidad definitiva en el modelo de Gipps

La velocidad del vehículo n que circula por la vialidad es adaptada tomando esta velocidad en la ecuación de movimiento:

$$x(n, t + T) = x(n, t) + V(n, t + T)T$$

Ecuación 11: Posición del vehículo n en la ecuación de movimiento

Por otro lado, el modelo más comúnmente empleado para el cambio de carril es el propuesto por Gipps (1986). En este modelo se analiza la necesidad de un cambio de carril, los beneficios del cambio de carril y las condiciones de factibilidad para un cambio de carril dependiendo de la posición del vehículo en la vialidad (Daiheng, 2016). Este es un modelo de decisión en el cual se ve reflejado el comportamiento del conductor. Dicha decisión se basa en una asimilación, la cual está dada cuando el conductor tiene que estar actualizado, es decir si para él es necesario cambiar de carril. Para esto influyen diversos factores como la factibilidad de girar en el carril, la distancia al siguiente giro y las condiciones de tráfico.

2.2.2 *Software* para micro-simulación de tráfico.

Los modelos de micro-simulación son muy complejos ya que son un conjunto de series matemáticas y de logística abstracta que suceden en el mundo real, por lo que se han desarrollado programas de cómputo basados en estos modelos para llevar a cabo la simulación de un modo más interactivo. En la actualidad existen diversos tipos de *softwares* para la micro-simulación de tráfico como lo son el VISSIM, TransModeler, AVENUE, Paramics, AIMSUN, entre otros.

El *software* AIMSUN (*Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks*), tiene la ventaja de contener en sus comandos todo lo necesario para modelar condiciones de congestión y tiempos de espera adecuadamente (Salgado *et al*, 2016). Dicho *software* está basado en los dos principales modelos de micro-simulación de seguimiento vehicular y de cambio de carril. Debido a los constantes cambios de velocidades que provocan los tiempos de transacción en las casetas de cobro (Casas *et al*, 2010), se consideró que el *software* AIMSUN resulta la herramienta idónea para esta investigación.

2.3 Impacto económico.

Uno de los puntos principales de esta investigación es evaluar el impacto económico que provocan los congestiones en casetas de cobro de carreteras federales de México. Para determinar dicho impacto es necesario plantear los diferentes costos de transporte que pueden provocar el congestión en dichas casetas.

Así, De Rus (2006) clasifica los costos del transporte en tres diferentes tipos, el costo incurrido por los productores (C_p), los costos incurridos por los usuarios (C_u), y los costos externos (C_e). Si se suman estos tres costos se puede determinar el costo social que la sociedad tiene que enfrentar por el uso de la infraestructura del transporte.

El impacto económico generado por los congestionamiento en casetas de cobro está dado por los costos incurridos por los usuarios y los costos externos (Li *et al*, 1999; Mahmoud 2007), por lo que se centrará la atención en estos dos.

2.3.1 Costos del usuario:

En el costo de los usuarios se engloban todos los gastos asociados al tiempo invertido, a la operación del vehículo propio, y a los producidos por el congestionamiento. Dichos costos son el consumo de combustible, repuestos, costos de seguros e impuestos y la depreciación del vehículo (Arroyo *et al*, 2016).

2.3.1.1 Costos por congestionamiento

Como ya se ha explicado con anterioridad, cuándo una vialidad se satura se genera congestionamiento, lo cual provoca que las condiciones del tráfico se alteren y por ende la presencia adicional de conductores hace aumentar los costos que soportan los usuarios totales de la infraestructura (Odeck, 2017). Dichos costos se reflejan mayormente en el aumento del costo del tiempo invertido de viaje y en el consumo de gasolina.

2.3.1.2 Costo de consumo de gasolina o diésel

Viendo esto en el sentido del congestionamiento provocado por las casetas, el consumo de combustible se ve alterado, según Burke (2017) por las condiciones que provoca el tráfico acumulado, aumentando el costo de combustible consumido. Según Zegeye *et al*. (2013) el flujo de tráfico influye directamente en el consumo de carburante, coincidiendo Yu *et al*. (2016) al determinar que el constante cambio de velocidades tiene un efecto directo en el consumo de combustible, generando un mayor gasto de este, provocado directamente por el tiempo de espera en las casetas.

El *software* AIMSUN determina por defecto el consumo de combustible que se genera en la micro-simulación, por lo que se puede calcular el costo total de acuerdo al precio de la gasolina o del diésel en el año de análisis (Arroyo, 2016). Por otra parte, es necesario calcular el consumo de combustible en función de los vehículos analizados, ya que el consumo de combustible varía por cada tipo de vehículo (Franzese, 2011; Dindarloo y Indermoosa, 2016; Jinghui y Rhaka, 2016; Qian, 2016; Wang y Rakha, 2016; Geogios, 2017).

2.3.2.3 Costo del tiempo invertido.

El costo de tiempo invertido según De Rus (2006) puede definirse como la valoración monetaria del tiempo que transcurre mientras el usuario se transporta. Dicho tiempo puede ser representado por la siguiente expresión:

$$C_U(q, t) = vtq$$

Ecuación 12: Costo de tiempo invertido

Dónde:

t= Es el tiempo consumido en cada viaje

v= Es el valor de dicho tiempo para el usuario

q= Es el número de usuarios

De manera similar al costo del tiempo, el *software* AIMSUN determina el tiempo medio por usuario, así que también se puede obtener el tiempo por tipo de vehículo acumulado. De acuerdo con Glavic (2017), este valor puede generar cambios en las decisiones de los usuarios para utilizar los sistemas ETC ya que se produce un ahorro de tiempo.

Por su parte Torres (2016), divide este valor de tiempo para pasajeros que realizan viajes con motivo de trabajo y de paseo.

El valor de tiempo con motivos de trabajo está dado por la siguiente expresión:

$$SHP = [(FIP) (SMG) (7)] / HTP$$

Ecuación 13: Valor de tiempo de pasajeros que viajan por trabajo

Dónde:

SHP = valor del tiempo de los pasajeros que viajan por motivo de trabajo, expresado en \$/h

FIP = factor de ajuste del ingreso de la población ocupada (promedio ponderado del ingreso expresado en número de salarios mínimos diarios)

SMG = promedio del salario mínimo general expresado en \$/día

7 = días /semana

HTP = tiempo promedio que labora por semana la población ocupada

El valor del tiempo de los pasajeros cuyo motivo del viaje es de paseo está dado por la siguiente expresión:

$$VT_{pp} = 0,3 H (2)$$

Ecuación 14: Valor de tiempo de pasajeros que viajan por paseo

Dónde:

VT_{pp} = valor del tiempo de los pasajeros que viajan por motivo de paseo

H = 2 (FIP) (SMH)

H = ingreso horario familiar expresado en \$/h

2 = número de miembros de la familia que cuentan con ingreso

FIP = factor de ajuste del ingreso de la población ocupada (promedio ponderado del ingreso expresado en número de salarios mínimos generales diarios)

SMH = salario mínimo horario de la población, expresado en \$/h

2.3.2 Costos externos (externalidades)

Las externalidades en los sistemas de transporte son producidas cuando el tráfico vehicular produce efectos ya sean positivos o negativos en forma de beneficio económico o costos sobre otros agentes. Los efectos positivos que se pueden tener se basan en el mejoramiento a la infraestructura, provocando que los servicios sean eficientes, aumentando la productividad y eficiencia de las redes viales (Bickel, 2006). Entre los efectos negativos o externalidades negativas más destacados se puede mencionar el congestionamiento y la contaminación atmosférica.

2.3.2.1 Externalidad provocada por el congestionamiento

Existen dos costos principales generados por la congestión, uno es el exceso de tiempo que los usuarios gastan para trasladarse sobre una red vial (Hensher, 2016) y el otro es el exceso de consumo de combustible (Zhang, 2016). La información requerida para la cuantificación del tiempo son principalmente los tiempos que ocupan los usuarios para transitar sobre la red, en base a esto se puede estimar las diferencias de tiempos en escenarios bajo condiciones de una circulación fluida y una con congestión. Por su parte, la cuantificación del consumo de combustible se puede generar a partir de la obtención de consumos medios a diferentes velocidades. Esta información puede ser generada a partir de la microsimulación por el *software* AIMSUN, ya que genera tanto los tiempos por usuario como los consumos representativos de combustible.

En cuestión del costo, es necesario distinguir las actividades que tienen los usuarios, ya que es diferente estimar el costo de tiempo de viaje para un desplazamiento de trabajo o de paseo (Torres, 2016). Así, es necesario tener en cuenta que cada valoración económica debe considerar los tipos de vehículos en estudio, por ejemplo, los vehículos ligeros difieren en tipo de combustible y valor de tiempo en comparación a los vehículos pesados (Guo y Xu, 2016).

2.4 Impacto Ambiental.

Otro de los temas importantes a analizar en esta investigación es el impacto ambiental que se genera por las demoras de los vehículos que transitan en carreteras de cuota y que utilizan los sistemas convencionales, en comparación con otros sistemas de cobro más modernos del tipo ITS, principalmente. La contaminación provocada por el tránsito vehicular en las carreteras induce efectos negativos sobre el medio ambiente y la salud pública debido al funcionamiento de los motores de combustión interna que requieren combustible fósil para su propulsión. Tales motores emiten compuestos químicos derivados de la quema de combustibles fósiles (gasolina, diésel y gas licuado). Dichos compuestos son

arrojados a la atmósfera a través el escape del vehículo; además otro tipo de emisiones también pueden liberarse por efecto de la evaporación del combustible y refrigerante, así como partículas materiales derivadas del desgaste de los frenos y llantas (*European Environment Agency*, 2016).

La cantidad de emisiones contaminantes que generan los vehículos varía dependiendo de diferentes aspectos atribuibles a las características del vehículo (edad, tipo, velocidad, estado mecánico del vehículo, carga y tipo de combustible) así como a las condiciones en las que se encuentre la carretera (pendiente y estado superficial del pavimento) (Mendoza y Salazar, 2014). También son importantes los hábitos de manejo de los conductores al acelerar y frenar, sobre todo bajo condiciones de stress al estar sujetos a retrasos para cruzar por una caseta de cobro.

2.4.1 Tipos de emisiones contaminantes en el transporte

Existen diferentes tipos de emisiones contaminantes, las cuales son generadas de diferente manera en el ámbito del transporte. Las emisiones que se generan por el proceso de combustión y se emiten a través del escape son el Dióxido de Carbono (CO₂), Monóxido de Carbono (CO), Óxido de Nitrógeno (NO_x), Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) y Partículas Suspendidas (PM). Las emisiones que se producen por la evaporación del combustible, principalmente por temperatura ambiente, evaporación por conducción y temperatura del motor son de igual manera los Compuestos Orgánicos Volátiles e Hidrocarburos (HC). Así como las emisiones que se generan por el desgaste de neumáticos y la fricción con la superficie de la carretera son las Partículas Suspendidas (PM_{2.5} y PM₁₀) (Hickman, 1999; Klein *et al*, 2017).

2.4.2 El impacto de las emisiones

El daño que provocan las emisiones contaminantes es diverso: por una parte, las emisiones derivadas del proceso de combustión tienen un efecto dañino sobre el medio ambiente, el daño principal que se genera en este aspecto es el fenómeno de cambio climático, en el cual los gases de efecto invernadero son los precursores del calentamiento global, siendo algunos de estos el dióxido de carbono, metano, óxido de nitrógeno y ozono (Shaheen y Lipman, 2007). A su vez las partículas PM pueden alterar las propiedades del medio ambiente, haciendo que los lagos y ríos sean ácidos, así como afectar los nutrientes del suelo y contribuir a la lluvia ácida.

Otro tipo de daño que se presenta es el derivado de los denominados contaminantes criterio, los cuales afectan directamente la salud humana. Estos impactos son provocados por un cierto tipo de emisiones, principalmente las partículas suspendidas (PM) (Bret *et al*, 2016). Dichas emisiones están asociadas a enfermedades crónicas del sistema respiratorio y circulatorio, que se traducen en enfermedades mortales (*World Health Organization*, 2016). De igual manera tanto el monóxido de carbono como algunas VOC tienen impactos en la salud, principalmente por los efectos cancerígenos del benceno.

2.4.2 Modelos de emisiones contaminantes

Para la estimación de las emisiones contaminantes existen diversos tipos de modelos matemáticos incorporados a los programas de cómputo, cada uno de estos utiliza diferentes variables para su evaluación. Es por eso, que para la implementación de esos modelos en esta investigación fue necesario tener en cuenta las condiciones o escenarios a representar. Los modelos se basan principalmente en las condiciones del tráfico y en las características de los vehículos, algunos otros que son de particular interés adicionan las variables ambientales.

Los principales modelos que se emplean para la estimación de emisiones contaminantes son el MOBILE, MOVES e IVE. Los modelos que se basan en la micro-simulación del tráfico para estimar las emisiones son el VERSIT, Panis Y

Quartet, mientras que el *software* AIMSUN maneja estos dos últimos tipos de modelos ambientales. El primero se basa en la cantidad de emisiones que genera un vehículo de acuerdo a la velocidad a la que está transitando, en tanto que el segundo se basa en el tipo de vehículo, la velocidad, así como en el efecto de aceleración y desaceleración. El *software* AIMSUN captura segundo a segundo la velocidad y aceleración de cada vehículo que viaja por la red carretera, y toma en cuenta el estilo de conducción, la mecánica del vehículo y su interacción con el tráfico. En el caso de esta investigación se utilizó el segundo modelo ya que se adecúa mejor a las condiciones del escenario y está relacionado al modelo de Gipps porque existe un efecto constante de aceleración y desaceleración en la red, además fueron los valores que con más precisión se pudieron tomar en campo (Panis *et al*, 2006). El modelo descrito se presenta mediante la Ecuación 15.

$$En(t) = \max[E_0, f_1 + f_2v_n(t) + f_3v_n(t)^2 + f_4a_n(t) + f_5a_n(t)^2 + f_2v_n(t)a_n(t)]$$

Ecuación 15: Modelo de Panis para estimación de emisiones contaminantes.

Dónde:

$V_n(t)$ y $a_n(t)$ = son la velocidad y aceleración instantánea de un vehículo n en un tiempo t determinado por el modelo de Gipps

E_0 = Es el límite inferior de una emisión en (g/s) especificado por tipo de vehículo y tipo de emisión

F_1 a F_6 = son las constantes de emisión específica para cada vehículo y tipo de emisión, determinado por análisis de regresión

2.4.3 Externalidad provocada por emisiones contaminantes.

El costo provocado por las emisiones contaminantes es definido como el costo del transporte ligado a los efectos negativos que afectan al ambiente y a la salud humana, asociados a la eliminación de sus efectos (Bigazzi y Fligiozzi 2013; Wesseh y Lin 2016; Petro y Konecy, 2017).

Como ya se expresó anteriormente, el tráfico vehicular afecta directamente al medio ambiente por los efectos negativos que produce la

operación de los vehículos. La cantidad de emisiones que se presentan en las carreteras varía significativamente de acuerdo al tipo de vehículo (Tian, 2016; Tseng, 2017), las velocidades, aceleración y desaceleración (Bokare y Maurya, 2013; Hao, 2017; Donateo y Giovinazzi, 2017).

Para valorar el costo provocado por el impacto ambiental se puede estimar en forma posterior a la micro-simulación, la cual cuantificará las emisiones contaminantes que se producen en una red (Anya, 2013), y para la continuación se utiliza la metodología de Tseng *et al.* (2014) quienes en su investigación estiman el costo de las emisiones por unidad (US\$/ton), mediante la siguiente formula:

$$M = Ci \times Ei$$

Ecuación 16: Costo de externalidad

Dónde:

M= costo externo (US\$/ton)

Ci= costo externo por emisión por tipo de vehículo

Ei= Es el monto por emisión por tipo de vehículo

El costo particular por cada una de las emisiones contaminantes se calcula de acuerdo con los efectos negativos que tienen al medio, sin embargo, en México se carecen de esta información por lo que para cubrir este aspecto en la investigación se emplearán algunos valores disponibles en la literatura científica, como los propuestos por Berechman y Tseng (2012).

La implementación de los sistemas de cobro electrónico puede contribuir a reducir las emisiones contaminantes (Hernández, 2013); en base a esto es necesario proponer normas para normar la utilización de ETC y mejorar el flujo. En ese sentido, se calculará cuánto realmente debería de pagar el usuario por el peaje por tipo de vehículo, de acuerdo a los costos externos que se presenten (Bickel, 2006; Coria y Zhang, 2016; Guo *et al.*, 2017).

3. METODOLOGÍA

En este apartado se explica cómo se desarrollaron los distintos pasos para llegar al objetivo propuesto, desde los estudios de campo hasta los puntos principales que se usaron en el modelo microscópico y su respectivo análisis económico-ambiental.

La revisión de la literatura permite sostener que actualmente se carece de estudios especializados en México sobre los impactos económico-ambientales que producen las casetas de cobro en las carreteras federales. Así, con base en las investigaciones internacionales que se han interesado en el tema se ha construido una metodología que se adapta a las condiciones existentes de las vialidades en México, con el fin de identificar el comportamiento actual y proyectado de la red carretera con la implementación de sistemas más modernos de cobro electrónico.

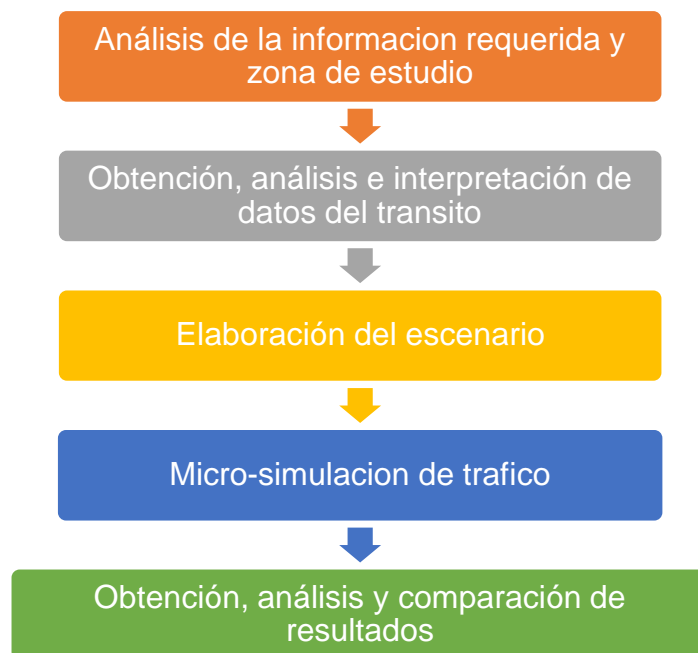


Figura 1: Esquema de metodología

Fuente: Elaboración propia

3.1 Análisis de la información requerida y zona de estudio

Los datos específicos de entrada que se requieren para un modelo de micro-simulación varían de acuerdo a la aplicación específica del modelo y al objetivo de estudio (Barceló 2010). En ese sentido, para esta investigación se considera como información de campo requerida: el aforo, las dimensiones de los vehículos, el tiempo de transacción, y las velocidades en el acceso a la plaza de cobro.

En esta investigación, las zona de estudio que se escogieron tomaron en cuenta las consideraciones de Tseng *et al.* (2014) ya que son necesarias unas áreas de alta demanda vehicular, por lo que se escogieron la caseta de cobro Querétaro – Celaya en la carretera Querétaro – Irapuato, así como las casetas Palmillas y Tepetzotlán de la autopista México – Querétaro.



Figura 2: Caseta de cobro Palmillas

Fuente: Elaboración propia

La información de entrada que se necesita para un modelo de micro-simulación de tráfico depende del *software* que se pretenda utilizar y para ello es necesario tener bien definido el problema a resolver, para identificar el modelo correcto con el cual trabajar (Barceló, 2010).

Teniendo esto en cuenta como se mencionó anteriormente el *software* conveniente a utilizar es el AIMSUN por los que los datos requeridos son los siguientes:

- Geometría y función de la red carretera
 - Forma de la vialidad

- Número de carriles
 - Carriles reservados
- Control de tráfico (casetas de cobro)
 - Tiempo y duración del plan de control
 - Duración del ciclo
- Datos de demanda
 - Volúmenes de entrada
 - Volúmenes de movimiento

Así como también son necesarios los parámetros específicos para un modelo microscópico como lo son la velocidad máxima y deseada, dimensiones de los vehículos, distancia de visibilidad, cambios de carril, además para fines de esta investigación fue necesario tomar en cuenta los costos por usuario, emisiones contaminantes y consumos de combustible para cada tipo de vehículo.

3.2 Obtención, análisis e interpretación de datos del tránsito

Con base en el marco teórico, los aforos se realizaron en las horas de máxima demanda (7:00 – 9:00 a.m). Para estos, se realizó el conteo de vehículos dividiendo las horas de aforo en segmentos de 15 minutos y clasificando los vehículos de acuerdo a la tipología establecida por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. De las dos horas aforadas se obtuvo la hora de máxima demanda (TRB, 2010) la cual sería la hora simulada y se generó la gráfica del comportamiento del aforo durante el transcurso de la hora.

Se tomaron en cuenta las dimensiones de los vehículos de acuerdo a los vehículos más representativos que transitan por cada vialidad seleccionada, con la finalidad de obtener un vehículo tipo según la clasificación de la SCT. Para esto fue necesario adoptar sus dimensiones (largo, ancho, alto y distancia entre ejes) y determinar por medio de estadística descriptiva la media, máximo y mínimo, por dimensión y tipo de vehículo.

En las casetas de cobro el control de tráfico depende de los tiempos de transacción, derivados de las transacciones de pago. Este parámetro se midió con un cronometro y se obtuvo una media. A su vez, se compararon los valores obtenidos en campo con los valores que publica el Instituto de Transporte de Taiwan (IOT, 2011).

La velocidad se midió por medio de radar de control de velocidad. Para esto fue necesario tomar medidas por cada uno de los tipos de vehículo y aplicar la estadística descriptiva para obtener la velocidad de operación media (Ecuación 2) (TRB, 2010), así como también las velocidades máximas y mínimas.

3.3 Elaboración del escenario

Para la elaboración del escenario de micro-simulación se consideraron los siguientes requerimientos:

1. Se construyó el grafo de la red. Para esto se realizó un levantamiento topográfico empleando el *software* Google Earth, mediante la colocación de puntos y su exportación al programa de cómputo AutoCAD, mediante la herramienta CivilCAD, para posteriormente implementarlo en AIMSUN.
2. Una vez teniendo la red vial para el estudio, se crearon los nodos para cada uno de los sentidos, con la finalidad de conectar los tramos de la caseta de cobro con los de desaceleración previos a la caseta, ya que cuentan con anchos y número de carriles diferentes.
3. Se configuraron en el programa AIMSUN los distintos tipos de vehículos (clasificación SCT) y se capturaron las características vehiculares tipo (ancho, largo, consumo de combustible, velocidades, aceleración y desaceleración) de acuerdo al análisis estadístico previo.
4. Se configuraron en el programa AIMSUN los dispositivos de control utilizando el tipo de control *Delay*, los cuales tienen la función de simular las casetas de cobro y el tiempo de transacción que estas generan. Dicho parámetro se ajustó al dato estadístico determinado en campo.

5. Se creó el plan de control maestro con la finalidad de organizar todos los dispositivos de control para tener un orden en la circulación y que no se generaran tiempos perdidos.
6. Se incorporaron los datos de demanda de tráfico obtenidos de la hora de máxima demanda en las matrices origen y destino de cada uno de los vehículos que se analizaron (Clasificación SCT).

3.4 Simulación microscópica

Una vez concluidos los escenarios incorporando todos los parámetros físicos y de operación de cada uno de los vehículos y de la red vial, se procedió a realizar la réplica de simulación con el fin de dar alta cada una de las características mencionadas. Con ello se pudo constatar de manera visual si existía algún evento anormal con respecto a la realidad que pudiera provocar cambios en el comportamiento de los vehículos y en su caso proceder a hacer las modificaciones correctivas necesarias, para posteriormente realizar tres réplicas de simulación por escenario con su respectiva media y generar los datos de salida.

3.5 Obtención, análisis y comparación de resultados

Una vez que fueron obtenidos los datos de salida de las corridas de simulación, se procedió a clasificar los datos de acuerdo a la variable correspondiente ya sea, consumos de combustible, tiempos, velocidades, entre otros, y se procedió a determinar su impacto económico y ambiental. Se comparan los escenarios reales contra los hipotéticos (ETC y FFT) y se determina la diferencia que se tiene entre cada tipo de sistema.

En este apartado se explicará el procedimiento de como se desarrollaron los pasos para llegar al objetivo propuesto, desde los estudios de campo hasta los

puntos principales que se usaron en el modelo microscópico y su respectivo análisis económico-ambiental.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se explicará el procedimiento de como se obtuvieron los resultados del estudio paso a paso de acuerdo a la metodología propuesta con la finalidad de llegar al objetivo principal del estudio.

4.1 Análisis de la información requerida y análisis zona de estudio.

4.1.1 Información requerida.

Se configuró el programa de cómputo a partir de la información necesaria indicada en la sección metodológica.

4.1.2 Análisis del área de estudio

Como se expuso en el punto 3, las vialidades objeto de estudio son la Autopista México - Querétaro y la Autopista Querétaro-Celaya, específicamente en las casetas de Querétaro-Celaya, Palmillas y Tepetzotlán. Se consideraron principalmente estas ya que son vialidades de gran afluencia vehicular, ya que pertenecen a una de las arterias principales del país. Por su parte la autopista México – Querétaro es considerada una de las rutas más utilizadas, además es uno de los tramos carreteros más estudiados del país por lo que se puede encontrar información de interés para la investigación.

Otro de los puntos principales por los que se eligieron estos puntos de análisis fue porque se debe recolectar una gran cantidad de información necesaria para la micro simulación de la cual solo se dispone de pocos registros. Por razones prácticas y presupuestales, también eran las más cercanas y con mayor interés para el estudio, se carecía recurso y de personal para ir a otros puntos más alejados del país.

4.1.3 Geometría y características específicas

Esta información se capturó para la creación de escenarios, la cual consta de: número de carriles, anchos y largos de carril, carriles específicos, los cuales fueron obtenidos mediante la herramienta *Google Earth*, ya que por la gran cantidad de vehículos que circulan por las áreas de estudio fue la opción que se tenía para obtener dichos datos, para posteriormente importarlos a AutoCAD y diseñar dichas vialidades en el *software* de AIMSUN.



Figura 3: Puntos de referencia del levantamiento topográfico en la caseta de cobro Palmillas

Fuente: Elaboración propia

Dichas características específicas se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Características específicas de las casetas

Especificaciones / Nombre de la vialidad	Caseta de cobro Querétaro-Celaya	Caseta de cobro Palmillas	Caseta de cobro Tepetzotlán
N° Carriles en la carretera ambos sentidos	4	6	8
N° Carriles en la caseta ambos sentidos	11	16	20
Ancho de carriles en la red	2.8	3	3

Ancho de carriles en la caseta	4.8	5	5
Numero de MTC	9	2	4
Numero de ETC	2	14	16
Numero de carril de emergencia	0	0	2

4.2 Obtención análisis e interpretación de los datos del tránsito

4.2.1 Aforos de las áreas de estudio

Se recabó la información vial generada por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes, la cual es publicada anualmente en su portal de internet en el apartado de Datos Viales (2018). Con ello se determinó la tasa de crecimiento anual para crear un escenario hipotético a futuro así como también para comparar los aforos realizados en campo y determinándose que estos fueron fiables. Dichos conteos vehiculares se obtuvieron con la interpretación de videos grabados en campo mediante una cámara Go Pro.

Como se planteó en el marco teórico, los horarios de aforo que se manejaron fueron en horas pico, de acuerdo con la investigación de Tseng (2014) y Abdelwahab (2016) quienes afirman que las horas pico que se presentan en autopistas son en un horario de 7:00 a.m. – 9:00 a.m. De de igual manera se realizaron aforos en días atípicos (vacacionales) con la finalidad de obtener algunos estudios específicos para ese tipo de días. La informacion se presenta en las Tablas 4 y 5.

Tabla 4: Datos viales 2018

México - Querétaro	TDPA	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	Otros
Caseta de cobro Palmillas	25240	58.1	5.4	4.7	6.4	18	1.8	4.8	0.8
Caseta de cobro Palmillas	25240	58.1	5.4	4.7	6.4	18	1.8	4.8	0.8

Fuente: Datos Viales SCT 2018

Tabla 5: Aforo caseta de cobro palmillas

Dirección México - Querétaro								
Tipo de Vehículo	HORARIO							
	07:00	07:15	07:30	07:45	08:00	08:15	08:30	08:45
	a	a	a	a	a	a	a	a
	07:15	07:30	07:45	08:00	08:15	08:30	08:45	09:00
A	302	271	280	284	299	315	271	302
B	19	12	14	21	16	20	14	12
C2	24	17	25	11	30	24	23	27
C3	20	15	24	4	24	17	19	27
T3S2	30	22	20	27	35	42	55	70
T3S3	10	1	5	17	3	5	4	10
T3S2R4	24	15	15	14	7	9	10	14
Dirección Querétaro - México								
A	292	255	302	320	234	262	364	442
B	30	18	20	14	20	23	26	36
C2	30	30	30	14	19	23	23	26
C3	18	26	20	20	25	27	40	32
T3S2	30	29	27	19	75	80	90	105
T3S3	12	14	16	7	7	5	8	15
T3S2R4	29	12	30	19	22	24	17	30
TOTAL	870	737	828	791	816	876	964	1148

Fuente: Elaboración propia

Por consideraciones de organización de la estructura de este documento de tesis, los aforos de los días típicos y atípicos de la caseta Querétaro-Celaya y Tepetzotlán se presentan en el Anexo 1.

4.2.1.1 Determinación de la hora de máxima demanda

Una vez que se aforó cada una de las casetas en estudio, se procedió a obtener la hora de máxima demanda, obteniéndose los siguientes resultados (Tablas 6 y 7).

Tabla 6: Cuarto horario de máxima demanda

Cuarto horario de máxima demanda	
7:00-7:15	870
7:15-7:30	737
7:30-7:45	828
7:45-8:00	791
8:00-8:15	816
8:15-8:30	876
8:30-8:45	964
8:45-9:00	1148

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7: Hora de máxima demanda

Hora de máxima demanda	
7:00-8:00	3,226
7:15-8:15	3,172
7:30-8:30	3,311
7:45-8:45	3,447
8:00-9:00	3,804

Fuente: Elaboración propia

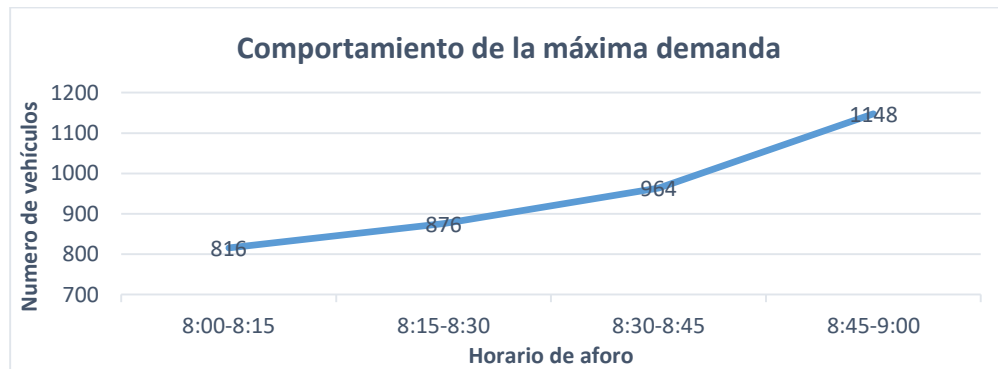


Figura 4: Comportamiento de la hora de máxima demanda (caseta de cobro Palmillas)

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Dimensiones por tipo de vehículo

Con el objetivo de simular el tránsito de una manera más cercana a la realidad, se tomaron en cuenta los tipos más significativos de vehículos que transitan por las vialidades bajo estudio, con la finalidad de obtener un vehículo tipo. Para esto fue necesario conocer sus dimensiones (largo, ancho, alto y distancia entre ejes), dichas características fueron tomadas de las paginas oficiales de los fabricantes de los automóviles, con la finalidad de utilizar la estadística descriptiva y obtener las medias, desviaciones estándar, fronteras de aceptación, entre otros datos que son necesarios para los modelos tipo en el *software* AIMSUN (Tabla 8).

Tabla 8: Dimensiones vehículos tipo C2

Tipo de vehículo	Dimensiones (m)			
	Largo	Ancho	Alto	Ejes
B2				
International 3000RE	11.7	2.58	3.2	4.953
International 4700 SCD	9.75	2.58	3.15	5.15
International traveler	10.63	2.6	3.4	4.953
Mercedez Benz Aliado	12.04	2.6	3.3	6.18
Mercedez Benz Viaggio 1050	12	2.6	3.375	-
Hyundai Universe	11.78	2.495	3.44	5.85
C2				
NPR Reward Euro IV	5.99	2.115	2.27	3.365
Chevrolet NHR Reward	4.73	1.77	2.185	2.475
Chevrolet NKR Reward	5.25	1.86	2.16	2.99
Chevrolet NQR Reward	6.64	2.04	2.265	3.815
International City Star 11millb	6.95	1.995	2.284	3.845
Hyundai HD65	6.17	2	2.25	3.415
Kenworth KW45 12 ton	7.29	2.28	2.28	3.9
VW Delivery 9.160	6.43	2.684	2.407	3.3
C3				
Mercedez Benz 2726 B/36	7.637	2.485	2.698	4.95
Chevrolet FVZ Forwar Euro IV	9.73	2.4	2.905	6.35
International Workstar	9.801	2	-	6.146
VW Constellation 31.280	7.506	2.507	3	3.44

Fuente: Elaboración propia

Y por medio de la herramienta MINITAB se obtuvieron las medias, desviaciones estándar y valores fronteras permitidas para cada uno de las propiedades de conjunto de modelos, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 5.

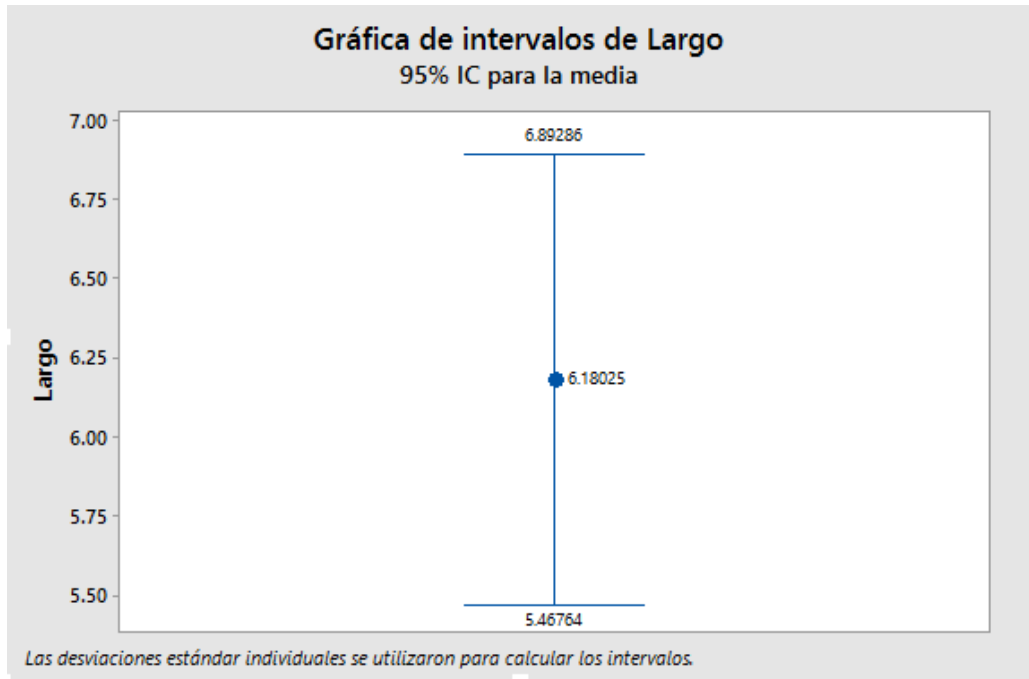


Figura 5: Gráfica de intervalos de largo

Fuente: Elaboración propia

Se puede destacar los cuartiles Q1, Q2 y Q3 con un 95% de certeza, donde para el caso de análisis se tomó el valor de la media recortada siendo este igual a 6.18 m.

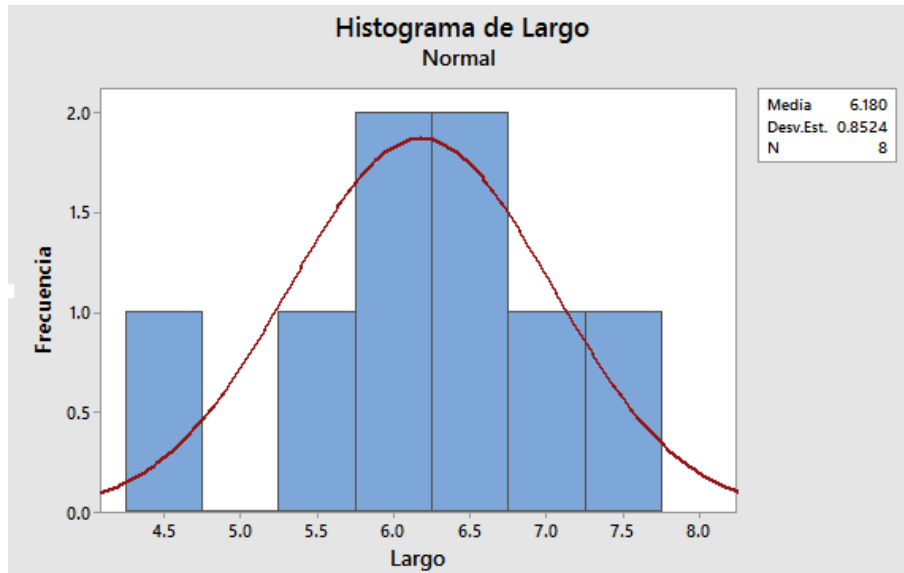


Figura 6: Histograma de largo

Fuente: Elaboración propia

Por su parte, se elaboraron los histogramas de frecuencia para comprobar los valores arrojados por el diagrama de caja, teniéndose de igual manera que la media recortada resulto de 6.18 m. Las dimensiones de los vehículos T3-S2, T3-S3 y T3-S2-R4 se tomaron de acuerdo con la norma oficial mexicana vigente Nom-012 (2017), de la SCT debido a que las fichas técnicas que se presentan en las páginas oficiales de las empresas son de los tracto camiones y no se mencionan características de los remolques. Las dimensiones de los vehículos ligeros y de carga se presentan en el Anexo 2.

4.2.3 Velocidades de operación.

La velocidad de operación es uno de los aspectos más importantes de la simulación debido a que es la velocidad de los vehículos previo a su llegada a la caseta de cobro. Estas velocidades fueron tomadas mediante un radar de velocidad Bushnell, y se tomó a una distancia de 2 km de la zona de peaje para que este valor no fuera afectado por el tráfico y la intención del usuario de

desacelerar al ver la caseta de cobro. Se tomaron hasta 50 velocidades por tipo de vehículo y al igual que las dimensiones se obtuvieron la velocidad media, mínima y máxima que se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9: Estadística de velocidad de operación de llegada en Palmillas

Velocidad de operación (km/h) en Palmillas							
Veh Tipo	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Media	114.59	101.30	100.15	98.90	101.28	103.13	92.89
Mínima	82.00	82.00	75.00	75.00	81.00	80.00	71.00
Máxima	140.00	125.00	130.00	124.00	124.00	125.00	113.00

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar claramente que los vehículos con mayor velocidad de operación son los tipo A y los de menor son los tipo T3-S2-R4, esto está relacionado principalmente con sus dimensiones y en la potencia del motor, cabe destacar que los vehículos con la media más alta son los tipo B, esto se puede atribuir principalmente a que son los tipos de vehículo que manejan comúnmente a una misma velocidad constante, las velocidades de operación se encuentran en el Anexo 3.

4.2.4 Aceleración y desaceleración.

Tanto la aceleración como la desaceleración son variables que maneja el modelo de Gipps. En base a esto se tomó dicho valor en campo mediante una pistola Bushnell y un cronómetro. Se tomaron 50 muestras representativas por cada uno de los tipos de vehículos para obtener sus datos estadísticos (Media, Mínima y Máxima) necesarios para la calibración del *software*. Estos valores estadísticos se pueden observar en las Tablas 10 y 11.

Tabla 10: Estadística de aceleración en Palmillas

Aceleración (m/s²) en Palmillas							
Veh Tipo	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4

Media	2.81	1.88	1.94	2.07	1.82	1.77	1.87
Mínima	2.01	1.22	1.18	1.15	1.02	1.03	0.92
Máxima	3.76	2.96	2.99	2.99	2.97	2.97	2.92

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11: Estadística de desaceleración en Palmillas

Desaceleración (m/s²) en Palmillas							
Veh Tipo	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Media	5.29	4.37	4.34	4.45	4.30	4.48	4.02
Mínima	4.06	3.25	3.14	3.17	3.00	2.92	2.55
Máxima	6.98	5.95	5.87	5.96	6.00	5.92	5.52

Fuente: Elaboración propia

Al igual que con la velocidad, los vehículos con mayores máximas y mínimas son el tipo A y los vehículos con menores son el tipo T3-S2-R4, esto se puede deber a las mismas condiciones que con la velocidad ya que la carga y la potencia del motor influyen en este aspecto, la aceleración y desaceleración de los vehículos en Querétaro-Celaya y Tepetzotlán se presentan en el Anexo 4.

4.2.5 Tiempos de transacción.

Como parte de la información requerida fue necesario obtener variables de control de tráfico. Para el caso de las casetas de cobro el control de tráfico se manejó por tiempos de espera, derivados de las transacciones de pago, para estimar un tiempo de transacción por tipo de sistema. Fue necesario recabar una muestra de 50 tiempos para cada uno de los tipos de vehículos. Posteriormente se obtuvieron la media, mínimo y máximo, los cuales son valores que necesita el *software* para su calibración, dichos valores se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12: Estadística de tiempo de transacción en Palmillas

Tiempo de transacción (en segundos) en Palmillas							
Veh Tipo	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Media	7.49	8.96	8.73	8.94	11.09	10.24	12.29

Mínima	5.00	7.25	7.14	7.14	7.50	7.55	9.14
Máxima	11.99	12.50	14.20	14.02	14.94	15.20	17.20

Fuente: Elaboración propia

Se elaboró una gráfica comparativa de los tiempos de transacción por tipo de sistema de cobro (Figura 7).

Tabla 13: Comparativa tiempos de transacción MTC y ETC (en segundos)

Veh tipo	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Tiempo MTC	7.5	9.0	8.7	8.9	11.1	10.2	12.3
Tiempo ETC	2.72	3.31	3.15	3.22	3.45	3.54	4.02

Fuente: Elaboración propia

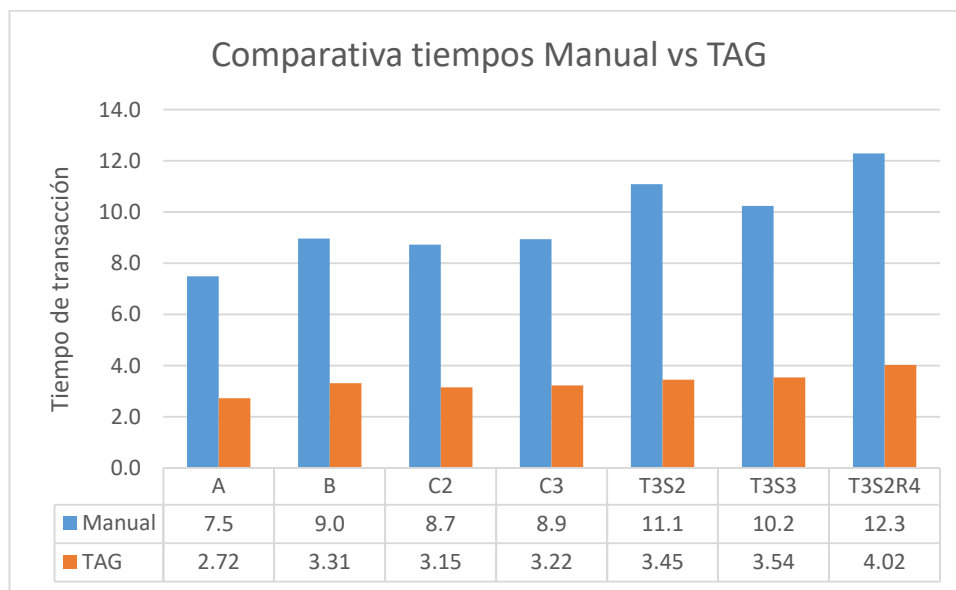


Figura 7: Gráfica comparativa tiempos de transacción

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar claramente que el vehículo con mayor tiempo de transacción es el T3S2R4. Esto se debe principalmente a que la dimensión del vehículo es mucho mayor con respecto a los demás y es necesario más tiempo para acelerar como tal y salir de la zona de cobro y permitir el ingreso del siguiente vehículo, de igual manera se realizó una comparativa conforme a IOT (2011) teniendo una diferencia relativa de 10 a 15% en los tiempos de transacción obtenidos, los

tiempos de transacción de Querétaro-Celaya y Tepetzotlán se encuentran en el Anexo 5.

4.2.6 Emisiones contaminantes

Uno de los dos puntos principales planteados en esta investigación consiste en determinar el impacto ambiental que generan los congestionamientos en las casetas de cobro. Como se había mencionado el modelo empleado para la microsimulación de emisiones contaminantes fue el de Panis (2006), el *software* AIMSUN implementa este modelo mediante las Normativas Europea de Emisiones Contaminantes (1970 – 2014), para los autos ligeros y autobuses las normas se definen en g/km y para camiones en g/kWh, esta información es procesada por la microsimulación a efecto de conocer las diferencias entre el escenario actual y el hipotético. En ese sentido, la Tabla 14 muestra las emisiones producidas por los vehículos ligeros, cabe destacar que por cuestiones de organización de la tesis, la tabla contiene solo los vehículos a ligeros a gasolina.

Tabla 14: Emisiones contaminantes vehículos ligeros

Tipo	Fecha	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM
Gasolina						
Euro I	Julio de 1992	2.72	-	0.97	-	-
Euro II	Enero de 1996	2.2	-	0.5	-	-
Euro III	Enero de 2000	2.30	0.20	-	0.15	-
Euro IV	Enero de 2005	1.0	0.10	-	0.08	-
Euro V	Septiembre de 2009	1.0	0.10	-	0.06	0.005

Fuente: Normativa europea sobre emisiones (2014)

Para los vehículos pesados y camiones, por cuestión de organización de la tesis se muestran los datos de las normas Euro IV y Euro V, los cuales se pueden observar en las Tablas 15 y 16, a su vez fue necesario reconocer bajo que norma estaban regulados los vehículos más representativos para efectos de la microsimulación.

Tabla 15: Emisiones contaminantes autobuses y camiones C (g/km)

Autobuses y camiones tipo C

Tipo	CO	HC	Nox	PM	Humo
Euro IV	1.5	0.46	3.5	0.02	0.5
Euro V	1.5	0.46	2	0.02	0.5

Fuente: Normativa europea sobre emisiones (2016)

Tabla 16: Emisiones contaminantes camiones pesados (g/kWh)

Camiones pesados					
Tipo	CO	HC	Nox	PM	Humo
Euro IV	1.5	3.5	0.46	0.02	0.5
Euro V	1.5	2	0.46	0.02	0.5

Fuente: Normativa europea sobre emisiones (2016)

La información completa en cuanto a vehículos ligeros de diésel y normativas restantes para autobuses y camiones se puede observar en el Anexo 6.

4.3 Elaboración del escenario

Una vez realizados los estudios base de recolección de información, así como su procesamiento en la obtención de su estadística descriptiva, se procedió a desarrollar la modelación microscópica, la cual se llevó a cabo mediante una serie de pasos significativos, cuyos resultados se describen en los siguientes puntos.

4.3.1 Elaboración del grafo de la red actual

En base al levantamiento de los puntos que se realizó mediante la herramienta Google Earth, se procedió a construir el grafo de la red, primeramente se exportaron dichos puntos al *software* AutoCAD mediante la herramienta de CivilCad (Figura 8).

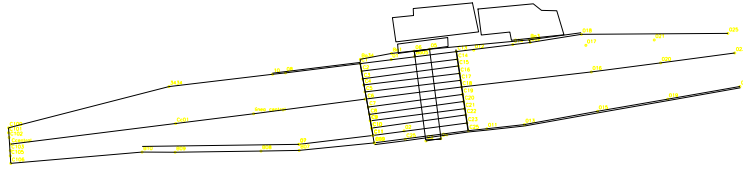


Figura 8: Elaboración de grafo en AutoCAD

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se exportó el archivo de CAD al *software* de simulación AIMSUN y se creó el escenario verificando que las dimensiones fueran las correctas.

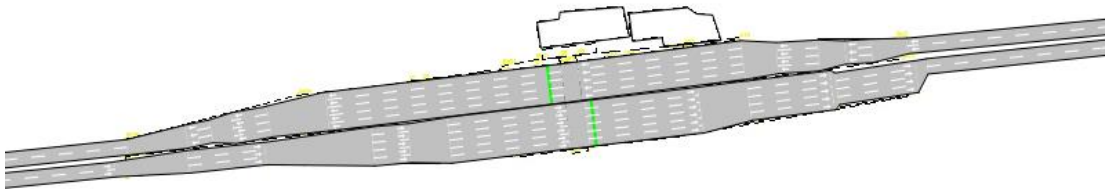


Figura 9: Elaboración de grafo mediante AIMSUN

Fuente: Elaboración propia

4.3.2 Creación de nodos

Una vez teniendo la red vial diseñada, se procedió a crear los nodos para cada uno de los sentidos de circulación, con la finalidad de conectar todos los tramos que se realizaron por sus diferencias de anchos y número de carriles, de acuerdo a cómo se encuentra en la red actual.

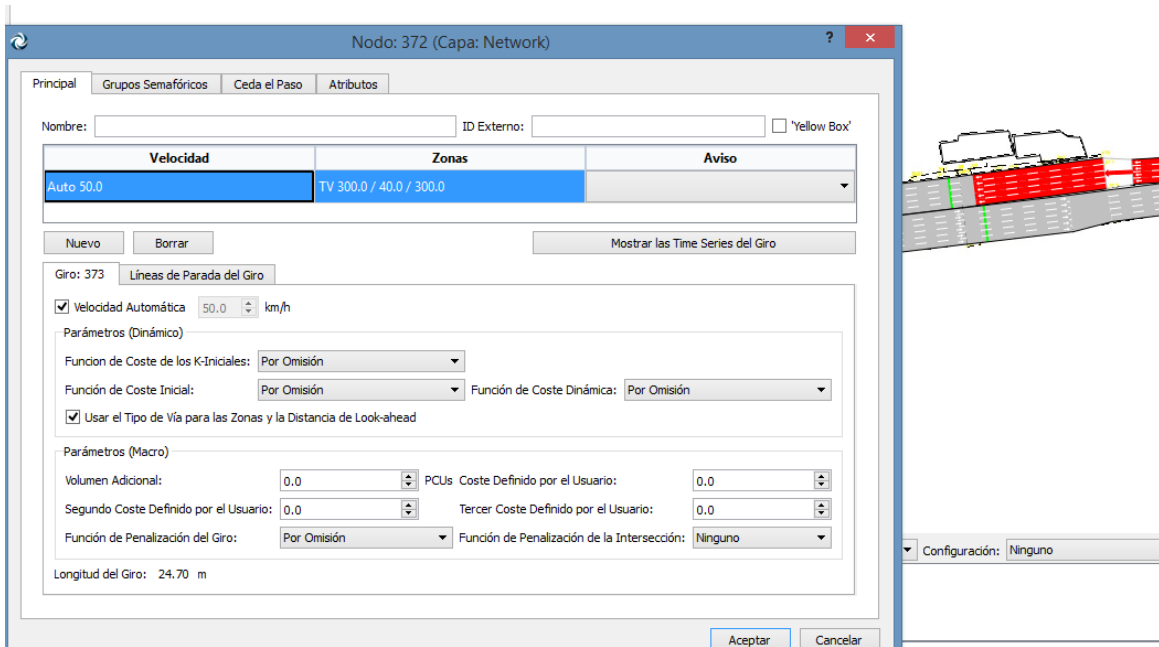


Figura 10: Creación de nodos

Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Incorporación de características vehiculares

Posteriormente se procedió a capturar la información de cada uno de los tipos de vehículos que se encuentran en la clasificación vehicular, mediante los parámetros estadísticos que se obtuvieron de la recopilación de la información. Parte de esto fue necesario para la calibración de los modelos en los que se basa el *software*.

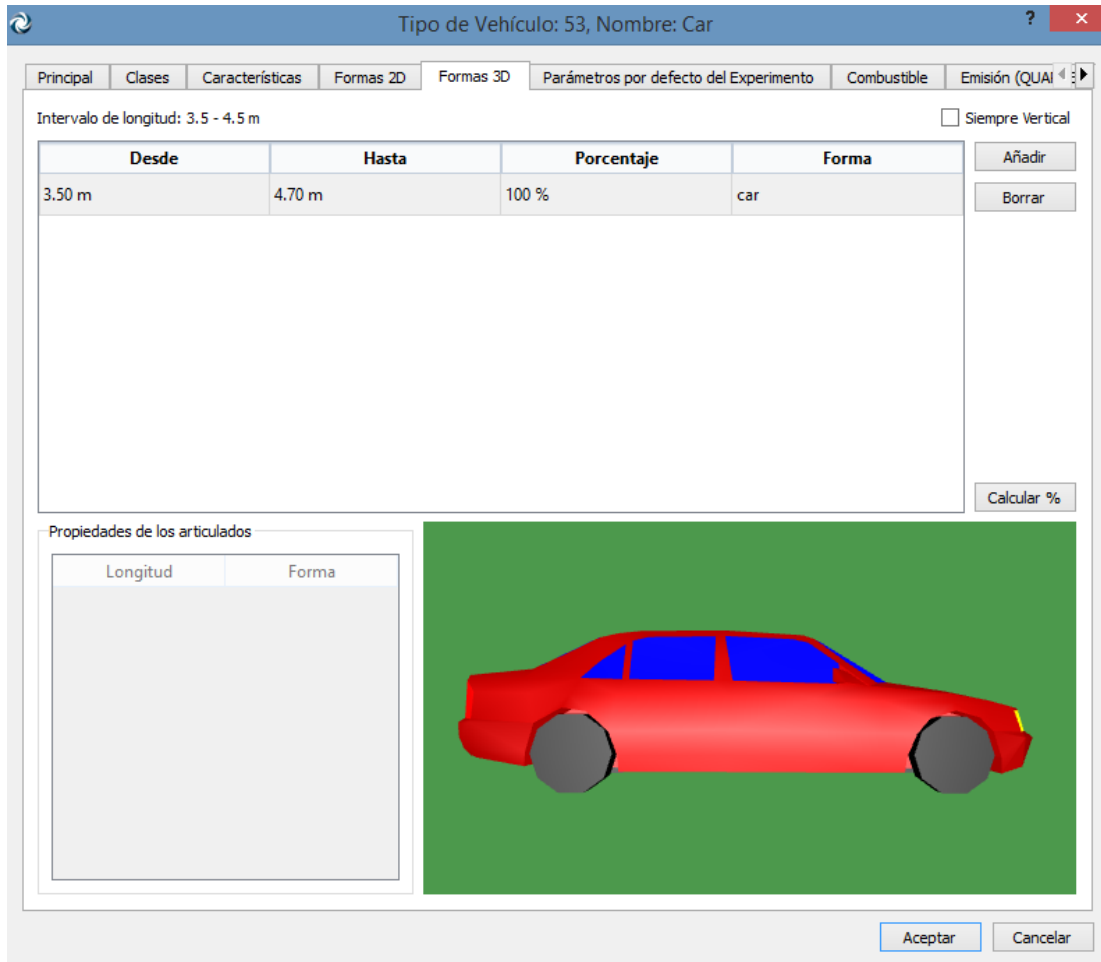


Figura 11: Incorporación de las características vehiculares

Fuente: Elaboración propia

4.3.4 Dispositivos de control de tráfico

La implementación de los dispositivos de control de tráfico fue de suma importancia en este sistema, para simular las casetas de cobro en la vialidad que provocan los tiempos perdidos. Con esto en mente, se incorporaron dichos dispositivos de control a las distancias correctas en el escenario.

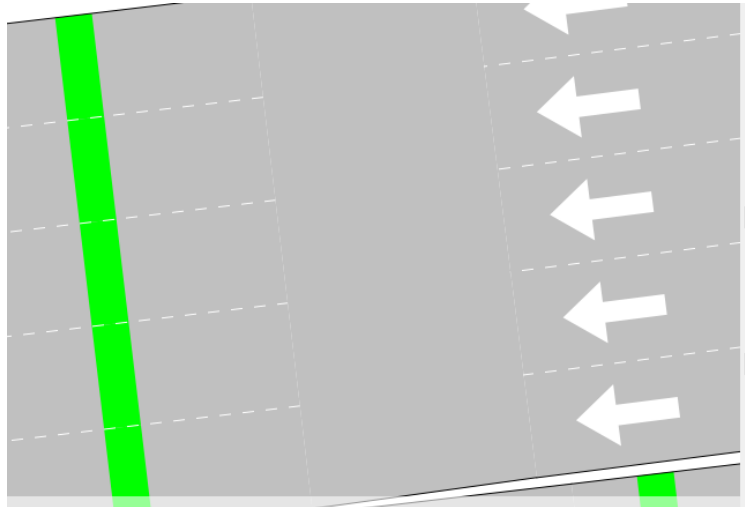


Figura 12: Incorporación dispositivos de control de tráfico

Fuente: Elaboración propia

Se utilizó el tipo de control “*Delay*”, ya que de acuerdo con el manual de AIMSUN se utiliza para modelar los peajes. Los resultados muestran que cada vehículo para en el punto de control durante un cierto ciclo de tiempo, ese tiempo fue analizada como una variable aleatoria distribuida con un tiempo de retardo medio y una desviación estándar, obtenidas de los tiempos de transacción.

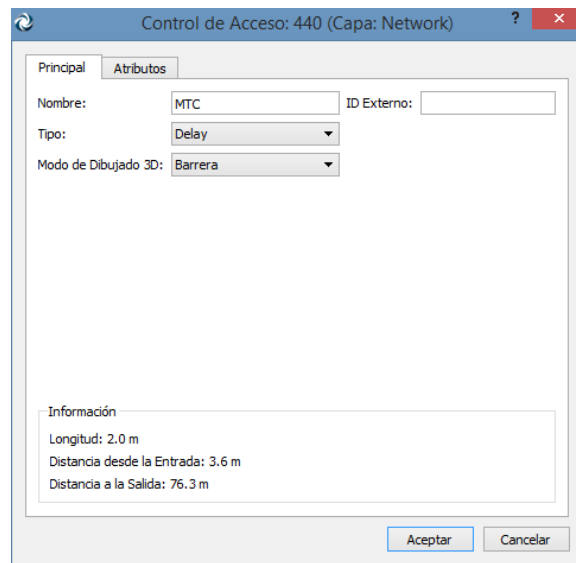


Figura 13: Incorporación tiempos de transacción

Fuente: Elaboración propia

4.3.5 Construcción del plan de control maestro

El plan de control maestro es uno de los pasos más importantes que se deben realizar en cualquier tipo de microsimulación en una red, esto para poder mantener un orden de la circulación y control de los vehículos y no se generen tiempos perdidos. Para esto fue necesario crear un plan de control especificando el nodo a controlar al igual que los controles de acceso.

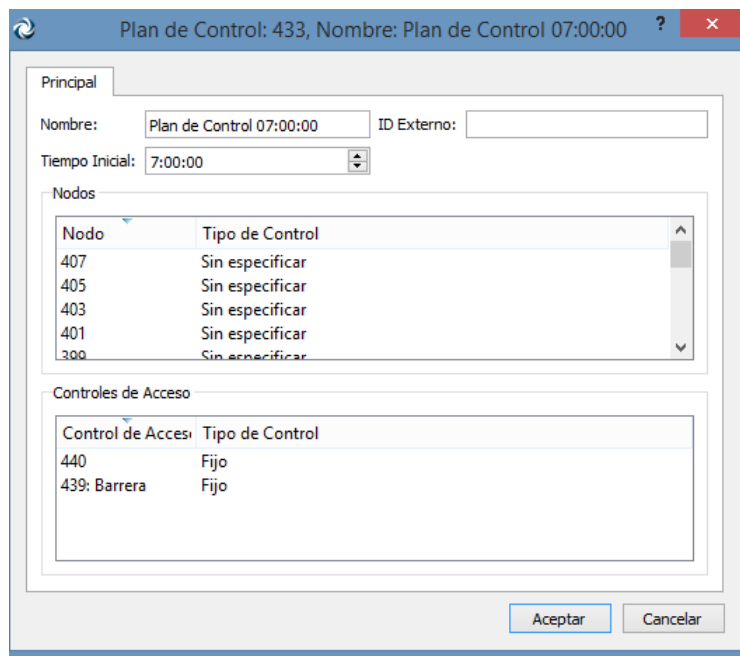


Figura 14: Creación del plan de control maestro

Fuente: Elaboración propia

4.3.6 Matriz origen y destino

Fue necesario tener un control de todos los tipos de vehículos que circulan por la red, conociendo los pares origen-destino de cada vehículo. De esa forma, se incorporó la matriz origen-destino de los vehículos que se analizaron (Clasificación SCT), para posteriormente crear la demanda de tráfico.

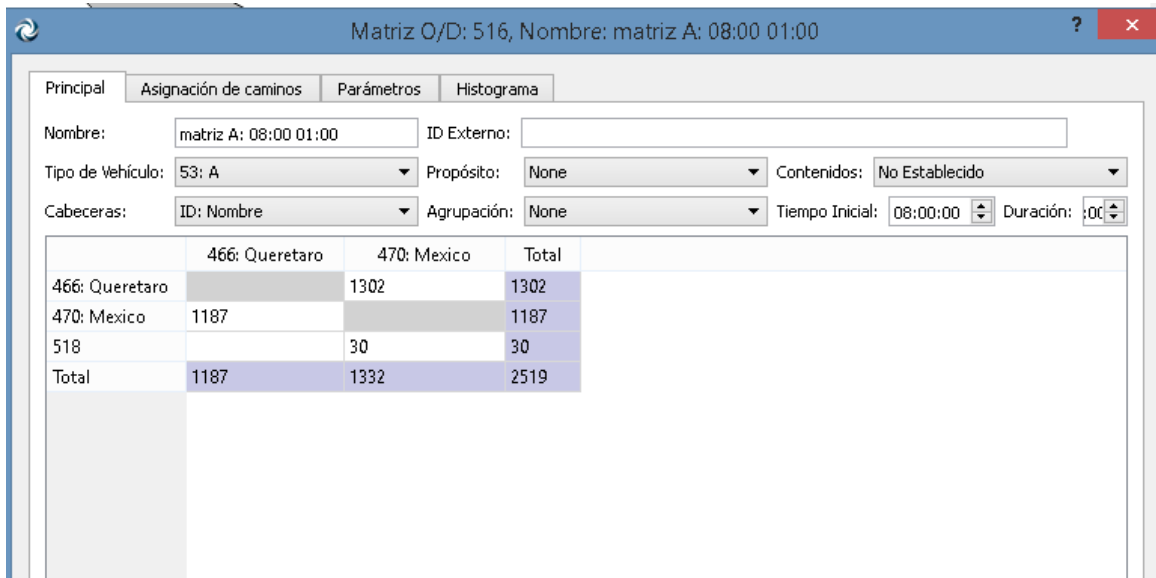


Figura 15: Incorporación de datos de tráfico en matriz O/D

4.4. Micro-simulación de tráfico

Una vez incorporados todos los parámetros físicos y de operación de cada uno de los vehículos y de la red vial, se procedió a realizar la réplica de simulación con el fin de dar alta cada una de las características mencionadas y determinar de manera visual si existe algún evento anormal dentro de la red; qué no ocurre en el escenario real y realizar en este momento varias réplicas de la simulación donde en cada una de ellas se cambiaran parámetros vehiculares de operación o características físicas de la red, con el fin de asimilar de manera visual que lo simulado se asemeje lo más posible a la situación real (Figura 16).

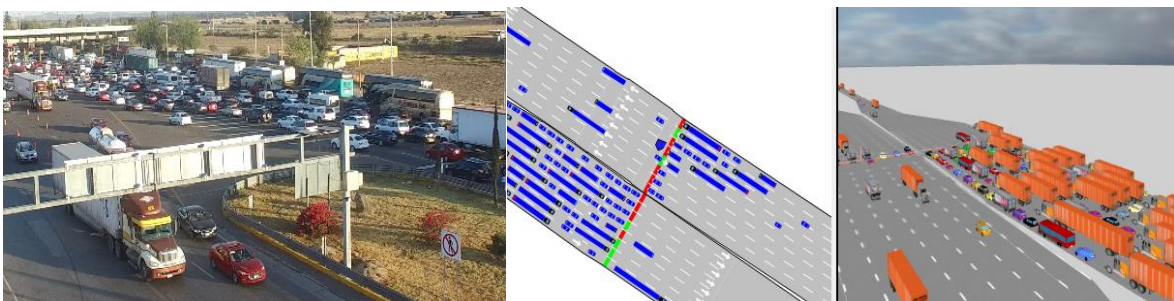


Figura 16: Realidad 2D vs 3D

Fuente: Elaboración propia

4.5. Obtención, análisis y comparación de resultados de las simulaciones

En este apartado se presentan los resultados de la comparación de parámetros de interacción vehicular de las tres casetas de cobro, así como su análisis de impacto económico-ambiental de los escenarios actual, hipotético (implementación de sistemas ETC), e hipotético 2 (implementación de sistemas FFT).

4.5.1 Parámetros de influencia vehicular

4.5.1.1 Tiempo total de viaje

El tiempo total de viaje expresa el período en que un usuario tarda en cruzar la vía de estudio a la hora de máxima demanda (HMD), no centrándose en un solo vehículo sino al conjunto de ellos, tal como los muestra la Tabla 17. Es necesario considerar que los vehículos ligeros y los autobuses transportan una cierta cantidad de usuarios. De acuerdo con Gutiérrez y Soria (2014) para la caseta de cobro en Palmillas el promedio de ocupantes por vehículo es de 1.4, mientras para los vehículos tipo B es de 22. A partir de los valores generados en la micro-simulación el tiempo total de viaje de los tipo A y B se multiplica por los valores mencionados. En la Tabla 17 se puede apreciar la comparativa de cada uno de los tipos de vehículos que transitan por las casetas así como el tipo de sistema en un escenario simulado en la caseta de Palmillas. Los resultados de tiempo de viaje de la autopista Querétaro - Celaya y Tepetzotlán se presentaran en el Anexo 7.

Tabla 17: Tiempo total de viaje por sistema en palmillas (l/h)

Tiempo total de viaje Palmillas			
Sistema	MTC	ETC	FFT
A	267.85	98.35	41.45
B	382.81	171.00	49.70
C2	47.25	14.66	8.86

C3	4.79	2.25	0.87
T3S2	10.78	4.57	2.06
T3S3	14.14	7.52	2.63
T3S2R4	16.15	7.25	2.77
Total	743.77	305.60	108.35

Fuente: Elaboración propia

Se generó su gráfica comparativa correspondiente para observar el comportamiento de la variable de acuerdo al tipo de vehículo y el tipo de sistema, basados en las consideraciones de Levinson y Chang (2003) y Aysin *et al.* (2009) que asumen que cada vehículo que pasa en una plaza de cobro experimenta retrasos dependiendo del tipo de sistema de cobro; que las colas son generadas porque los vehículos tienen que desacelerar y ocupar un tiempo de transacción para realizar el pago. En las tablas y gráficas de resultados obtenidos se puede constatar esto ya que el sistema de cobro manual genera los efectos mencionados y los tiempos perdidos por vehículos se van acumulando, generando una gran cantidad de tiempo perdido en con respecto a las modalidades ETC y FFT.

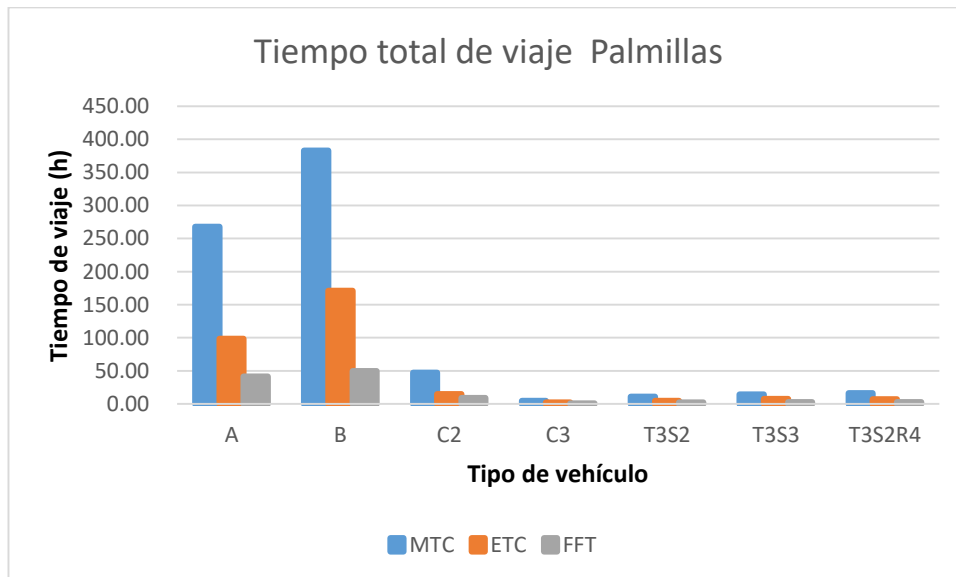


Figura 17: Gráfica tiempo total de viaje (h) por tipo de vehículo en Palmillas

Fuente: Elaboración propia

4.5.1.2 Consumo de combustible

Al igual que el parámetro anterior, aquí el gasto de combustible se expresa por tipo de vehículo en toda la red, así como por el tipo de sistema de cobro en la caseta Palmillas (Tabla 18). El consumo de combustible de los escenarios Querétaro-Celaya y Tepetzotlán se presentan en el Anexo 8.

Tabla 18: Consumo de combustible por sistema en palmillas (l/h)

Consumo de combustible Palmillas			
Sistema	MTC	ETC	FFT
A	572.44	450.25	150.30
B	130.89	65.40	42.65
C2	179.30	57.50	34.73
C3	183.26	50.57	41.22
T3S2	422.16	174.46	79.88
T3S3	57.41	19.22	11.93
T3S2R4	117.00	48.67	47.92
Total	1,662.46	866.07	408.63

Fuente: Elaboración propia

El congestionamiento es uno de los factores que más afecta el consumo de combustible de las plazas de cobro, debido al constante cambio de velocidades y el efecto de aceleración y desaceleración (Whang y Rhaka, 2016; Lopez *et al*, 2017), por lo que al estar mayor tiempo en cola será mayor el gasto de carburante (Dindarloo, 2016). Lo anterior queda demostrado con los resultados, ya que muestran que la diferencia en el consumo de combustible de todos los vehículos es del 37% respecto al sistemas de cobro electrónico y de un 70% respecto al sistema Free Flow.

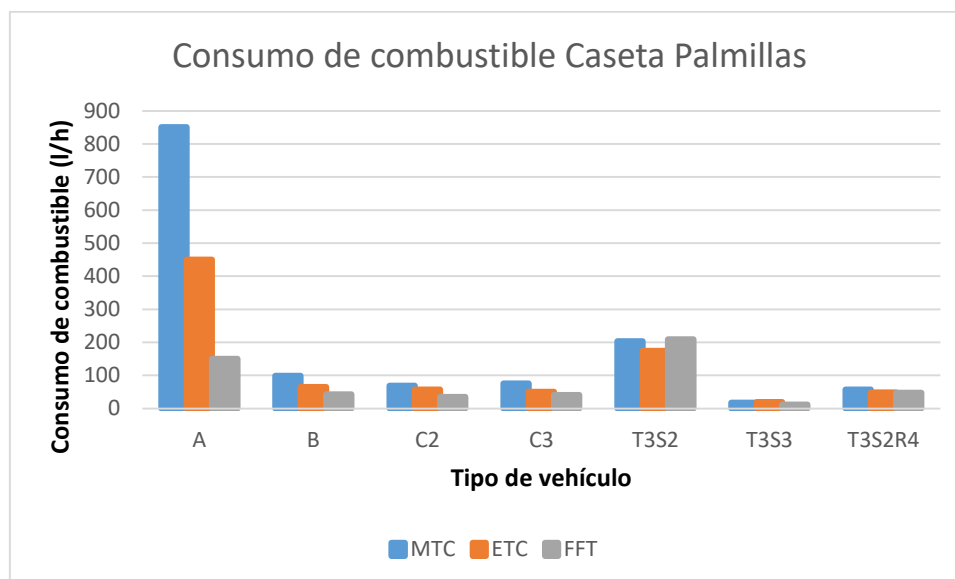


Figura 18: Gráfica de consumo de combustible (l/hr) por sistema de cobro

Fuente: Elaboración propia

4.5.1.3 Emisiones contaminantes

En este apartado se muestran las emisiones contaminantes generadas por el parque vehicular entre las que destacan las emisiones de CO₂ (Dióxido de carbono), NO_x (óxidos de nitrógeno), Pm (partículas suspendidas) y VOC (compuestos orgánicos volátiles) y que se presentan en la Tabla 19, el resto de resultados de emisiones contaminantes se muestra en el Anexo 9.

Tabla 19: Dióxido de carbono por sistema en Palmillas

CO ₂ Palmillas			
Sistema	MTC	ETC	FFT
A	1,117,987.48	799,474.99	478,344.78
B	260,301.57	165,774.97	78,002.99
C2	605,703.32	364,029.92	182,697.24
C3	610,429.16	467,704.07	182,428.62
T3S2	1,269,445.56	884,292.89	462,236.70
T3S3	132,209.23	110,970.84	42,829.72
T3S2R4	287,123.97	221,097.12	114,401.70
Total	4,283,200.29	3,013,344.80	1,540,941.75

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20: Dióxido de nitrógeno por sistema en palmillas (g/h)

NOx Palmillas			
Sistema	MTC	ETC	FFT
A	1,296.11	968.06	675.91
B	2,684.34	1,336.47	867.26
C2	4,643.04	2,393.88	1,734.63
C3	4,769.10	3,079.27	1,797.60
T3S2	11,452.89	6,715.50	4,853.04
T3S3	1,175.75	841.39	475.81
T3S2R4	2,638.38	1,702.27	1,106.18
Total	28,659.61	17,036.84	11,510.43

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21: Partículas suspendidas por sistema en palmillas

PM Palmillas			
Sistema	MTC	ETC	FFT
A	290.50	104.05	31.83
B	289.50	32.20	9.74
C2	320.50	54.63	16.56
C3	302.50	71.67	17.66
T3S2	389.25	102.89	25.04
T3S3	350.25	12.76	1.48
T3S2R4	325.22	24.20	6.03
Total	2,267.72	402.40	108.34

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22: VOC por sistema en palmillas

VOC Palmillas			
Sistema	MTC	ETC	FFT
A	2,755.97	597.84	425.16
B	1,204.50	405.50	58.76
C2	1,119.50	250.60	42.53
C3	1,230.60	180.70	42.06
T3S2	3,394.60	350.35	151.83
T3S3	348.90	220.40	14.84
T3S2R4	790.79	170.20	37.01
Total	10,844.86	2,175.59	772.19

Fuente: Elaboración propia

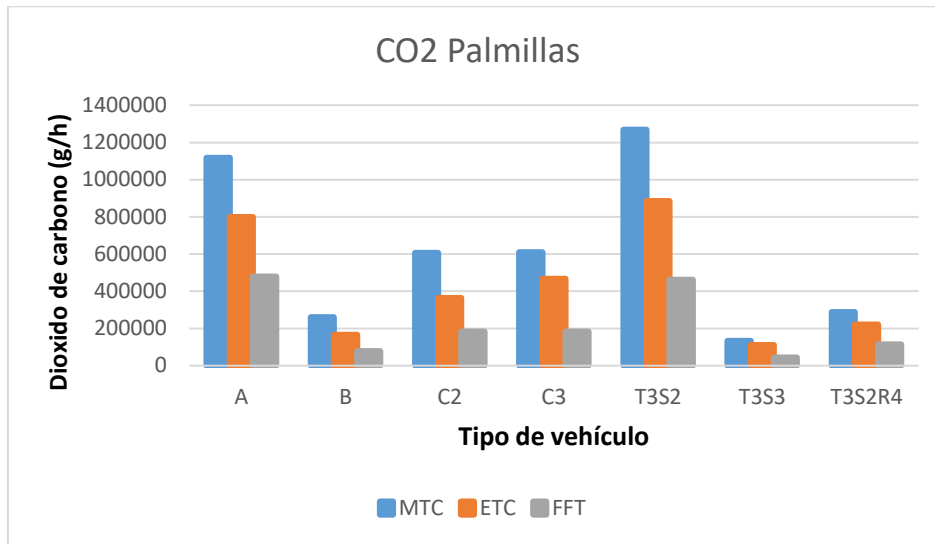


Figura 19: Gráfica de CO2 (g) por sistema de cobro (unidades

Fuente: Elaboración propia

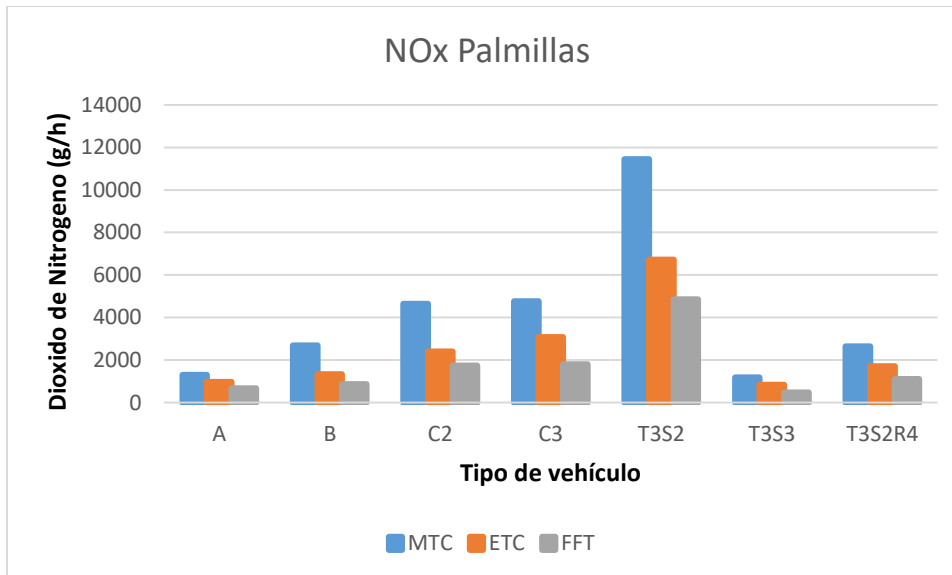


Figura 20: Gráfica de NOx (g) por sistema de cobro (unidades

Fuente: Elaboración propia

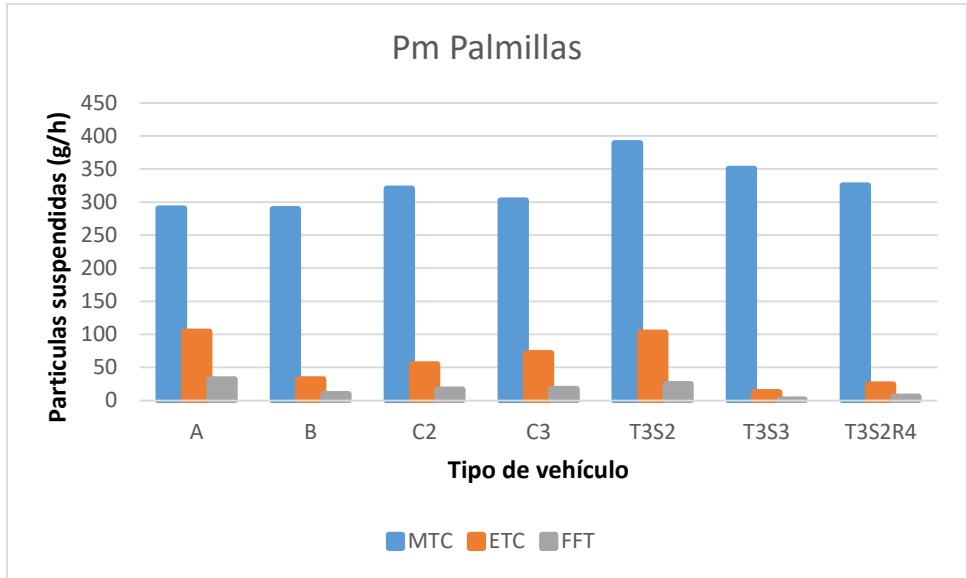


Figura 21: Gráfica de Pm (g/h) por sistema de cobro

Fuente: Elaboración propia

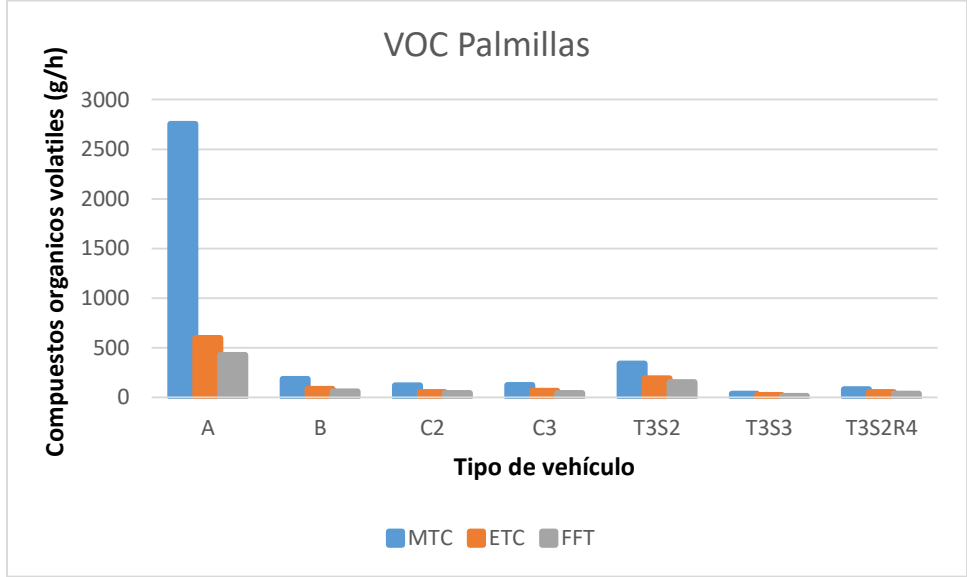


Figura 22: Gráfica de VOC(g/h) por sistema de cobro

Fuente: Elaboración propia

Las gráficas muestran que los vehículos pesados efectivamente generan más emisiones contaminantes en proporción con los vehículos ligeros, esto es un factor debería ser un factor a considerarse a la hora del cobro de peajes actual, por su parte la diferencia promedio que existe entre las emisiones generadas por el sistema de cobro manual respecto al electrónico es de un 30 al 60% menor y

mediante los sistemas FFT las emisiones contaminantes se reducirían entre un 80 y 130%.

4.5.2 Impacto económico

4.5.2.1 Costo valor del tiempo

Torres (2018) estima que el valor del tiempo de los ocupantes de los vehículos que circulan por la red carretera es de \$ 50.25 pesos por hora para viajes motivo de trabajo y \$ 30.25 pesos para viajes por motivo de ocio para los años 2017-2018. Tomando en cuenta que los aforos se realizaron dentro de las fechas mencionadas, para la hora de este caso de estudio (8:00 – 9:00 a.m.), se considera que los viajes realizados son por motivos de trabajo ya que el período de aforo se realizó en un día entre semana, por lo que los viajes se consideran de movilidad obligada (Torres y Díaz 2004). En ese sentido la Tabla 23 muestra el ahorro monetario de los ocupantes que circulan por la caseta de cobro Palmillas, en la cual se demuestra que hay una diferencia significativa entre los sistemas, la cual se genera a partir del tiempo que están perdiendo los usuarios en pagar el peaje, el costo de valor del tiempo de Querétaro-Celaya y Tepetzotlán se encuentra en el Anexo 10.

Tabla 23: Costo del tiempo total de viaje por sistema en palmillas

Valor del tiempo total de viaje Palmillas					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
A	\$ 13,459.36	\$ 4,942.09	\$ 2,083.06	\$ 8,517.27	\$ 11,376.30
B	\$ 19,236.30	\$ 8,592.75	\$ 2,497.63	\$ 10,643.55	\$ 16,738.68
C2	\$ 2,374.31	\$ 736.67	\$ 445.22	\$ 1,637.65	\$ 1,929.10
C3	\$ 240.70	\$ 113.06	\$ 43.72	\$ 127.64	\$ 196.98
T3S2	\$ 541.70	\$ 229.64	\$ 103.52	\$ 312.05	\$ 438.18
T3S3	\$ 710.54	\$ 377.88	\$ 132.16	\$ 332.66	\$ 578.38
T3S2R4	\$ 811.54	\$ 364.31	\$ 139.19	\$ 447.23	\$ 672.35
Total	\$ 37,374.44	\$ 15,356.40	\$ 5,444.49	\$ 22,018.04	\$ 31,929.96

Fuente: Elaboración propia

El valor del tiempo que se presenta entre los sistemas se traduce en los costos al usuario más significativos, esto debido a que los tiempos de transacción generan las colas y en base a eso se van acumulando hasta llegar a tiempos reportados de 30-40 minutos en el caso del tránsito que se sitúa hasta el final y lo que tardan en pasar por la plaza de cobro.

4.5.2.2 Costo de consumo de combustible

De igual manera que el cálculo de ahorro monetario derivado del valor del tiempo de viaje de los ocupantes de vehículos en la red, la Tabla 24 muestra el ahorro monetario con base al consumo de combustible a la fecha del aforo realizado. Es necesario considerar que el combustible varía por tipo de vehículo: en cuestión de los ligeros del tipo A se tomó en cuenta al valor de la gasolina mexicana de marca Premium/Magna \$17.32/litro a fecha del día de aforo y en los vehículos pesados se tomó el valor del Diésel \$17.50/litro, el costo del consumo de combustible generado en la caseta de cobro Querétaro-Celaya y Tepetzotlán se encuentra en el Anexo 11.

Tabla 24: Costo del consumo de combustible por sistema en Palmillas

Consumo de combustible Palmillas					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
A	\$ 9,914.66	\$ 7,915.40	\$ 2,642.27	\$ 1,999.27	\$ 7,272.39
B	\$ 2,301.05	\$ 1,149.73	\$ 749.79	\$ 1,151.31	\$ 1,551.26
C2	\$ 3,152.09	\$ 1,010.85	\$ 610.55	\$ 2,141.24	\$ 2,541.54
C3	\$ 3,221.71	\$ 889.02	\$ 724.65	\$ 2,332.69	\$ 2,497.06
T3S2	\$ 7,421.57	\$ 3,067.01	\$ 1,404.29	\$ 4,354.57	\$ 6,017.28
T3S3	\$ 1,009.27	\$ 337.89	\$ 209.73	\$ 671.38	\$ 799.54
T3S2R4	\$ 2,056.86	\$ 855.62	\$ 842.43	\$ 1,201.24	\$ 1,214.43
Total	\$ 29,077.21	\$ 15,225.51	\$ 7,183.72	\$ 13,851.70	\$ 21,893.50

Fuente: Elaboración propia

En el caso del consumo de combustible las diferencias en porcentajes son equivalentes a las que se muestran en los parámetros de influencia vehicular. Es necesario destacar que este costo de operación es uno de los más significativos

en términos económicos, ya que los vehículos pesados consumen una gran cantidad de combustible en relación a la cantidad de estos comparado con los vehículos ligeros.

4.5.2.3 Costo de emisiones contaminantes

Al no existir en México datos sobre costos al medio ambiente producidos por el sector autotransporte, se toma como referencia lo realizado en la Unión Europea. De acuerdo con la Comisión Europea (2014) el costo externo generado por las emisiones contaminantes se genera a partir de costos asociados a la salud y al medio ambiente. En el caso de las casetas de cobro, el valor de las emisiones contaminantes se tomó en cuenta con relación al impacto al medio ambiente, siendo así los resultados presentados en la Tabla 25.

Tabla 25: Costo de referencia por emisiones contaminantes, en €uros/Ton.

AGENTE CONTAMINANTE	CO	HC	Nox	CO2	PM10	PM2.5	SO2	HC
VALOR DE REFERENCIA	3	4.27	12,661.6	26	375,888	554,229	13,960	4.27

De acuerdo con el Manual de Costos Externos del Transporte (2014) los valores anteriores se expresan en Euros, ya que los estudios en los que se basa fueron realizados en Europa. Partiendo de esto, las emisiones generadas en las simulaciones se multiplican por el valor de la emisión y se cambia el valor a Pesos Mexicanos obteniéndose los resultados que se muestran en la Tabla 26 - 29, el costo de las emisiones contaminantes en Querétaro-Celaya y Tepetzotlán se encuentran en el Anexo 12.

Tabla 26: Costo por CO2 en Palmillas

Palmillas (CO2)					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
A	\$ 552.29	\$ 394.94	\$ 236.30	\$ 157.35	\$ 315.98
B	\$ 128.59	\$ 81.89	\$ 38.53	\$ 46.70	\$ 90.06
C2	\$ 299.22	\$ 179.83	\$ 90.25	\$ 119.39	\$ 208.97
C3	\$ 301.55	\$ 231.05	\$ 90.12	\$ 70.51	\$ 211.43
T3S2	\$ 627.11	\$ 436.84	\$ 228.34	\$ 190.27	\$ 398.76

T3S3	\$ 65.31	\$ 54.82	\$ 21.16	\$ 10.49	\$ 44.15
T3S2R4	\$ 141.84	\$ 109.22	\$ 56.51	\$ 32.62	\$ 85.32
Total	\$ 2,115.90	\$ 1,488.59	\$ 761.23	\$ 627.31	\$ 1,354.68

Fuente: Elaboración propia

Tabla 27: Costo por NOx en Palmillas

Palmillas (NOx)					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
A	\$ 311.81	\$ 232.89	\$ 162.60	\$ 78.92	\$ 149.20
B	\$ 645.77	\$ 321.52	\$ 208.64	\$ 324.26	\$ 437.14
C2	\$ 1,116.98	\$ 575.90	\$ 417.30	\$ 541.08	\$ 699.68
C3	\$ 1,147.30	\$ 740.78	\$ 432.45	\$ 406.52	\$ 714.85
T3S2	\$ 2,755.23	\$ 1,615.55	\$ 1,167.50	\$ 1,139.68	\$ 1,587.73
T3S3	\$ 282.85	\$ 202.41	\$ 114.47	\$ 80.44	\$ 168.38
T3S2R4	\$ 634.72	\$ 409.52	\$ 266.11	\$ 225.20	\$ 368.60
Total	\$ 6,894.65	\$ 4,098.56	\$ 2,769.07	\$ 2,796.09	\$ 4,125.59

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28: Costo por Pm en Palmillas

Palmillas (Pm)					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
A	\$ 3,059.07	\$ 1,095.68	\$ 335.18	\$ 1,963.38	\$ 2,723.89
B	\$ 3,048.54	\$ 339.08	\$ 102.57	\$ 2,709.46	\$ 2,945.97
C2	\$ 3,374.98	\$ 575.27	\$ 174.38	\$ 2,799.70	\$ 3,200.59
C3	\$ 3,185.43	\$ 754.71	\$ 185.97	\$ 2,430.72	\$ 2,999.47
T3S2	\$ 4,098.94	\$ 1,083.47	\$ 263.68	\$ 3,015.47	\$ 3,835.26
T3S3	\$ 3,688.26	\$ 134.37	\$ 15.58	\$ 3,553.89	\$ 3,672.67
T3S2R4	\$ 3,424.68	\$ 254.83	\$ 63.50	\$ 3,169.85	\$ 3,361.18
Total	\$ 23,879.89	\$ 4,237.41	\$ 1,140.86	\$ 19,642.47	\$ 22,739.03

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29: Costo por VOC en Palmillas

Palmillas (VOC)					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
A	\$ 72.79	\$ 15.79	\$ 11.23	\$ 57.00	\$ 61.56
B	\$ 31.81	\$ 10.71	\$ 1.55	\$ 21.10	\$ 30.26
C2	\$ 29.57	\$ 6.62	\$ 1.12	\$ 22.95	\$ 28.44
C3	\$ 32.50	\$ 4.77	\$ 1.11	\$ 27.73	\$ 31.39
T3S2	\$ 89.65	\$ 9.25	\$ 4.01	\$ 80.40	\$ 85.64

T3S3	\$ 9.21	\$ 5.82	\$ 0.39	\$ 3.39	\$ 8.82
T3S2R4	\$ 20.88	\$ 4.49	\$ 0.98	\$ 16.39	\$ 19.91
Total	\$ 286.41	\$ 57.46	\$ 20.39	\$ 228.96	\$ 266.02

Fuente: Elaboración propia

4.5.2.4 Impacto económico MTC vs ETC vs FFT

Una vez que se cuantificaron todos los parámetros en términos monetarios, se procedió a realizar la cuantificación final por cada una de las variables, esto para determinar en sí el costo total que se genera en cada plaza de cobro comparándolo con los otros tipos de sistemas y determinar por usuario cuanto es lo que se podría ahorrar utilizando los ITS. Se dividen los costos de acuerdo a De Rus (2006) en directos y externos, lo cual se puede observar en las Tablas 30 y 31.

Tabla 30: Costo de operación por congestionamiento, en caseta Palmillas

Costo	Sistema		
	MTC	ETC	FFT
Consumo de combustible	\$ 29,077.21	\$ 15,225.51	\$ 7,183.72
Tiempo total de viaje	\$ 37,374.44	\$ 15,356.40	\$ 5,444.49
Total	\$ 66,451.65	\$ 30,581.91	\$ 12,628.20

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31: Costo externos por congestionamiento, en caseta Palmillas

Costo	Sistema		
	MTC	ETC	FFT
CO2	\$ 2,115.90	\$ 1,488.59	\$ 761.23
Nox	\$ 6,894.65	\$ 4,098.56	\$ 2,769.07
PM	\$ 23,879.89	\$ 4,237.41	\$ 1,140.86
VOC	\$ 286.41	\$ 57.46	\$ 20.39
Total	\$ 33,176.86	\$ 9,882.02	\$ 4,691.55

Fuente: Elaboración propia

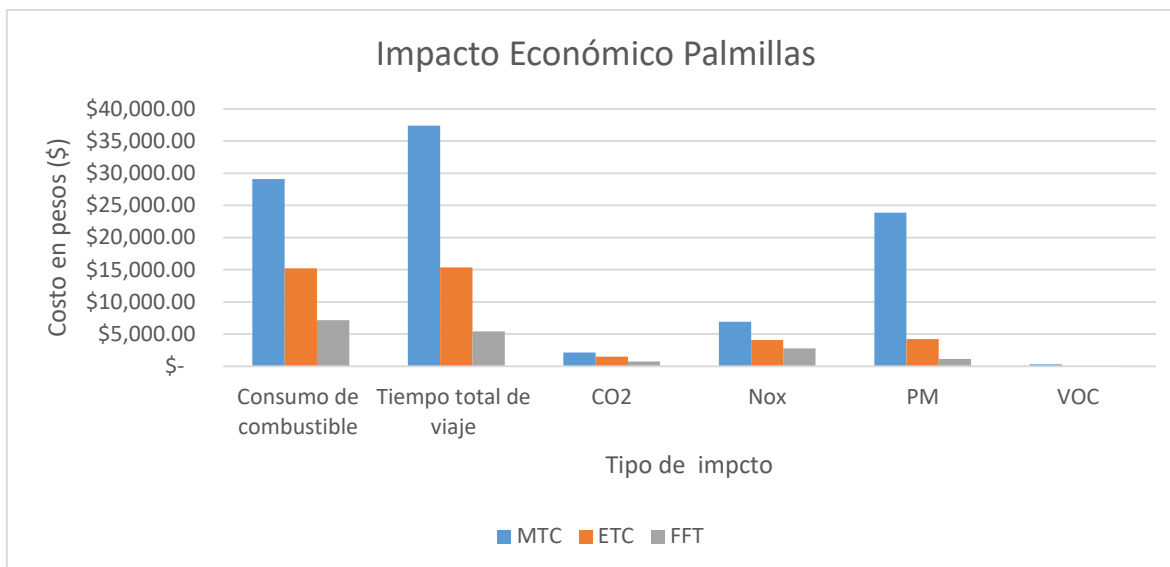


Figura 23: Gráfica costos totales (\$) por congestionamiento, en caseta de Palmillas

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran efectivamente que el sistema de cobro manual genera un impacto económico del 50% mayor respecto al sistema ETC y de un 80% respecto al sistema FFT. El impacto económico de la caseta de cobro Querétaro-Celaya y Tepetzotlán se presentan en el Anexo 13, con una implicación similar.

4.5.2.5 Punto de transición tarifa-costo económico

La metodología propuesta se puede emplear para estimar en que punto el costo provocado por el congestionamiento supera al generado por el cobro de peaje de todos los vehículos, se realizó un escenario hipotético en el cual se saturó el tránsito real de un día atípico para comprobar lo anterior, en este caso se simuló dos horas, ya que en los casos reales estudiados se determinó que durante la hora de máxima demanda el impacto económico representaba hasta 87% del costo del peaje, como se menciona en la descripción del problema existen casos donde el congestionamiento puede producirse durante varias horas, teniendo lo anterior se obtuvieron los resultados de la comparativa, lo cual se puede observar en la Tabla 32.

Tabla 32: Peaje acumulado vs Impacto Economico

Hora	Peaje acumulado	Impacto económico
08:10	\$ 93,286.00	\$ 10,585.33
08:20	\$ 184,230.00	\$ 55,716.74
08:30	\$ 274,160.00	\$ 110,210.39
08:40	\$ 304,434.00	\$ 171,124.33
08:50	\$ 337,826.00	\$ 241,005.80
09:00	\$ 364,248.00	\$ 318,419.42
09:10	\$ 403,946.00	\$ 407,449.78
09:20	\$ 437,766.00	\$ 505,270.40
09:30	\$ 481,544.00	\$ 602,899.14
09:40	\$ 518,232.00	\$ 716,805.62
09:50	\$ 548,972.00	\$ 834,637.66
10:00:	\$ 582,692.00	\$ 967,510.54

Se puede observar que durante el transcurso de la segunda hora simulada el costo que provoca el congestionamiento (tiempo, consumo de combustible y emisiones contaminantes) supera al del peaje, llegando hasta representar un 66% del consto de congestionamiento al final de la simulación, finalmente se genero la Gráfica 24, para mostrar de una manera mas representativo el resultado obtenido.

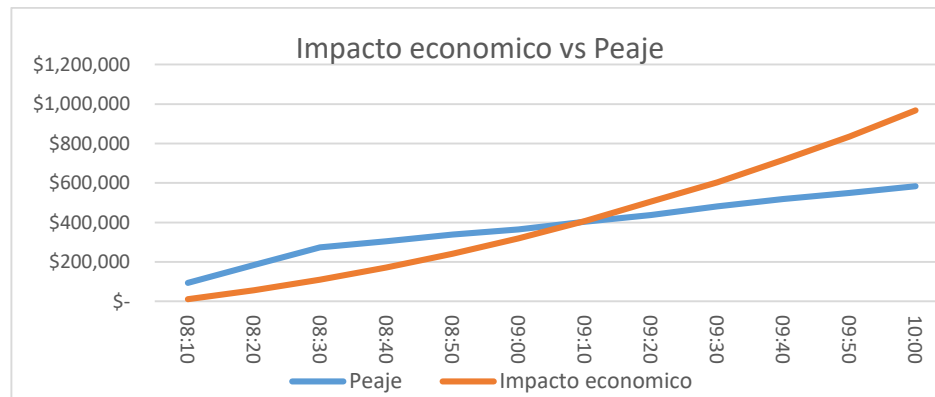


Figura 24: Grafica punto de transición tarifa – costo economico.

Fuente: Elaboración propia

Lo anterior abre la pauta para que la metodología propuesta se pueda aplicar en casos reales, y en los cuales donde los costos del congestionamiento superen al del peaje se opte por aplicar soluciones que beneficien al los usuarios de la red carretera.

5. CONCLUSIONES

Se estudian tres métodos diferentes de cobro de peaje en casetas de carreteras mexicanas, con el fin de determinar los costos que se generan para el usuario en situación de congestión, y demostrar los beneficios y las desventajas que presentan las innovaciones tecnológicas de cobro.

Con base a los parámetros estudiados en la presente investigación, se valida lo establecido en la hipótesis, al demostrarse que los sistemas de cobro mediante sistemas ITS presentan beneficios que puede trasladarse tanto a los usuarios del transporte en las carreteras como al ecosistema en cuestión. Al simularse el tráfico y su impacto sobre la contaminación del aire, los resultados cumplen con el propósito de dimensionar y generar datos cuantitativos antes inexistentes de los impactos de las opciones analizadas, en términos de ahorro de tiempo, reducción del consumo de combustible y en consecuencia menor generación de emisiones contaminantes a la atmósfera, los resultados muestran que en días típicos con el sistema de cobro manual genera un impacto mayor del 48% al 75% mayor con respecto al sistema de electrónico y del 69% al 87% con respecto a el sistema Free Flow y en días atípicos el sistema de cobro manual genera un impacto mayor del 55% al 81% con respecto al sistema electrónico de peaje y de un 69% a 91% con respecto al sistema de cobro Free flow.

Al tomar conciencia de la magnitud de esos impactos, los operadores de las carreteras de cuota no pueden ignorar las consecuencias económicas y ambientales para los usuarios y para el país derivadas de una operación deficiente de sus sistemas de cobro, la razón por la cual no se toman en cuenta los nuevos sistemas de cobro en México pudiera estar relacionado principalmente a temas políticos y sociales afín a temas de fiabilidad y control, siendo los principales problemas el control de recursos e interoperabilidad por parte de las entidades y la falta de comprensión hacia los sistemas ETC de parte de los usuarios, derivando a seguir utilizando los sistemas actuales deficientes.

La investigación constituye una aportación al estudio de los impactos económicos y ambientales, tanto desde el punto de vista metodológico como del empleo de herramientas de simulación. Así, es necesario considerar estos

resultados como un antecedente y punto de referencia para la toma de decisiones al implementar políticas públicas. Por ejemplo aquellas dirigidas a los usuarios que utilizan los sistemas de cobro electrónicos actuales (como el TAG) podrían obtener un beneficio en cuanto al costo del peaje, es decir que mediante incentivos se les haga un descuento por contribuir a la reducción del congestionamiento que genera el pago manual. Por otro lado, esas políticas públicas que incentivan el cambio tecnológico también se traducirían en menores impactos al medio ambiente, por la reducción del consumo de combustible en condiciones de congestionamiento en casetas de cobro.

Se demuestra que en situación de congestionamiento, tan solo el usuario de la carretera incurre en sobrecostos de operación, lo cual resulta anti-económico y desvirtúa el supuesto de que las autopistas de cuota reducen los tiempos totales de recorrido. Por su parte, aunque se han estimado de manera indirecta los costos al medio ambiente por falta de datos, es necesario llevar a cabo investigaciones en México para demostrar si en situación de congestionamiento agudo (por ejemplo en períodos vacacionales o en accidentes), al ser tan elevados los costos de operación al usuario y los ambientales, el operador de la carretera tendría la obligación de dejar pasar a los vehículos hasta que se disipe el umbral de congestionamiento, sobre todo en situaciones críticas de contingencia ambiental, así mismo queda demostrado de manera hipotética que en casos de un congestionamiento considerable el impacto económico supera al costo generado por el peaje, sustentando lo anterior.

La investigación demuestra la importancia de implementar mejores tecnologías y procedimientos para desarrollar sistemas inteligentes aplicados al transporte, los cuales al no estar dimensionados en sus beneficios, suelen ignorarse y preferir “soluciones” tradicionales como las de ampliación del número de carriles o líneas de cobro en un sistema manual. Al analizar un caso real con datos obtenidos en campo y no solo con datos estadísticos, se demuestran los beneficios asociados a los ETC y FFT en términos de la optimización de tráfico y de los impactos al usuario, al medio ambiente y a la población.

Se demuestra la necesidad de adoptar estos tipos de sistemas en la red carretera del país, ya que al mejorar la velocidad, tiempo y consumos de combustible se pueden obtener beneficios sociales, económicos y ambientales.

En particular la investigación a futuro pudiera centrarse en el análisis de congestiónamiento en las casetas de cobro con proyecciones de tráfico a varios años, para realizar una comparativa con los escenarios ya analizados, de igual manera se podrían estudiar otros efectos que provocan las casetas de cobro tal sea el caso de los accidentes debido a la ubicación de estas o la determinación de costos por tiempo perdido en el transporte de mercancías, es decir el valor de costo de oportunidad para el transporte de carga al agilizarse el tráfico con respecto a cuándo están bajo los efectos del congestiónamiento provocados por las casetas de cobro.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Abdelwahab, H. T. (2016), Traffic micro-simulation model for design and operational analysis of barrier toll stations, *Ain Shams Engineering Journal*, In press.
- Abuzwidah, M. & Abdel-Aty M. (2015), Safety assessment of the conversion of toll plazas to al-electronic collection system, *Accident Analysis and Prevention*, 80, 153-161.
- Anya, A., Roupail, N., Frey, C., & Schroeder, B. (2014), Application of AIMSUN micro simulation model in estimating emissions on signalized arterial corridors, *Proceedings of 93th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Whashington D.C: Transportation Research Record, 1-13.
- Arroyo, O.J., Aguerrebere R. & Torres G. (2016), Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano, *Instituto Mexicano del Transporte*, 407, 89.
- Askoy, G., & Celikoglu, H. (2014), Analysis of toll queues by micro-simulation: results from a case study in Istanbul, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 111, 614-623.
- Athanassiou, S., Bates, M., & Steer D. (2006), The role of tolling strategies in the success of electronic toll collection systems, *Proceedings of ETC*, STRASBOURG: Transportation research record, 1-21.
- Aycin, M., Kiskel, K., Papayannoulis, V., & Davies, G. (2009), Development of methodology for toll plaza delay estimation for use in travel demand model postprocessor, *Transportation Research Record*, 2133, 1-10.
- Bao, Y., Xiao F., Gao Z., & Gao Z. (2017), Investigation of the traffic congestion during public holiday and the impact of the toll-exemption policy, *Transportation Research Part B*, 104, 58-81.
- Barceló, J. (2010), *Fundamentals of Traffic Simulation*, *International series in operations research and management Science*, 145, 431 pag..
- Berechman, J., & Tseng, P. (2012), Estimating the environmental costs of port related emissions: The case of Kaohsiung, *Transportation Research Part D*, 17, 35-38.
- Bickel, P., Friedrich, R., Link, H., Stewart, L., & Nash, C. (2006), Introducing enviromental externalities into transport pricing: measurement and implications, *Transport Reviews*, 26, 389-415.
- Bigazzi, A., & Figliozzi, M. (2013), Marginal costs of freeway traffic congestion with on-road pollution exposure externality, *Transportation Research Part A*, 57, 12-24.
- Bokare, P., & Maurya, A. (2013), Study of effect of speed, acceleration and deceleration of small petrol car on its tail pipe emission, *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 4, 465-478.
- Bokare, P.S., & Maurya A.K. (2017), Acceleration-Deceleration Behaviour of Various Vehicle Types, *Transportation Research Procedia*, 25, 4737-4753.
- Burke, P., Batsuuri, T., & Halley, M. (2017), Easing the traffic: the effects of Indonesia's fuel subsidy reforms on toll-road travel, *Transportation Research Part A*, 105, 167-180.

- Casas, J., Ferrer, J., Garcia, D., Perarnau, J., & Torday, A. (2010), *Traffic simulation with Aimsun*, in: Barceló, J. (Ed.), *Fundamentals of Traffic Simulation*. Springer New York, pp. 173-232.
- Chen, R., y Nozick, L. (2016), Integrating congestion pricing and transit investment planning, *Transportation Research Part A*, 89, 124-139.
- Coria, J., & Zhang, X., (2017), Optimal environmental road pricing and daily commuting patters, *Transportation Research Part B*, 105, 297-314.
- Daiheng, N. (2016), *Traffic Flow Theory: Characteristics, experimental methods, and numerical techniques*, Oxford: Butterworth-Heinemann.
- De Rus., G., Campos, J., & Nombela, G. (2006), *Economía del transporte*. (Ed) Antoni Bosch, editor, S.A., España, ISBN: 84-95348-08-X
- Dindarloo, R., & Indermoosa-Einaz, S. (2016), Determinants of fuel consumption in mining trucks, *Energy*, 112, 232-240.
- Donateo, T., & Giovinazzi, M. (2017), Building a cycle for real driving emissions, *Proceedings of 72nd Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association (ATI)*, Lecce: Energy Procedia. 126, 891-898.
- Dumortier, J., Zhang, F., Marron, J. (2017), State and federal fuel taxes: The road ahead for U.S. infrastructure funding, *Transporting Policy*, 53, 39-49.
- European Commission (1970 - 2014), European emission standards. Transport and Environmental Policy Research.
- European Commission (2014), Update of the handbook of external costs of transport. Transport and Environmental Policy Research.
- Franzese, O. (2011), Effect of weighth and roadway grade of the fuel economy of class-8 freight trucks, *Oak Ridge National Laboratory*, 471, 1-72.
- Fu, S., Y Gu, Y. (2016), Highway toll and air pollution: evidence from Chinese Cities, *Journal of Enviromental Economics and Management*, volumen 16, 0-20
- Geogios, F., Nikiforos-Georgios, Z., & Biagio, C. (2017), Fuel consumption and CO2 emissions from passanger cars in Europe Laboratory versus real-world emissions, *Energy and Combustion Science*, In Press.
- Glavic, D., Milos, M., Luttinen, T., Cicevic, S., & Trifunovic A. (2017), Road to price: user perspectives on road pricing in transition country, *Transportation Research Part A*, 105, 79-94.
- Gordin, E., Klodzinski, J., & Dos Santos, C. (2011), Safety benefits from deployment of open road tolling for main.line toll plazas in Florida, *Transporting Research Record*, 2229, 101-109.
- Guo, Q., Sun, Y., Li, Z., & Li Z. (2017), An integrated model for road capacity choice and cordon toll pricing, *Research in Transportation Economics*, 62, 68-79.
- Guo, X., Xu, Da. (2016), Profit maximization by a private toll road with cars and trucks, *Transportation Research Part B*, 91, 113-129.
- Hao, L., Chen, W., Li, L., Tan, J., Yin, H., Ding, Y., & Ge Y. (2017), Modeling and predicting low-speed vehicle emissions as a function of driving kinematics, *Journal of Enviromental Science*, 55, 109-117.
- Hensher, A. D., Ho, Q.C., & Liu W. (2016), How much is too much for tolled road users: Toll saturation and the implications for car commuting value of travel time savings? , *Transportation Research Part A*, 94, 604-621.

- Heras, J., Gomez, J., & Vassallo J. (2017), Measuring drivers' attitudes toward use of electronic toll collection systems in Spain, *Transporting research record*, 2670, 1-8.
- Hernandez, S., Monzon, A., & Sobrino, N. (2013), Decarbonization of toll plazas: impact assessment of toll collection system management, *Proceedings of 92th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Whashington D.C: Transportation Research Record, 1-13.
- Hong, Y., Kaan, O., & Bekir, B. (2012), Effects of the open road tolling on safety performance of freeway mainline toll Plazas, *Transporting Research Record*, 2324, 85-92.
- Institute Of Transportation (IOT) (2011), *Highway Capacity Manual in Taiwan*, Taipei: Ministry of Transportation and Communication.
- Jadhav, D., & Sabnis, M. (2015), Open Road Tolling in India by Pattern Recognition, *Proceedings of International Conference on Technologies for Sustainable Development (ICTSD)*, Mumbai: Institute of Technology Chembur, 1-5.
- Jinghui, W., y Rakha, H. (2016), Fuel consumption model for conventional diesel buses, *Applied Energy*, 170, 394-402.
- Komada, K., Masukura, S., & Nagatan, T. (2009), Traffic flow on a toll highway with electronic and traditional tollgates, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 338, 4979–4990.
- Levinson, D., & Chang, E. (2002), A model for optimizing electronic toll collection systems, *Transportation Research Part A*, 37, 293-314.
- Li, J., Gillen, D., & Dahlgren, J. (1999), Benefit-Cost Evaluation of the Electronic Toll Collection System, *Transportation Research Record*, 99, 31-38 pag.
- Mahmoud, S., & Abdolreza, R. (2007), Cost-Benefit analysis of electronic toll collection (ETC) System in Iranian Freeways (Case Study: Tehran-Qom Freeway), *Procedings of the 2nd International siminar on Intelligent Transport System (ITS) In Road Network Operations*, Malaysia: World Road Association, 8 pag.
- Masish J., Shirinwas A., & Gaurang, J. (2011), Studying effect of eight-to-power ratio on acceleration profile of trucks under varyng gradient conditions, *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 10, 1-16.
- Mehar, A., Chandra, S., & Velmurugan, S. (2013), Speed and acceleration characteristics of Different types of Vehicles on multi-Lane highways, *European Transport*, 55, 1-12.
- Muma, J., (2009), *Guide to Electronic Toll Payments*, New York, USA: Xulon Press,
- Nagatani, T. (2014), Jam formation with line changing at two tollgates on a highway, *Physica A*, 415, 596-603.
- Nagatani, T. (2016), Traffic jam at adjustable tollgates controlled by line length, *Physica A*, 442, 131-136.
- NOM-012-SCT-2-2017, Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal, Diario Oficial de la Federación, México, 14 de Noviembre de 2017.

- Obelheiro, M.R., Cybis, H.B., & Ribeiro L.J. (2011), Level of Service Method for Brazilian Toll Plazas, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 16, 120-130.
- Odeck, J. (2017), Government versus toll funding of road projects – A theoretical consideration with an ex-post evaluation of implemented toll, *Transportation Research Part A*, 98, 97-107.
- Odeck, J., & Welde, M. (2017), The accuracy of toll road traffic forecasts: An econometric evaluation, *Transportation Research Part A*, 101, 73-85.
- Panis, L., Broek, S., & Liu R. (2006), Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits, *Science of the Total Environment*, 371, 270–285.
- Perez, M. (2014), Energy consumption and intensity of toll highway transport in Spain, *Transportation Research Part D*, 27, 1-5.
- Petro, F., & Konecny, V. (2017), Calculation of emissions from transport services and their use for the internalization of external costs in road transport, *Procedia Engineering*, 192, 677-682.
- Pickford, A. & Blythe, P. (2006), *Road User Charging and Electronic Toll Collection*, The Institution of Engineering and Technology (IET), Boston, USA: Artech House.
- Qian, Y., Tiezhu, Li., & Hu, L. (2016), improving urban bus emission and fuel consumption modeling incorporating passenger load factor for real world driving, *Applied Energy*, 161, 101-111.
- Qian, Y., Shao, X., & Zeng, J., Wang M. (2013), An improved cellular automaton model with the consideration of a multi-point tollbooth, *Physica A*, 392, 5874- 5878.
- Rakha H., Snare M., & Dion F. (2004), Vehicle dynamics model for estimating maximum light-duty vehicle acceleration levels, *Transportation Research Record*, 1883,40–49.
- Rampinelli, B., & Simic, M. (2016). Traffic flow Optimization In Freeways, *Procedia Computer Science*, 96, 1637–1646.
- Real Academia Española. (2001), *Diccionario de la lengua española* [Dictionary of the Spanish Language], Madrid, Spain: Espasa calpe.
- Regan, M., Smith, J., & Love, P., (2017) Financing of public partnerships: Transactional evidence from Australian toll roads, *Case Studies Of Transport Policy*, 5, 267-278
- Reyes, C., & Cárdenas, J. (2011), *Ingeniería de tránsito Fundamentos y Aplicaciones*, México D.F.: Alfaomega S.A.
- Salgado, D., Jovolic, D., Martin P.T., & Aldrete R.M. (2016) Traffic Microsimulation Models Assessment – A Case Study of International Land Port of Entry, *Procedia Computer Science*, 83, 441–448.
- Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2016), *Manual de proyecto geométrico 2016*, Mexico D.F: Dirección general de servicios técnicos.
- Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2018), Datos viales Estado de Mexico 2017, Disponible en: <<http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/datos-viales/2017/>>. Fecha de acceso: 18 de Febrero de 2018.

- Soriguera F., Rosas, D. & Robusté, F. (2010), Travel time measurement in closed toll highways, *Transportation Research Part B: Methodological*, 44, 1242-1247.
- Thomson, I., & Bull, A. (2002), La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales, *De la CEPAL*, 76, 109-121.
- Tian, J., Yang, D., Zhang, H., & Liu, L. (2016), Classification method of energy efficiency and CO2 emission intensity of commercial trucks in China's road transport, *Procedia Engineering*, 137, 75-84.
- Torres, G., & Diaz, E. (2004). "Propuesta metodológica para determinar el valor del tiempo de los ocupantes de los vehículos que circulan por la red carretera de México". *Instituto Mexicano del Transporte*, 85 pag.
- Torres, G., & Hernández, S. (2018), Propuesta metodológica para la estimación del valor del tiempo de los usuarios de la infraestructura carretera en México: el caso de transporte de pasajeros, *Instituto Mexicano del Transporte*, 96 pag.
- Transporting Research Board (TRB) (2010), *Highway Capacity Manual*, Washington D.C., USA: National Research Council.
- Tseng, P., Lin, D., & Chien S. (2014), Investigating the impact of highway electronic toll collection to the external cost: A case study in Taiwan, *Technological Forecasting and Social Change*, 86, 265-272.
- U.S Department of Transportation (USDOT). (2010) *Traffic Detector Handbook*, Washington D.C., USA: Federal Highway Administration.
- Valdes, D., Colucci, B., Fisher, D., Ruiz, J., Colon, E., & Gacia, R. (2016), Driving simulation of the safety and operation performance at a freeway toll plaza, *Transportation Research Record*, 2602, 129-137.
- Vasconcelos, L., Neto, L., Santos, S., Silva, B., & Seco A. (2014), Calibration of the Gipps car-following model using trajectory data, *Proceedings of the 17th Meeting of the EURO Working Group on Transportation (EWG)*, Sevilla: Transporting research procedia, 952-961.
- Venillaga, M., y Krimmer, M. (2006), Impact of Electronic Toll Collection and Electronic Screening on Heavy-Duty Vehicle Emissions, *Transporting Research Record*, 1987, 11-20.
- Wang, J., & Rakha (2016), Fuel consumption model for conventional diesel buses, *Applied Energy*, 170, 394-402.
- Weng, J.; Wang, R.; Wang, M.; Rong, J. (2015), Fuel consumption and vehicle emission models for evaluating environmental impacts of the ETC system. *Sustainability*, 7, 8934-8949.
- Wesseh, P., & Lin B. (2016), Optimal emission taxes for full internalization of environmental externalities, *Jornal of Cleaner Production*, 137, 871-877.
- Wolshon, B., & Pande. A., (2016), *Traffic Engineering Handbook*, 7th Edition, Washington D.C., USA: Institute of Transportation Engineers (ITE).
- Yu, Q., Li, T., & Li., H. (2016) Improving urban bus emissions and fuel consumption mo Wesseh, P., & Lin B. (2016), Wesseh, P., & Lin B. (2016), Wesseh, P., & Lin B. (2016), deling by incorporating passenger load factor for real world driving, *Applied Energy*, 161, 101-111.
- Yu, S., , Zhao, Xi., Xu, Z., & Zhang, L. (2016) The effects of velocity difference changes with memory on the dynamics characteristics and fuel economy of

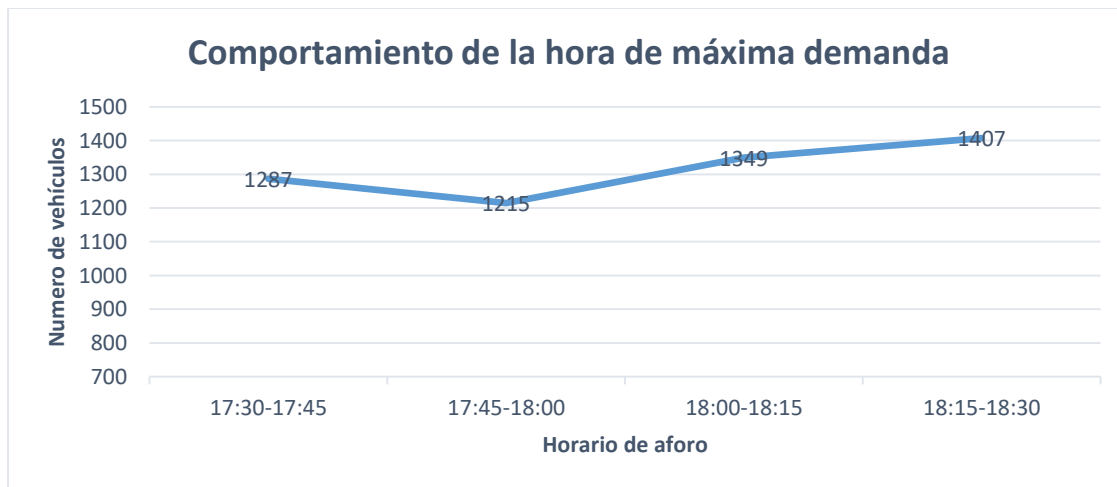
- traffic flow, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 461, 613–628.
- Zegeye, S.K., Schutter, B.D., Hellendoorn, J., Breunese, E.A., & Hegyi, A. (2013), Integrated macroscopic traffic flow, emission, and fuel consumption model for control purposes, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 31, 158-171.
- Zhang, W., & Kockelman K.M. (2016), Optimal policies in cities with congestion and agglomeration externalities: congestion tolls, labor subsidies, and place-based strategies, *Journal of Urban Economics*, 95, 65-86.

7. ANEXOS

Anexo 1. Aforos de campo y gráficas de hora de máxima demanda

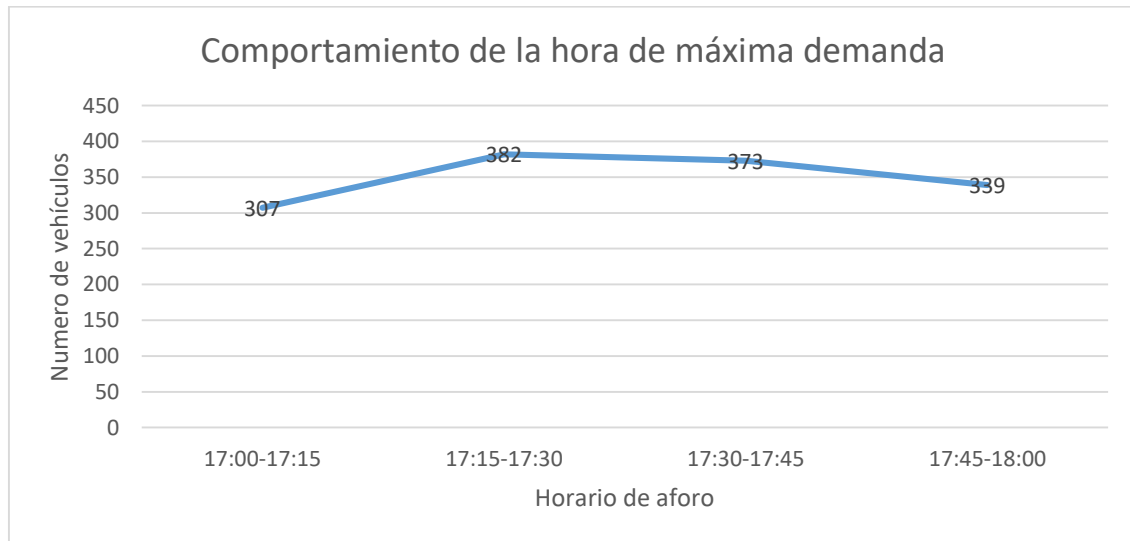
Caseta de cobro Palmillas (días atípicos)

Dirección México - Querétaro								
Tipo de Vehículo	HORARIO							
	17:00	17:15	17:30	17:45	18:00	18:15	18:30	18:45
	a	a	a	a	a	a	a	a
	17:15	17:30	17:45	18:00	18:15	18:30	18:45	19:00
A	402	399	510	470	515	520	416	471
B	23	19	28	24	32	31	18	29
C2	24	17	32	27	29	14	23	27
C3	15	15	30	34	27	19	25	27
T3S2	28	51	38	45	50	56	41	60
T3S3	8	3	9	3	7	3	4	10
T3S2R4	24	15	10	19	18	8	10	14
Dirección Querétaro - México								
A	450	533	490	440	532	580	380	480
B	27	22	38	34	38	45	27	36
C2	32	25	30	24	22	20	23	26
C3	14	28	20	20	25	27	40	32
T3S2	30	29	25	48	27	55	90	105
T3S3	14	21	12	9	5	9	8	15
T3S2R4	29	12	15	18	22	20	25	22
TOTAL	1120	1189	1287	1215	1349	1407	1130	1354



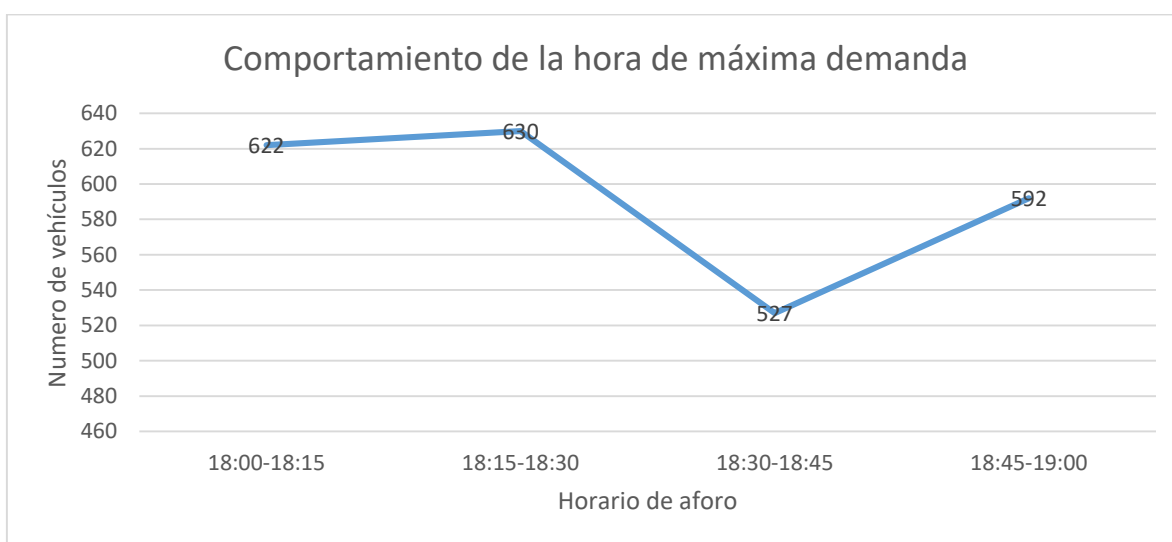
Caseta de cobro Querétaro - Celaya (días típicos)

Dirección Querétaro - Celaya								
Tipo de Vehículo	HORARIO							
	07:00	07:15	07:30	07:45	08:00	08:15	08:30	08:45
	a	a	a	a	a	a	a	a
	07:15	07:30	07:45	08:00	08:15	08:30	08:45	09:00
A	90	117	130	113	120	110	130	150
B	7	4	7	9	5	10	7	10
C2	12	17	11	10	8	4	15	16
C3	7	15	12	2	5	7	5	3
T3S2	13	22	20	19	15	24	6	10
T3S3	4	1	5	8	6	5	7	7
T3S2R4	12	15	8	11	13	4	14	14
Dirección Celaya-Querétaro								
A	105	120	111	120	135	130	125	176
B	10	5	8	7	8	10	9	14
C2	10	15	15	7	9	5	17	12
C3	4	17	10	8	10	9	10	4
T3S2	10	13	10	9	13	20	8	15
T3S3	6	5	8	2	8	3	9	8
T3S2R4	14	10	15	12	14	7	12	12
TOTAL	307	382	373	339	370	353	379	453



Caseta de cobro Querétaro - Celaya (días atípicos)

Dirección Querétaro-Celaya								
Tipo de Vehículo	HORARIO							
	17:00	17:15	17:30	17:45	18:00	18:15	18:30	18:45
	a	a	a	a	a	a	a	a
	17:15	17:30	17:45	18:00	18:15	18:30	18:45	19:00
A	135	155	141	181	220	251	174	180
B	12	10	11	13	12	15	7	14
C2	14	13	15	9	18	14	15	16
C3	11	13	15	9	13	17	12	15
T3S2	14	26	20	19	19	17	16	14
T3S3	7	8	4	7	11	11	7	7
T3S2R4	14	17	9	15	8	5	7	6
Dirección Celaya-Querétaro								
A	160	170	201	235	230	214	200	271
B	14	9	5	12	14	13	10	17
C2	15	11	17	10	19	20	21	12
C3	9	14	19	15	14	12	11	7
T3S2	12	9	17	18	22	18	23	15
T3S3	15	14	9	1	14	11	9	8
T3S2R4	19	18	17	12	7	7	10	8
TOTAL	454	493	503	558	622	630	527	592



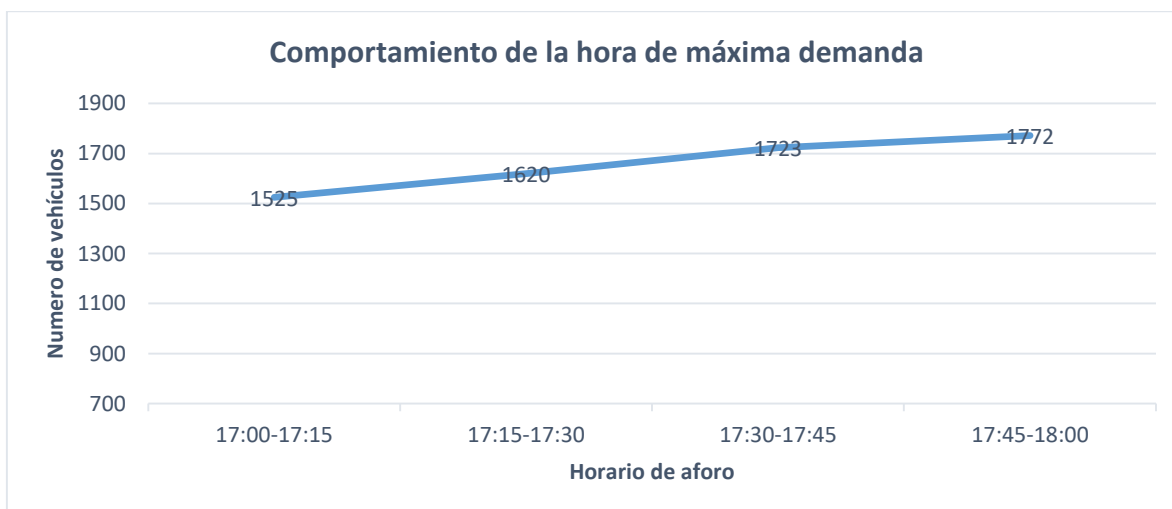
Caseta de cobro Tepetzotlán (días típicos)

Dirección México - Querétaro								
Tipo de Vehículo	HORARIO							
	07:00	07:15	07:30	07:45	08:00	08:15	08:30	08:45
	a	a	a	a	a	a	a	a
	07:15	07:30	07:45	08:00	08:15	08:30	08:45	09:00
A	300	295	280	422	386	390	381	302
B	17	12	14	27	17	31	27	19
C2	24	17	25	39	48	42	51	27
C3	15	15	24	14	25	19	17	27
T3S2	26	22	20	72	67	65	71	70
T3S3	8	1	5	27	22	17	19	10
T3S2R4	24	15	15	20	27	14	11	14
Dirección Querétaro - México								
A	450	533	480	352	385	437	478	458
B	30	18	20	40	47	35	33	36
C2	30	30	30	17	27	38	20	26
C3	18	26	20	33	27	35	40	32
T3S2	30	29	27	71	59	58	67	105
T3S3	12	14	16	20	24	27	31	15
T3S2R4	29	12	30	18	15	12	10	30
TOTAL	1013	1039	1006	1172	1176	1220	1256	1171



Caseta de cobro Tepetzotlán (días atípicos)

Tipo de Vehículo	HORARIO							
	17:00	17:15	17:30	17:45	18:00	18:15	18:30	18:45
	a	a	a	a	a	a	a	a
	17:15	17:30	17:45	18:00	18:15	18:30	18:45	19:00
A	552	570	650	687	552	601	499	302
B	41	50	45	39	19	22	31	25
C2	28	31	42	24	30	29	27	22
C3	35	27	33	25	24	17	19	27
T3S2	52	68	65	70	35	42	55	70
T3S3	20	21	31	25	3	5	4	10
T3S2R4	21	16	19	13	7	9	10	14
Dirección Querétaro - México								
A	578	631	670	710	578	650	680	550
B	47	55	43	60	20	23	26	36
C2	30	22	28	18	19	23	23	26
C3	17	27	15	16	25	27	40	32
T3S2	56	63	49	58	75	80	90	105
T3S3	31	27	22	17	7	5	8	15
T3S2R4	17	12	11	10	22	24	17	30
TOTAL	1525	1620	1723	1772	1416	1557	1529	1264



Anexo 2. Dimensiones de características físicas de los vehículos más representativos

Vehículos ligeros tipo A

Marca	Modelo	Longitud (mm)	Anchura (mm)	Altura (mm)
Audi	A1	3973	1740	1416
Chevrolet	Aveo	4399	1735	1.517
Chevrolet	Sonic	4039	1735	1517
Chevrolet	Spark	3640	1597	1522
Dodge	Attitude	4245	1670	1515
Ford	Fiesta	4040	1735	1476
Ford	Focus	4378	1825	1454
Ford	Figo	4249	1699	1525
Ford	Ranger	5362	1860	1815
Honda	FIT	3995	1694	1525
Honda	Accord	4725	1840	1440
Hyundai	Grand I10	3665	1660	1500
Jeep	Cherokee	4623	1859	1669
Kia	Rio	4065	1725	1450
Mazda	Mazda 3	4470	1795	1465
Mazda	Mazda 2	4060	1695	1495
Mitsubishi	L200	5205	1785	1775
Nissan	Versa	4465	1695	1514
Nissan	March	3827	1665	1528
Nissan	Np300	5330	1850	1840
Seat	León ST	4549	1816	1454
Seat	Ibiza	4061	1693	1445
Suzuki	Swift	3840	1735	1495
Toyota	Hilux	5330	1855	1815
Toyota	Yaris	3945	1695	1510
Toyota	Corrolla	4540	1760	1470
Volkswagen	Jetta	4659	1778	1482
Volkswagen	Golf Sportsvan	4338	1807	1578
Volkswagen	Vento	4384	1699	1467

Vehículos tipo B (Autobuses) y vehículos tipo C2 y C3 (Camiones)

Tipo de vehículo	Dimensiones (m)			
	Largo	Ancho	Alto	Ejes
B2				
International 3000RE	11.7	2.58	3.2	4.953
International 4700 SCD	9.75	2.58	3.15	5.15

International traveler	10.63	2.6	3.4	4.953
Mercedez Benz Alliado	12.04	2.6	3.3	6.18
Mercedez Benz Viaggio 1050	12	2.6	3.375	-
Hyundai Universe	11.78	2.495	3.44	5.85
C2				
NPR Reward Euro IV	5.99	2.115	2.27	3.365
Chevrolet NHR Reward	4.73	1.77	2.185	2.475
Chevrolet NKR Reward	5.25	1.86	2.16	2.99
Chevrolet NQR Reward	6.64	2.04	2.265	3.815
International City Star 11millb	6.95	1.995	2.284	3.845
Hyundai HD65	6.17	2	2.25	3.415
Kenworth KW45 12 ton	7.29	2.28	2.28	3.9
VW Delivery 9.160	6.43	2.684	2.407	3.3
C3				
Mercedez Benz 2726 B/36	7.637	2.485	2.698	4.95
Chevrolet FVZ Forwar Euro IV	9.73	2.4	2.905	6.35
International Workstar	9.801	2	-	6.146
VW Constellation 31.280	7.506	2.507	3	3.44

Vehículos pesados tipo T3S2, T3S3 y T3S2R4

Tipo de vehículo	Dimensiones (m)			
	Largo	Ancho	Alto	Ejes
T3S2	16.18	2.5	3.8	-
T3S3	17.1	2.5	3.6	-
T3S2R4	2.8	2.5	3.8	-

Anexo 3. Velocidades de operación tomadas en campo y datos estadísticos

Velocidad de operación (km/h) en tramo previo a Caseta de cobro Querétaro - Celaya

Querétaro-Celaya						
A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
124.0	95.0	90.0	95.0	109.0	115.0	89.0
135.0	98.0	116.0	104.0	118.0	93.0	84.0
100.0	108.0	90.0	96.0	114.0	114.0	88.0
104.0	110.0	94.0	91.0	94.0	90.0	100.0
112.0	87.0	83.0	111.0	104.0	100.0	79.0
107.0	98.0	86.0	89.0	87.0	89.0	105.0
100.0	102.0	94.0	116.0	105.0	87.0	105.0
99.0	130.0	123.0	98.0	101.0	87.0	102.0
140.0	83.0	112.0	92.0	88.0	108.0	88.0
120.0	106.0	98.0	101.0	112.0	96.0	78.0
112.0	115.0	87.0	89.0	101.0	92.0	124.0
124.0	96.0	85.0	94.0	109.0	87.0	81.0
130.0	115.0	88.0	86.0	85.0	88.0	75.0
103.0	83.0	91.0	101.0	108.0	118.0	125.0
122.0	104.0	85.0	88.0	114.0	112.0	78.0
99.0	122.0	85.0	108.0	117.0	120.0	102.0
104.0	103.0	120.0	116.0	120.0	88.0	88.0
115.0	81.0	101.0	100.0	87.0	98.0	110.0
92.0	87.0	83.0	101.0	89.0	101.0	90.0
111.0	116.0	102.0	95.0	102.0	92.0	83.0
101.0	112.0	96.0	111.0	116.0	90.0	100.0
119.0	90.0	125.0	101.0	86.0	112.0	106.0
112.0	99.0	118.0	115.0	110.0	92.0	80.0
92.0	90.0	92.0	101.0	92.0	93.0	83.0
104.0	121.0	118.0	119.0	88.0	108.0	82.0
81.0	102.0	90.0	110.0	117.0	98.0	85.0
95.0	111.0	122.0	108.0	99.0	102.0	97.0
95.0	96.0	125.0	100.0	85.0	87.0	106.0
133.0	102.0	93.0	120.0	112.0	97.0	92.0
97.0	104.0	120.0	88.0	97.0	118.0	97.0
99.0	114.0	114.0	114.0	112.0	96.0	70.0
109.0	85.0	105.0	118.0	107.0	86.0	101.0
111.0	120.0	105.0	111.0	108.0	116.0	76.0
96.0	89.0	84.0	101.0	111.0	97.0	108.0

122.0	81.0	101.0	87.0	116.0	117.0	100.0
124.0	102.0	86.0	93.0	118.0	118.0	83.0
82.0	106.0	115.0	120.0	90.0	108.0	108.0
112.0	112.0	119.0	115.0	112.0	110.0	78.0
116.0	84.0	90.0	96.0	86.0	97.0	97.0
102.0	86.0	122.0	112.0	118.0	99.0	110.0
97.0	106.0	81.0	110.0	107.0	130.0	106.0
132.0	90.0	103.0	120.0	85.0	111.0	82.0
87.0	100.0	124.0	100.0	134.0	102.0	99.0
125.0	109.0	85.0	87.0	106.0	90.0	99.0
106.0	125.0	104.0	105.0	118.0	92.0	73.0
114.0	87.0	116.0	102.0	108.0	104.0	91.0
111.0	119.0	101.0	93.0	103.0	86.0	95.0
83.0	121.0	94.0	105.0	89.0	86.0	110.0
142.0	111.0	113.0	99.0	117.0	89.0	109.0
97.0	82.0	125.0	108.0	96.0	89.0	105.0

Querétaro-Celaya							
Veh Tipo	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Media	107.99	101.05	100.97	102.31	103.43	99.26	93.14
Mínima	81.00	81.00	81.00	86.00	85.00	86.00	70.00
Máxima	142.00	130.00	125.00	120.00	134.00	130.00	125.00

Velocidad de operación (km/h) en tramo previo a caseta de cobro Palmillas

Palmillas						
A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
130.0	85.0	104.0	77.0	84.0	110.0	111.0
100.0	107.0	77.0	85.0	115.0	104.0	99.0
112.0	111.0	125.0	96.0	90.0	103.0	103.0
140.0	118.0	127.0	99.0	124.0	88.0	95.0
95.0	117.0	122.0	122.0	89.0	118.0	89.0
108.0	125.0	113.0	124.0	81.0	98.0	97.0
92.0	93.0	92.0	100.0	90.0	111.0	72.0
133.0	105.0	99.0	117.0	122.0	105.0	106.0
138.0	114.0	92.0	101.0	95.0	120.0	107.0
136.0	103.0	128.0	108.0	92.0	92.0	77.0
108.0	93.0	104.0	112.0	120.0	109.0	108.0
113.0	124.0	99.0	113.0	102.0	103.0	100.0
105.0	90.0	87.0	78.0	115.0	80.0	93.0
108.0	102.0	76.0	84.0	91.0	97.0	107.0
134.0	90.0	104.0	112.0	103.0	108.0	112.0

85.0	85.0	122.0	76.0	99.0	122.0	71.0
98.0	107.0	77.0	97.0	103.0	100.0	104.0
96.0	89.0	77.0	76.0	108.0	92.0	84.0
122.0	83.0	90.0	105.0	89.0	114.0	79.0
94.0	96.0	124.0	120.0	91.0	119.0	79.0
108.0	93.0	92.0	113.0	94.0	111.0	111.0
103.0	83.0	89.0	86.0	105.0	91.0	82.0
92.0	101.0	115.0	111.0	91.0	105.0	98.0
125.0	114.0	112.0	115.0	116.0	107.0	100.0
119.0	113.0	75.0	123.0	101.0	101.0	101.0
100.0	97.0	80.0	93.0	82.0	112.0	88.0
136.0	107.0	92.0	119.0	86.0	94.0	113.0
137.0	102.0	91.0	102.0	82.0	105.0	111.0
105.0	110.0	104.0	103.0	118.0	80.0	75.0
103.0	115.0	86.0	99.0	117.0	81.0	72.0
108.0	99.0	114.0	97.0	97.0	116.0	90.0
139.0	124.0	82.0	95.0	109.0	125.0	74.0
82.0	95.0	111.0	84.0	124.0	108.0	99.0
93.0	115.0	118.0	94.0	124.0	104.0	110.0
115.0	108.0	120.0	122.0	88.0	93.0	73.0
118.0	94.0	115.0	83.0	92.0	93.0	103.0
139.0	117.0	85.0	106.0	101.0	92.0	105.0
99.0	123.0	84.0	77.0	121.0	124.0	91.0
131.0	84.0	130.0	80.0	84.0	121.0	81.0
125.0	82.0	91.0	121.0	85.0	90.0	72.0
136.0	89.0	104.0	79.0	111.0	97.0	106.0
117.0	123.0	120.0	108.0	123.0	116.0	102.0
114.0	118.0	115.0	121.0	115.0	111.0	95.0
113.0	85.0	122.0	120.0	111.0	123.0	101.0
138.0	115.0	100.0	78.0	123.0	102.0	109.0
129.0	94.0	76.0	75.0	106.0	81.0	102.0
135.0	95.0	86.0	103.0	93.0	110.0	77.0
125.0	97.0	114.0	121.0	109.0	98.0	75.0
134.0	92.0	97.0	86.0	97.0	92.0	110.0
125.0	85.0	117.0	92.0	100.0	117.0	77.0

Palmillas							
Veh Tipo	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Media	114.59	101.30	100.15	98.90	101.28	103.13	92.89
Mínima	82.00	82.00	75.00	75.00	81.00	80.00	71.00
Máxima	140.00	125.00	130.00	124.00	124.00	125.00	113.00

**Velocidad de operación (km/h) en tramo previo a caseta de cobro
Tepotztlán**

Tepotztlán						
A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
95.0	82.0	111.0	111.0	102.0	125	88.0
102.0	100.0	108.0	84.0	87.0	92	72.0
96.0	88.0	81.0	109.0	106.0	120	71.0
93.0	123.0	92.0	121.0	108.0	124	109.0
98.0	87.0	92.0	80.0	87.0	87	109.0
123.0	125.0	82.0	124.0	107.0	82	77.0
130.0	95.0	106.0	111.0	101.0	122	89.0
113.0	109.0	85.0	96.0	75.0	115	91.0
86.0	113.0	86.0	130.0	95.0	98	74.0
101.0	104.0	83.0	117.0	97.0	110	98.0
90.0	121.0	112.0	103.0	110.0	118	105.0
121.0	108.0	100.0	126.0	87.0	95	91.0
94.0	111.0	105.0	121.0	95.0	106	109.0
83.0	90.0	83.0	118.0	112.0	121	106.0
114.0	121.0	82.0	112.0	94.0	105	96.0
85.0	109.0	82.0	84.0	115.0	95	99.0
130.0	100.0	85.0	103.0	108.0	121	78.0
113.0	108.0	118.0	85.0	100.0	98	88.0
128.0	105.0	95.0	83.0	110.0	123	96.0
105.0	107.0	91.0	114.0	98.0	109	79.0
102.0	92.0	111.0	107.0	111.0	82	78.0
85.0	94.0	90.0	123.0	108.0	111	103.0
127.0	103.0	94.0	84.0	80.0	100	91.0
95.0	91.0	120.0	105.0	90.0	93	93.0
127.0	81.0	93.0	102.0	93.0	101	103.0
128.0	124.0	81.0	82.0	114.0	115	91.0
126.0	108.0	115.0	114.0	109.0	81	87.0
120.0	101.0	101.0	89.0	101.0	88	83.0
118.0	102.0	120.0	81.0	105.0	81	83.0
93.0	84.0	122.0	117.0	107.0	81	79.0
109.0	106.0	81.0	93.0	91.0	113	100.0
91.0	89.0	123.0	78.0	88.0	119	79.0
90.0	117.0	118.0	81.0	94.0	121	104.0
115.0	88.0	83.0	110.0	93.0	108	90.0
102.0	108.0	93.0	94.0	93.0	87	72.0
129.0	124.0	95.0	104.0	81.0	81	77.0
115.0	112.0	116.0	83.0	101.0	86	76.0

125.0	99.0	98.0	96.0	91.0	120	94.0
105.0	109.0	111.0	107.0	96.0	83	74.0
83.0	104.0	110.0	81.0	87.0	110	102.0
115.0	100.0	119.0	92.0	88.0	95	84.0
106.0	102.0	98.0	75.0	91.0	100	86.0
102.0	115.0	81.0	81.0	90.0	84	75.0
81.0	102.0	89.0	87.0	89.0	100	102.0
108.0	100.0	101.0	84.0	102.0	88	87.0
115.0	124.0	109.0	91.0	73.0	78	77.0
110.0	78.0	103.0	96.0	87.0	81	70.0
87.0	107.0	111.0	82.0	88.0	119	104.0
110.0	103.0	108.0	88.0	89.0	94	101.0
94.0	91.0	95.0	111.0	94.0	93	72.0

Tepotztlán							
Veh tipo	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Media	105.23	102.56	98.47	97.82	95.83	100.08	88.05
Min	81.00	78.00	81.00	75.00	73.00	78.00	70.00
Max	130.00	125.00	123.00	130.00	115.00	125.00	109.00

Anexo 4. Datos de aceleración y desaceleración tomados en campo, y datos estadísticos

Aceleración y desaceleración (m/s²) en caseta de cobro Querétaro - Celaya

Aceleración							Desaceleración						
Querétaro - Celaya							Querétaro - Celaya						
A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
3.78	2.27	2.79	2.61	1.31	2.97	2.06	5.81	4.39	3.43	4.12	4.77	4.92	3.51
3.56	1.80	1.54	2.22	2.12	1.25	2.67	5.00	5.69	4.25	5.07	5.40	3.91	3.81
3.96	2.19	2.82	2.99	2.26	2.01	2.44	4.53	4.35	3.57	5.24	3.23	5.86	4.80
2.38	2.19	1.77	2.17	2.85	1.36	1.16	4.64	5.60	3.93	5.22	5.66	5.41	4.29
3.57	2.52	2.97	2.96	1.52	2.36	1.64	4.96	5.29	4.51	5.14	4.53	5.20	4.12
3.21	1.06	1.67	1.63	2.75	2.07	2.60	6.77	5.60	5.53	5.16	3.90	5.48	4.42
3.34	1.96	2.27	2.76	1.64	2.23	2.44	4.21	3.86	4.18	4.33	5.30	3.18	5.51
2.10	2.25	2.35	2.64	2.46	1.57	1.93	4.70	3.70	3.25	5.30	3.57	5.54	3.27
2.10	1.35	2.14	2.81	2.06	2.11	1.60	6.91	4.25	4.52	3.96	5.12	5.54	5.48
3.25	2.23	2.18	2.34	2.38	1.38	1.85	6.74	3.79	4.98	3.21	6.00	4.59	5.48
3.75	1.55	1.89	2.65	2.22	2.35	1.04	4.60	5.47	4.92	5.59	4.70	3.69	5.28
3.25	1.52	2.20	1.77	1.02	2.36	2.17	6.17	4.77	4.30	5.06	3.27	5.73	4.00
2.85	1.86	1.93	1.07	1.42	2.68	2.85	6.26	3.88	3.95	3.15	4.03	5.54	3.53
3.54	1.66	1.29	2.05	2.35	1.80	1.80	5.37	3.92	4.85	3.12	5.62	4.49	5.57
2.72	2.10	1.60	1.50	2.88	2.40	1.24	4.27	4.53	3.29	3.97	3.06	4.11	3.98
3.78	2.90	2.03	2.75	1.39	1.23	1.50	6.12	4.98	4.73	3.88	5.71	5.82	4.14
2.72	2.18	1.27	1.93	1.52	1.99	2.18	6.29	5.91	5.87	5.39	3.83	5.92	4.17
2.94	1.50	2.94	2.03	1.12	2.77	2.85	4.78	3.90	5.28	4.27	3.31	4.55	3.71
2.51	2.09	1.06	1.98	1.05	1.49	2.76	4.50	5.65	3.99	4.36	3.81	5.81	3.82
3.80	1.54	2.40	2.60	1.90	1.05	2.14	4.22	5.01	3.57	3.16	4.33	5.53	5.14
2.17	1.79	1.90	2.45	1.80	1.03	2.03	5.09	3.05	5.20	3.58	4.63	5.76	3.16
3.00	2.70	1.72	2.29	1.84	1.14	1.44	5.75	3.85	3.66	4.92	4.87	4.03	3.04
3.76	1.16	1.86	1.99	1.95	1.56	2.32	5.47	4.52	5.64	5.20	3.17	3.90	5.77
3.72	1.56	1.93	1.32	1.50	2.62	1.77	5.10	3.76	3.40	4.63	5.15	4.07	4.12
3.97	1.38	1.38	2.25	1.05	1.45	1.21	6.27	4.69	5.04	3.17	4.62	3.73	5.08
2.39	1.27	2.95	2.96	2.32	1.46	1.59	4.07	4.67	5.49	4.47	4.32	4.53	4.21
3.48	2.64	1.52	1.75	2.67	1.10	2.52	5.67	3.52	5.36	4.35	5.65	4.29	4.64
3.86	1.90	2.15	1.61	1.24	1.11	1.24	5.04	4.48	5.30	3.12	3.08	3.03	4.41
3.14	2.79	2.43	1.11	1.25	2.75	1.45	5.67	5.28	4.77	5.24	5.68	3.06	4.59
2.21	1.49	2.92	1.59	1.05	1.58	2.92	6.58	3.85	5.64	3.43	4.31	5.10	3.67
3.05	2.96	2.98	2.25	2.06	2.88	2.30	6.51	4.36	5.58	5.38	3.94	4.18	3.07
3.95	1.30	2.99	1.38	2.26	2.05	1.16	4.48	3.55	3.01	4.05	4.66	3.71	4.17
2.54	1.29	1.85	2.48	1.66	1.20	1.80	6.83	4.06	3.38	3.66	5.37	3.03	4.18

3.40	1.48	2.35	2.22	1.54	1.03	1.77	6.98	3.75	5.76	5.94	4.62	5.73	5.46
3.20	2.84	1.71	2.73	1.23	2.66	2.02	4.25	3.09	5.33	5.57	3.53	5.91	4.36
3.44	2.61	2.66	2.40	1.57	1.39	2.55	4.90	5.95	3.44	3.03	5.48	3.98	5.37
2.51	2.33	2.35	2.98	2.23	2.54	1.10	5.02	5.92	3.95	3.80	3.32	3.23	5.85
2.98	2.17	1.45	2.06	2.97	1.73	1.94	5.07	3.66	5.13	5.39	3.26	4.65	4.89
3.49	2.91	2.03	2.57	2.84	1.03	1.10	4.07	5.26	4.94	5.96	3.57	4.17	4.03
3.14	1.70	2.07	1.40	1.69	2.53	1.42	4.69	3.52	3.28	3.69	3.55	3.19	4.38
3.69	1.77	1.02	2.66	2.51	2.27	1.83	4.06	3.27	5.40	5.02	5.44	4.77	3.56
3.34	2.65	1.16	1.49	1.24	1.51	2.57	6.46	3.90	4.48	5.65	5.15	3.92	3.02
3.23	2.88	1.96	1.06	2.33	1.79	2.90	4.77	4.89	3.16	5.55	4.95	4.19	4.54
3.96	1.87	1.18	1.79	2.44	1.61	1.25	4.12	3.21	3.90	5.39	3.99	4.65	4.62
3.12	1.47	2.73	2.92	1.60	1.89	2.48	6.41	4.80	3.37	3.50	3.37	4.17	5.55
2.67	1.32	2.34	2.62	2.50	1.41	2.05	6.17	5.25	4.08	4.74	4.09	4.34	4.69
3.55	1.03	2.16	2.86	1.15	1.46	2.32	5.58	3.81	4.25	3.94	3.27	5.10	4.51
2.16	1.12	1.41	1.23	2.30	2.19	1.35	5.50	4.17	3.38	3.35	4.80	3.77	4.97
2.83	2.40	1.38	2.50	2.76	2.86	2.08	4.11	5.91	5.87	3.04	4.27	4.23	4.00
2.18	2.50	1.49	1.54	1.62	1.89	1.96	6.87	3.76	3.33	4.19	4.01	5.14	4.86

Querétaro - Celaya (Aceleración)							
Veh Tipo	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Media	3.09	1.88	1.94	2.07	1.82	1.77	1.87
Mínima	2.10	1.03	1.02	1.06	1.02	1.03	1.04
Máxima	3.97	2.96	2.99	2.99	2.97	2.97	2.92

Querétaro - Celaya (Desaceleración)							
Veh Tipo	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Media	5.29	4.37	4.34	4.34	4.30	4.48	4.35
Mínima	4.06	3.05	3.01	3.03	3.06	3.03	3.02
Máxima	6.98	5.95	5.87	5.96	6.00	5.92	5.85

Aceleración y desaceleración (m/s²) en caseta de cobro Palmillas

Aceleración							Desaceleración						
Palmillas							Palmillas						
A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
2.24	2.27	2.79	2.61	1.31	2.97	2.06	5.81	4.39	3.43	4.12	4.77	4.92	3.51
2.10	1.80	1.54	2.22	2.12	1.25	2.67	5.00	5.69	4.25	5.07	5.40	3.91	3.81
3.59	2.19	2.82	2.99	2.26	2.01	2.44	4.53	4.35	3.57	5.24	3.23	5.86	4.80
2.47	2.19	1.77	2.17	2.85	1.36	1.16	4.64	5.60	3.93	5.22	5.66	5.41	4.29
2.70	2.52	2.97	2.96	1.52	2.36	1.64	4.96	5.29	4.51	5.14	4.53	5.20	4.12
2.60	1.06	1.67	1.63	2.75	2.07	2.60	6.77	5.60	5.53	5.16	3.90	5.48	4.42
3.06	1.96	2.27	2.76	1.64	2.23	2.44	4.21	3.86	4.18	4.33	5.30	3.18	5.51

3.24	2.25	2.35	2.64	2.46	1.57	1.93	4.70	3.70	3.25	5.30	3.57	5.54	3.27
3.62	1.35	2.14	2.81	2.06	2.11	1.60	6.91	4.25	4.52	3.96	5.12	5.54	5.48
3.53	2.23	2.18	2.34	2.38	1.38	1.85	6.74	3.79	4.98	3.21	6.00	4.59	5.48
2.05	1.55	1.89	2.65	2.22	2.35	1.04	4.60	5.47	4.92	5.59	4.70	3.69	5.28
3.76	1.52	2.20	1.77	1.02	2.36	2.17	6.17	4.77	4.30	5.06	3.27	5.73	4.00
2.21	1.86	1.93	1.07	1.42	2.68	2.85	6.26	3.88	3.95	3.15	4.03	5.54	3.53
2.49	1.66	1.29	2.05	2.35	1.80	1.80	5.37	3.92	4.85	3.12	5.62	4.49	5.57
2.21	2.10	1.60	1.50	2.88	2.40	1.24	4.27	4.53	3.29	3.97	3.06	4.11	3.98
3.61	2.90	2.03	2.75	1.39	1.23	1.50	6.12	4.98	4.73	3.88	5.71	5.82	4.14
3.14	2.18	1.27	1.93	1.52	1.99	2.18	6.29	5.91	5.87	5.39	3.83	5.92	4.17
3.35	1.50	2.94	2.03	1.12	2.77	2.85	4.78	3.90	5.28	4.27	3.31	4.55	3.71
2.93	2.09	1.06	1.98	1.05	1.49	2.76	4.50	5.65	3.99	4.36	3.81	5.81	3.82
2.66	1.54	2.40	2.60	1.90	1.05	2.14	4.22	5.01	3.57	3.16	4.33	5.53	5.14
2.28	1.79	1.90	2.45	1.80	1.03	2.03	5.09	3.05	5.20	3.58	4.63	5.76	3.16
3.12	2.70	1.72	2.29	1.84	1.14	1.44	5.75	3.85	3.66	4.92	4.87	4.03	3.04
3.45	1.16	1.86	1.99	1.95	1.56	2.32	5.47	4.52	5.64	5.20	3.17	3.90	5.77
2.58	1.56	1.93	1.32	1.50	2.62	1.77	5.10	3.76	3.40	4.63	5.15	4.07	4.12
3.59	1.38	1.38	2.25	1.05	1.45	1.21	6.27	4.69	5.04	3.17	4.62	3.73	5.08
2.06	1.27	2.95	2.96	2.32	1.46	1.59	4.07	4.67	5.49	4.47	4.32	4.53	4.21
2.35	2.64	1.52	1.75	2.67	1.10	2.52	5.67	3.52	5.36	4.35	5.65	4.29	4.64
3.29	1.90	2.15	1.61	1.24	1.11	1.24	5.04	4.48	5.30	3.12	3.08	3.03	4.41
3.76	2.79	2.43	1.11	1.25	2.75	1.45	5.67	5.28	4.77	5.24	5.68	3.06	4.59
2.41	1.49	2.92	1.59	1.05	1.58	2.92	6.58	3.85	5.64	3.43	4.31	5.10	3.67
2.89	2.96	2.98	2.25	2.06	2.88	2.30	6.51	4.36	5.58	5.38	3.94	4.18	3.07
3.56	1.30	2.99	1.38	2.26	2.05	1.16	4.48	3.55	3.01	4.05	4.66	3.71	4.17
2.12	1.29	1.85	2.48	1.66	1.20	1.80	6.83	4.06	3.38	3.66	5.37	3.03	4.18
3.30	1.48	2.35	2.22	1.54	1.03	1.77	6.98	3.75	5.76	5.94	4.62	5.73	5.46
2.24	2.84	1.71	2.73	1.23	2.66	2.02	4.25	3.09	5.33	5.57	3.53	5.91	4.36
2.11	2.61	2.66	2.40	1.57	1.39	2.55	4.90	5.95	3.44	3.03	5.48	3.98	5.37
3.70	2.33	2.35	2.98	2.23	2.54	1.10	5.02	5.92	3.95	3.80	3.32	3.23	5.85
2.88	2.17	1.45	2.06	2.97	1.73	1.94	5.07	3.66	5.13	5.39	3.26	4.65	4.89
2.02	2.91	2.03	2.57	2.84	1.03	1.10	4.07	5.26	4.94	5.96	3.57	4.17	4.03
3.21	1.70	2.07	1.40	1.69	2.53	1.42	4.69	3.52	3.28	3.69	3.55	3.19	4.38
2.01	1.77	1.02	2.66	2.51	2.27	1.83	4.06	3.27	5.40	5.02	5.44	4.77	3.56
3.15	2.65	1.16	1.49	1.24	1.51	2.57	6.46	3.90	4.48	5.65	5.15	3.92	3.02
3.63	2.88	1.96	1.06	2.33	1.79	2.90	4.77	4.89	3.16	5.55	4.95	4.19	4.54
2.76	1.87	1.18	1.79	2.44	1.61	1.25	4.12	3.21	3.90	5.39	3.99	4.65	4.62
2.59	1.47	2.73	2.92	1.60	1.89	2.48	6.41	4.80	3.37	3.50	3.37	4.17	5.55
2.47	1.32	2.34	2.62	2.50	1.41	2.05	6.17	5.25	4.08	4.74	4.09	4.34	4.69
2.74	1.03	2.16	2.86	1.15	1.46	2.32	5.58	3.81	4.25	3.94	3.27	5.10	4.51
3.25	1.12	1.41	1.23	2.30	2.19	1.35	5.50	4.17	3.38	3.35	4.80	3.77	4.97

2.73	2.40	1.38	2.50	2.76	2.86	2.08	4.11	5.91	5.87	3.04	4.27	4.23	4.00
3.35	2.50	1.49	1.54	1.62	1.89	1.96	6.87	3.76	3.33	4.19	4.01	5.14	4.86

Palmillas (Aceleración)							
Veh Tipo	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Media	2.81	1.88	1.94	2.07	1.82	1.77	1.87
Mínima	2.01	1.03	1.02	1.06	1.02	1.03	1.04
Máxima	3.76	2.96	2.99	2.99	2.97	2.97	2.92

Palmillas (Desaceleración)							
Veh Tipo	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Media	5.29	4.37	4.34	4.34	4.30	4.48	4.35
Mínima	4.06	3.05	3.01	3.03	3.06	3.03	3.02
Máxima	6.98	5.95	5.87	5.96	6.00	5.92	5.85

Aceleración y desaceleración (m/s²) en caseta de cobro Tepetzotlán

Aceleración							Desaceleración						
Tepetzotlán							Tepetzotlán						
A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
2.53	2.29	2.24	2.57	1.78	1.22	1.01	6.55	5.94	4.27	5.75	5.26	3.09	5.78
3.44	2.42	1.15	2.76	1.48	1.22	1.21	5.37	5.64	3.03	5.21	5.01	5.93	3.24
2.17	2.68	1.01	1.82	1.64	2.88	1.80	4.35	5.91	5.31	5.66	4.57	4.59	3.40
2.15	2.00	1.77	1.95	1.65	1.50	1.59	5.95	5.41	4.14	5.15	5.51	5.44	3.71
3.99	2.76	2.25	1.31	2.09	1.99	2.07	4.22	4.61	5.90	4.42	5.57	3.56	4.05
3.45	2.54	1.87	2.41	2.52	2.52	2.40	5.77	3.73	5.40	4.65	4.10	5.40	3.08
2.70	1.07	1.27	1.59	2.95	1.52	1.18	6.15	3.04	3.58	4.67	3.35	5.07	5.09
3.55	1.32	1.19	1.75	1.38	2.04	2.35	4.66	5.92	3.46	3.06	5.52	5.97	4.42
3.58	1.56	1.04	2.01	1.00	2.65	1.11	5.04	3.61	5.10	5.75	3.24	3.13	4.08
2.65	1.93	1.32	1.80	2.77	1.86	1.13	5.18	5.23	3.37	5.25	4.97	3.64	5.57
2.85	2.02	1.60	2.99	2.64	2.64	2.26	4.10	5.11	4.54	5.37	4.32	3.53	4.88
3.92	2.33	1.67	2.35	2.67	1.47	2.04	4.33	4.22	3.83	5.42	5.83	3.14	3.87
2.53	2.18	2.05	2.52	2.35	1.91	1.17	6.76	4.50	5.03	3.85	4.26	3.20	4.68
3.69	1.05	2.47	1.95	1.16	2.96	1.51	6.95	5.73	5.45	4.69	4.21	4.89	5.11
3.05	2.71	2.21	1.74	1.33	1.75	1.66	6.27	3.50	3.64	5.42	3.77	3.63	5.89
2.12	2.95	1.95	2.18	2.07	1.34	1.55	4.02	5.02	5.55	5.41	4.07	4.26	4.58
3.16	1.44	2.03	2.37	1.28	1.32	2.56	4.81	4.23	4.24	5.06	3.20	3.92	5.17
3.58	2.12	1.57	2.18	1.57	2.00	2.83	4.52	3.49	3.69	3.92	5.27	3.55	5.32
3.77	1.20	2.75	2.19	1.18	2.79	1.74	6.15	5.71	5.17	5.04	5.18	5.01	3.05
2.32	2.85	1.74	1.64	2.71	1.47	2.65	4.93	5.24	5.06	4.56	4.16	4.13	4.99
2.89	2.70	2.58	1.03	2.66	1.19	1.57	4.39	4.94	5.54	4.71	3.57	4.37	3.91
3.62	1.39	2.30	2.60	1.07	1.61	1.90	4.06	3.66	3.36	5.47	5.03	3.84	4.71

3.85	1.78	2.25	2.44	2.31	2.90	1.36	6.02	3.57	4.37	3.82	4.08	3.94	5.02
2.68	2.60	1.45	1.99	2.99	1.01	2.85	4.04	5.13	3.92	3.50	4.87	5.19	3.76
3.47	1.41	2.48	1.10	1.50	2.35	2.99	5.73	5.68	5.48	5.37	4.77	4.01	5.94
2.06	2.58	1.85	2.56	1.15	1.50	2.85	4.90	4.33	3.11	4.55	5.67	4.99	4.65
3.99	1.39	1.70	1.68	1.35	1.08	1.19	6.12	5.43	3.84	4.02	4.28	5.09	5.13
3.79	1.06	2.74	1.16	2.82	1.60	2.57	6.46	3.78	4.09	4.00	4.78	3.63	3.69
2.93	1.97	1.76	1.61	1.97	2.01	2.46	4.64	4.51	4.75	3.23	5.19	3.51	5.40
3.58	1.77	2.34	2.94	1.78	2.51	1.32	5.80	5.50	4.34	5.90	4.35	5.82	3.66
3.20	2.38	1.65	1.38	1.55	1.50	1.61	5.20	3.10	4.49	5.90	3.34	4.19	5.24
3.05	2.36	1.83	1.53	1.90	1.78	1.37	6.81	4.55	5.35	5.31	3.64	4.99	3.94
2.78	1.90	2.88	1.12	2.32	2.22	1.46	6.03	3.65	3.40	5.85	3.15	5.10	4.84
3.58	2.88	1.66	1.75	2.77	1.10	2.88	5.01	5.71	3.42	5.45	4.75	3.18	4.53
2.21	2.09	1.17	1.98	2.82	2.70	2.39	5.56	4.62	5.45	5.67	4.00	3.51	5.23
3.60	1.17	1.10	1.53	2.07	2.40	1.20	5.98	4.74	5.57	3.13	4.96	3.09	5.25
2.06	1.57	2.48	1.67	2.10	1.97	1.79	6.46	3.90	5.15	4.24	4.49	3.38	4.98
2.92	1.12	1.39	1.57	1.87	1.08	1.26	4.43	5.55	3.17	5.70	3.47	4.88	3.55
3.83	1.60	1.31	1.70	2.87	1.54	1.11	5.96	4.42	5.05	3.41	3.01	5.33	3.23
3.70	2.42	1.59	1.36	2.87	1.68	1.35	6.17	3.47	3.49	5.86	4.80	3.96	4.01
2.83	2.99	1.26	1.59	1.26	1.96	2.59	5.01	4.25	4.69	5.59	5.66	3.52	3.77
2.31	1.56	1.13	2.19	2.39	1.86	2.09	5.87	5.07	3.50	4.06	3.13	3.91	5.36
2.57	1.89	1.02	1.33	1.57	1.03	2.44	6.68	4.21	4.54	3.53	5.48	3.67	4.02
2.88	2.66	1.78	2.70	2.27	2.69	1.95	5.44	4.26	4.35	5.66	4.39	3.35	3.56
2.74	2.86	2.66	2.49	2.95	1.28	2.31	4.62	4.94	4.70	5.31	3.95	5.71	3.03
2.86	2.37	1.90	1.57	2.63	1.41	2.60	5.90	5.06	5.88	5.62	5.77	3.55	5.88
2.14	2.14	2.24	2.31	1.78	2.83	2.14	5.22	3.24	4.39	4.65	3.90	5.52	4.01
3.16	1.72	1.16	2.61	1.17	2.06	1.01	6.32	5.20	4.22	4.07	5.52	5.85	5.67
3.75	1.72	2.54	2.16	2.88	1.21	2.84	6.41	5.76	4.24	3.89	4.33	3.58	4.39
3.08	2.85	2.22	2.71	2.38	2.52	2.16	5.58	5.23	5.14	3.12	3.43	5.01	5.03

Tepotztlán (Aceleración)							
Veh Tipo	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Media	3.01	1.96	1.75	1.90	1.94	1.78	1.81
Mínima	2.06	1.05	1.01	1.03	1.00	1.01	1.01
Máxima	3.99	2.99	2.88	2.97	2.99	2.96	2.81

Tepotztlán (Desaceleración)							
Veh Tipo	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Media	5.39	4.59	4.38	4.69	4.39	4.20	4.15
Mínima	4.02	3.04	3.03	3.06	3.01	3.09	3.03
Máxima	6.95	5.94	5.90	5.93	5.95	5.97	5.68

Anexo 5. Tiempos de transacción tomados en campo y datos estadísticos

Tiempos de transacción (s) en caseta de cobro Querétaro - Celaya

Querétaro - Celaya							Querétaro - Celaya						
Caseta de cobro normal							Sistema IAVE						
A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
7.1	11.5	13.1	9.3	14.9	16.7	13.3	2.3	3.1	3.6	3.0	3.5	3.5	4.4
7.4	12.9	10.0	9.0	8.7	13.3	11.4	3.1	3.2	3.0	3.0	3.6	3.9	4.0
5.2	14.7	7.8	13.2	8.2	9.3	14.3	2.7	3.4	3.7	3.4	3.8	3.7	4.4
12.0	10.8	10.3	8.4	11.3	14.4	15.3	2.9	3.9	3.4	3.2	4.0	3.8	5.5
5.6	8.8	7.2	13.0	12.3	14.5	20.7	4.0	3.1	3.7	3.6	3.9	3.2	3.5
7.5	13.5	14.1	13.0	13.3	15.6	13.6	3.7	3.9	3.2	3.3	3.8	3.5	4.2
6.1	12.2	10.8	10.7	11.5	16.0	17.1	2.7	3.0	3.7	3.1	3.6	3.3	5.9
6.4	7.7	8.4	12.5	12.2	15.9	20.7	2.3	3.0	3.4	3.4	3.7	3.6	5.7
9.9	14.0	7.3	7.3	16.9	14.8	19.3	2.7	4.0	3.8	3.9	3.4	3.4	5.3
8.7	11.1	9.9	8.0	11.9	12.8	15.2	3.6	3.2	3.3	3.7	3.9	3.2	4.0
10.9	10.4	10.6	13.9	16.1	16.2	17.7	2.8	3.7	2.9	3.4	3.6	3.2	4.4
8.1	7.0	9.3	11.2	13.2	13.3	17.9	2.2	3.2	3.5	3.5	4.0	3.9	3.1
9.1	11.3	9.8	12.3	13.2	16.9	18.0	3.2	3.6	3.2	3.9	3.1	3.4	4.4
5.6	13.6	13.1	10.3	16.3	8.4	14.2	2.4	4.0	4.0	3.7	3.7	3.6	4.5
6.3	10.2	8.3	9.2	15.0	16.8	20.6	3.3	3.6	3.6	3.9	3.4	3.6	3.1
12.3	9.8	12.4	10.8	10.0	11.2	18.7	3.5	3.3	3.1	3.1	4.0	3.1	4.5
12.8	8.5	13.4	12.0	11.1	12.2	16.8	3.2	3.9	3.2	3.6	3.2	3.4	3.5
7.7	9.7	12.9	14.2	14.5	8.2	12.3	2.4	3.8	3.5	3.8	3.4	3.4	4.8
5.2	7.5	14.9	10.2	15.7	8.5	18.1	3.6	3.2	3.8	3.8	3.4	3.6	5.3
9.1	14.0	10.4	13.8	11.5	11.3	13.0	2.6	3.6	3.6	3.5	3.4	3.6	4.8
9.0	10.3	15.0	7.4	11.3	10.3	12.3	2.0	4.0	4.0	3.9	3.1	3.8	4.3
5.6	8.1	11.3	10.6	12.8	15.0	16.6	2.9	3.6	3.5	4.0	3.1	3.5	4.1
6.9	9.9	8.3	14.8	12.9	8.3	13.4	3.1	3.8	3.2	3.6	3.0	3.3	5.6
10.9	13.3	9.3	7.0	8.7	10.9	15.2	2.1	3.2	3.3	3.6	3.9	3.7	5.4
7.3	10.7	14.5	10.2	14.8	14.3	12.9	2.3	3.7	3.0	4.0	3.5	3.5	3.4
8.6	12.5	9.4	10.4	12.7	10.4	12.9	2.8	3.1	3.2	3.5	3.2	3.3	3.5
12.7	13.1	14.7	12.0	16.9	14.9	12.7	3.5	4.0	3.8	3.5	3.8	3.8	4.7
5.1	13.9	12.6	14.5	15.3	9.0	15.6	3.3	3.8	3.8	3.4	3.9	3.8	3.3
6.5	10.8	13.8	13.8	14.8	13.6	13.7	3.7	3.3	3.5	3.2	3.7	3.3	3.6
5.5	13.7	11.1	11.2	16.4	10.3	18.0	3.8	3.5	3.7	3.3	3.3	3.0	3.5
9.4	9.9	14.7	7.5	9.1	13.1	18.2	3.7	3.6	3.5	3.5	4.0	3.5	5.4
10.3	7.7	7.9	9.4	14.7	15.6	18.1	3.2	3.2	3.9	3.7	3.1	3.1	4.4
11.8	7.7	11.3	10.0	12.0	10.3	20.7	2.8	3.3	4.0	3.9	3.1	3.7	4.9
11.4	7.7	13.8	14.3	9.0	15.3	11.4	2.5	3.2	3.8	3.7	3.1	4.0	4.1

6.0	10.3	14.2	12.2	8.4	16.2	20.5	2.6	3.1	3.9	3.6	3.4	3.7	5.4
8.1	14.7	13.5	11.6	14.5	12.2	15.5	3.0	3.3	3.9	3.7	3.2	3.2	4.2
8.7	12.1	11.9	13.8	16.8	16.7	10.3	2.9	3.2	3.1	3.0	3.9	3.7	3.8
8.5	10.2	10.2	12.6	8.1	16.2	17.2	2.8	3.0	3.1	3.3	3.3	3.8	3.2
5.0	10.0	7.8	10.0	15.0	15.8	17.8	3.5	3.7	3.0	3.8	3.7	3.1	6.0
12.2	9.6	10.1	12.3	15.9	11.7	11.0	2.5	3.8	3.1	4.3	3.2	3.0	4.5
12.8	7.4	11.5	7.5	9.6	16.9	18.1	2.9	3.8	3.2	3.8	3.7	3.9	3.4
10.1	10.6	12.5	11.7	13.0	16.3	18.4	3.9	3.3	4.0	3.3	3.7	3.4	3.2
7.3	9.6	8.0	7.9	9.4	9.6	18.5	3.7	2.9	3.5	3.8	3.8	3.1	3.9
9.3	12.5	14.2	8.7	9.1	13.9	15.1	3.5	3.7	2.8	3.1	3.2	3.2	3.2
12.4	13.5	12.9	13.1	15.1	12.7	11.1	3.5	3.6	3.9	3.1	3.6	3.7	4.1
11.2	7.6	10.6	11.2	11.4	12.4	18.7	3.3	3.0	3.1	3.2	3.1	3.2	5.7
7.9	8.4	7.2	7.2	14.6	10.6	15.9	2.8	3.2	3.6	3.8	3.4	3.4	4.7
11.7	10.4	14.4	7.8	9.9	10.1	18.0	3.7	3.2	3.2	3.6	3.3	4.5	5.8
5.7	10.3	8.4	8.2	15.7	8.6	12.5	3.0	3.6	3.7	3.1	3.7	3.2	3.7
8.3	13.6	10.4	12.4	9.2	11.9	17.1	2.1	3.3	3.7	3.2	3.3	3.8	5.2
10.1	11.0	12.4	13.1	9.6	11.4	18.4	2.1	4.0	3.2	3.2	3.8	3.5	3.4

Querétaro – Celaya (MTC)							
Veh Tipo	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Media	8.28	10.57	10.95	10.67	12.34	12.65	15.68
Mínima	5.03	7.00	7.22	7.01	8.06	8.16	10.29
Máxima	12.81	14.73	14.96	14.77	16.92	16.95	20.70

Querétaro – Celaya (ETC)							
Veh Tipo	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Media	2.94	3.44	3.46	3.50	3.51	3.49	4.30
Mínima	2.02	2.85	2.78	2.99	3.02	3.03	3.14
Máxima	3.97	4.02	4.00	4.25	4.00	4.50	5.98

Tiempos de transacción (s) en caseta de cobro Palmillas

Caseta de cobro normal							Sistema IAVE						
A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
8.6	9.4	8.5	9.8	14.9	9.7	10.1	3.0	3.1	4.4	4.2	2.5	3.7	3.3
8.5	8.7	8.9	9.9	8.9	10.8	13.0	2.3	4.6	4.1	2.4	4.1	4.2	2.2
7.5	8.6	9.0	9.1	13.6	9.8	15.0	2.1	4.1	4.6	2.8	4.5	2.4	2.8
7.5	12.5	7.1	9.7	8.6	10.6	9.3	3.5	3.6	3.7	2.4	3.1	3.0	2.8
8.5	8.2	9.3	7.6	12.8	10.4	14.2	3.8	4.8	3.7	3.1	2.2	2.4	3.9
7.7	9.0	8.0	9.2	8.0	8.6	14.0	2.0	2.5	4.5	4.4	2.9	4.9	4.6
9.2	8.8	8.0	8.4	13.5	10.6	12.5	3.4	2.1	4.8	3.1	3.4	3.0	3.4
9.9	9.5	9.5	9.1	14.9	13.0	13.0	2.0	2.2	3.1	3.9	4.0	4.1	2.7

6.0	7.3	8.0	9.7	8.5	8.4	12.3	3.8	4.6	2.3	2.5	3.2	3.9	2.2
5.2	12.3	7.3	7.5	14.0	10.1	11.6	4.0	4.6	2.9	4.0	4.9	2.8	2.6
5.9	8.9	8.8	9.6	14.2	8.1	12.3	2.2	2.5	3.9	3.9	2.7	3.7	4.5
10.7	9.9	9.2	7.7	10.3	12.4	14.5	3.1	3.9	2.3	3.7	5.0	5.0	3.0
5.8	9.5	8.9	7.7	8.8	10.8	13.7	3.3	3.6	2.5	3.3	4.5	2.1	3.7
11.5	7.7	7.4	10.2	8.6	10.5	13.6	2.7	2.8	4.4	3.4	4.5	4.2	3.1
5.5	7.8	9.3	9.2	9.9	9.3	14.4	3.3	4.7	3.7	3.3	2.5	4.5	4.2
5.2	10.0	9.2	9.6	8.0	11.5	14.1	2.7	2.4	4.9	4.9	3.0	4.3	3.7
5.3	7.8	7.2	8.4	10.9	8.6	9.3	3.0	3.8	3.0	3.7	3.3	4.0	2.4
6.0	9.9	8.2	9.3	14.5	10.9	9.1	3.8	4.9	4.4	3.6	2.3	5.0	3.5
7.0	8.7	7.9	8.0	8.9	12.6	10.5	2.5	2.6	2.8	4.3	4.3	4.5	2.5
5.1	9.9	10.0	9.5	8.8	12.2	12.8	3.8	4.2	2.7	2.9	4.6	2.5	3.8
6.6	7.7	8.4	7.4	8.9	8.7	12.7	2.2	3.1	3.0	3.4	2.4	4.9	4.3
7.5	8.7	7.4	9.8	12.4	8.7	10.4	2.6	4.0	2.5	3.0	2.7	2.9	2.8
6.2	9.5	7.2	7.3	13.1	12.9	10.3	3.8	4.0	2.6	2.0	3.3	4.2	3.9
12.0	8.2	9.3	8.8	11.4	12.0	10.8	2.3	2.7	3.8	2.4	2.8	2.3	2.6
8.1	8.7	9.3	8.7	10.4	8.7	9.5	2.6	2.5	4.3	2.8	3.2	3.2	3.8
9.4	7.4	7.1	8.7	11.9	7.6	12.9	2.9	2.1	3.0	3.1	3.6	2.2	2.5
6.9	8.2	7.8	9.1	14.0	8.1	10.4	2.9	3.4	4.1	3.4	2.8	4.1	2.2
6.0	9.7	9.5	9.7	13.3	9.1	12.0	2.8	4.6	3.6	4.8	2.1	4.7	2.7
6.2	8.4	8.1	9.8	11.2	13.3	9.3	3.7	2.7	4.5	4.9	3.5	4.5	2.4
7.4	7.7	9.3	9.9	11.6	10.0	13.0	2.3	4.1	3.4	4.3	2.3	4.1	3.6
8.6	9.6	7.8	8.0	12.5	8.5	14.1	2.2	2.7	4.5	3.0	3.4	2.4	5.0
8.9	9.2	9.8	7.5	14.2	12.6	12.6	2.7	2.4	4.2	3.2	4.6	5.0	2.4
6.4	9.4	9.7	9.4	10.7	10.3	9.2	2.7	2.3	4.2	3.0	3.7	2.3	3.0
8.7	8.6	7.6	8.4	12.2	11.6	9.8	3.2	3.5	4.5	4.0	3.2	3.2	4.9
8.7	9.7	7.8	9.6	8.0	14.4	14.1	3.5	4.9	4.3	3.4	3.1	3.1	3.7
7.4	9.7	9.5	8.4	12.4	8.0	14.7	3.3	2.3	4.5	3.0	4.0	2.3	3.3
7.1	7.3	9.9	7.1	13.8	11.2	13.2	2.8	2.2	4.6	4.5	3.4	2.6	2.5
10.7	9.7	9.7	9.4	11.7	14.2	11.0	3.6	2.1	2.2	3.4	4.6	4.6	4.2
10.9	7.5	8.9	7.2	8.4	12.2	10.3	2.7	3.6	4.1	4.4	3.6	4.7	5.0
5.0	9.6	8.1	9.4	8.5	8.4	13.8	2.2	4.8	2.1	4.9	2.1	3.1	2.5
8.7	8.2	10.2	8.7	13.2	8.0	13.6	2.2	3.4	4.0	2.8	3.4	4.2	4.1
7.6	9.9	10.7	8.7	7.5	9.4	9.9	3.9	5.0	4.5	2.2	3.3	3.9	2.3
5.6	9.7	9.8	7.8	11.4	8.0	14.4	3.2	4.7	4.4	2.5	2.0	3.3	4.4
7.9	9.6	8.9	8.3	9.0	12.5	11.4	2.3	4.9	3.7	2.9	2.9	4.0	3.0
6.9	9.8	8.8	10.2	13.7	7.6	14.2	3.3	2.1	2.1	4.3	3.1	5.0	4.3
6.6	9.8	8.9	14.0	10.6	15.2	13.6	3.9	2.2	3.5	2.2	4.9	2.8	2.6
7.1	8.2	9.9	7.6	12.8	9.5	14.0	3.9	4.3	3.5	3.5	4.4	2.9	3.9
9.5	9.1	14.2	12.2	10.0	12.6	17.2	2.6	2.7	2.4	4.6	4.7	3.9	2.3
9.2	8.4	9.1	10.3	14.3	8.4	15.2	3.2	3.3	3.0	4.0	2.5	4.3	2.2

7.2	8.9	7.3	10.0	14.0	10.8	14.3	3.0	4.5	4.2	4.6	3.4	3.8	2.0
11.6	9.7	9.2	9.1	9.7	10.2	13.4	3.8	3.7	4.4	2.1	3.8	3.7	2.9

Palmillas (MTC)							
Veh Tipo	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Media	7.49	8.96	8.73	8.94	11.09	10.24	12.29
Mínima	5.00	7.25	7.14	7.14	7.50	7.55	9.14
Máxima	11.99	12.50	14.20	14.02	14.94	15.20	17.20

Palmillas (ETC)							
Veh Tipo	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Media	2.72	3.31	3.15	3.22	3.45	3.54	4.02
Mínima	1.75	2.05	2.13	2.02	2.00	2.14	2.03
Máxima	3.98	4.99	4.93	4.92	4.97	4.99	4.99

Tiempos de transacción (s) en caseta de cobro Tepotzotlán

Tepotzotlán							Tepotzotlán						
Caseta de cobro normal							Sistema IAVE						
A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
8.1	14.0	11.2	8.8	11.4	14.4	18.8	2.4	3.6	3.8	3.5	3.1	3.4	5.0
5.6	14.6	13.4	11.7	15.4	9.0	14.2	2.8	3.9	3.2	3.8	3.1	3.5	5.9
11.6	7.5	10.9	10.6	12.4	14.2	16.9	3.5	3.2	3.1	3.3	3.4	3.6	5.3
7.5	9.4	13.3	14.4	8.7	14.5	12.2	2.5	3.7	3.7	3.6	3.8	3.9	5.4
12.6	8.4	14.1	14.8	11.7	16.8	19.7	3.4	3.1	3.1	3.1	3.5	3.5	4.8
7.7	11.1	11.9	14.6	13.2	8.1	16.0	3.7	2.9	3.7	3.1	3.8	3.1	4.2
5.5	12.8	9.2	12.5	10.6	13.1	20.3	2.8	3.2	3.6	3.3	3.6	3.1	4.0
12.6	12.1	12.5	12.9	14.4	14.7	12.7	2.7	3.1	3.9	3.4	3.6	3.5	4.5
10.2	7.1	10.4	11.8	16.0	12.2	16.7	2.7	3.6	3.3	3.5	3.5	3.3	4.4
6.8	11.8	8.2	7.5	14.6	15.6	15.4	2.4	3.9	3.7	3.9	3.5	3.0	4.4
6.6	8.6	10.8	9.8	14.4	11.8	12.5	2.2	3.6	3.8	3.5	4.0	3.8	4.5
9.3	9.8	8.6	11.2	12.5	15.3	13.3	3.2	3.4	3.7	4.0	3.2	3.5	5.6
12.5	11.2	8.4	14.3	8.6	9.5	19.2	3.7	3.7	3.7	3.8	3.5	3.4	5.8
8.7	8.3	9.4	11.2	9.3	13.9	17.2	3.4	3.5	3.9	3.5	4.0	3.1	4.2
5.3	8.2	11.5	14.8	13.6	12.0	12.4	2.3	3.8	3.7	3.7	3.7	3.4	5.7
9.7	12.6	14.9	11.6	14.0	16.6	18.5	2.4	3.2	3.0	3.8	3.9	3.6	3.8
10.8	7.4	11.2	11.5	15.0	17.0	16.7	2.4	3.4	3.9	3.3	3.6	3.0	4.1
10.3	12.6	11.3	14.7	9.1	11.4	11.8	3.9	3.6	3.0	3.2	3.6	3.2	6.0
10.9	7.0	12.0	12.5	11.3	14.4	13.3	2.3	3.0	3.1	3.6	3.2	3.6	4.6
8.8	14.2	9.3	8.8	12.7	14.8	17.0	2.2	3.5	3.2	3.6	3.2	3.6	3.9
6.8	7.5	13.7	14.0	12.8	16.0	17.7	3.6	3.6	3.2	3.1	3.5	3.2	5.9
5.7	14.9	14.7	11.1	12.5	15.1	15.7	3.1	3.8	3.2	3.4	3.5	4.0	4.1
12.9	14.1	7.9	12.7	16.3	8.3	17.7	2.7	3.3	3.8	3.6	3.7	3.1	4.3

12.3	7.1	14.6	11.6	14.0	12.5	11.4	3.6	3.7	3.4	4.0	3.4	3.8	3.2
7.1	13.7	14.2	12.3	16.1	16.9	12.7	2.2	4.0	3.6	3.5	3.8	3.9	5.5
8.3	8.7	12.1	14.1	8.9	10.9	17.0	2.9	3.1	3.5	3.4	3.1	4.0	5.8
11.8	9.5	8.8	7.5	11.1	10.4	14.0	2.7	3.1	3.7	4.0	3.1	3.2	4.7
11.3	11.6	8.3	14.1	11.6	13.1	12.3	3.6	3.8	3.8	3.1	3.8	4.0	5.5
8.7	12.7	11.2	11.7	16.6	14.3	15.4	3.5	3.1	3.0	3.6	3.7	3.8	3.6
6.9	7.2	12.5	11.6	11.3	16.7	11.0	3.9	4.0	3.4	3.0	3.8	3.6	4.0
12.0	12.6	12.8	14.1	9.9	15.3	14.5	2.5	3.5	3.4	3.0	3.2	3.2	4.5
5.5	10.7	9.3	8.3	13.4	10.2	19.6	2.1	4.0	3.0	3.1	3.2	3.8	4.5
9.9	8.8	8.5	10.1	13.5	9.4	19.6	2.5	3.5	3.7	3.6	3.5	3.8	3.3
6.1	7.1	10.5	9.2	9.0	11.0	16.9	2.2	3.5	3.8	3.3	3.2	3.8	4.5
9.1	10.5	12.9	11.4	16.1	12.8	12.5	2.7	3.5	4.0	3.8	3.9	3.6	3.6
7.2	7.3	9.8	7.8	13.6	11.6	12.9	3.3	3.0	3.8	3.3	3.7	3.2	3.2
5.9	11.8	13.5	9.8	12.3	14.7	14.9	2.4	3.9	3.9	3.4	3.6	3.4	5.2
7.6	7.1	9.1	12.4	11.9	8.5	17.3	3.6	3.0	3.2	3.7	3.9	3.7	4.7
9.1	12.1	14.9	10.9	15.7	8.8	20.2	3.6	3.8	3.8	3.3	4.7	4.5	5.1
10.5	8.4	8.6	12.9	8.3	10.0	10.8	3.5	3.9	3.9	3.3	4.1	3.8	6.0
10.9	7.2	12.4	14.1	9.8	14.0	17.7	2.7	3.6	4.3	3.3	3.4	4.2	3.8
9.0	9.5	11.0	10.7	8.4	8.5	12.0	3.9	3.5	3.4	3.2	3.6	3.2	4.5
5.9	12.9	12.4	8.3	16.8	14.7	14.7	2.5	4.0	4.0	3.8	3.0	3.1	4.0
11.1	10.0	10.2	13.3	14.7	12.8	10.6	2.3	3.7	3.9	4.0	3.2	4.0	4.6
8.3	8.2	13.2	14.4	16.7	11.6	12.4	3.7	3.1	3.2	3.1	3.8	3.8	3.9
7.8	12.1	12.6	14.9	8.8	11.9	20.3	3.5	4.0	3.6	3.7	3.4	3.6	4.4
6.9	7.8	13.4	14.4	14.2	9.4	13.3	3.2	3.9	3.6	3.7	3.9	3.2	3.2
9.5	11.1	14.1	7.4	12.5	8.5	20.9	2.9	3.7	3.7	3.2	3.2	3.9	3.6
12.8	14.5	13.2	10.6	16.2	12.9	15.0	2.8	4.0	3.5	3.7	3.2	3.3	3.3
7.7	9.5	10.1	8.7	14.0	13.7	20.6	3.8	3.9	3.4	3.7	3.1	3.9	4.3
11.1	14.7	10.0	10.2	13.8	10.6	11.7	3.7	3.2	3.2	4.0	3.3	3.5	4.3

Tepozotlán MTC							
Veh Tipo	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Media	8.66	10.07	11.24	11.43	12.48	12.34	15.16
Mínima	5.34	7.01	7.87	7.35	8.27	8.10	10.57
Máxima	12.89	14.86	14.95	14.90	16.78	16.99	20.91

Tepozotlán ETC							
Veh Tipo	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
Media	2.72	3.52	3.15	3.22	3.45	3.53	4.02
Mínima	1.75	2.90	3.01	3.04	3.00	3.03	3.17
Máxima	3.91	3.98	4.30	3.99	4.70	4.50	5.99

Anexo 6. Emisiones contaminantes por tipo de vehículo de acuerdo a normativa europea

Normativa europea sobre emisiones contaminantes para autos

Tipo	Fecha	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM
Diésel						
Euro 1	Julio de 1992	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	0.14 (0.18)
Euro 2, IDI	Enero de 1996	1.0	-	0.7	-	0.08
Euro 2, DI	Enero de 1998	1.0	-	0.9	-	0.10
Euro 3	Enero de 2000	0.64	-	0.56	0.50	0.05
Euro 4	Enero de 2005	0.50	-	0.30	0.25	0.025
Euro 5	Septiembre de 2009	0.50	-	0.23	0.18	0.005
Euro 6	Septiembre de 2014	0.50	-	0.17	0.08	0.005
Gasolina						
Euro 1	Julio de 1992	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	-
Euro 2	Enero de 1996	2.2	-	0.5	-	-
Euro 3	Enero de 2000	2.30	0.20	-	0.15	-
Euro 4	Enero de 2005	1.0	0.10	-	0.08	-
Euro 5	Septiembre de 2009	1.0	0.10	-	0.06	0.005 ^b
Euro 6	Septiembre de 2014					

Normativa europea sobre emisiones contaminantes para camiones

Tipo	Fecha	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM
Diésel						
Euro 1	Octubre de 1994	6.9	-	1.7	-	0.25
Euro 2, IDI	Enero de 1998	1.5	-	1.2	-	0.17
Euro 2, DI	Enero de 1998	1.5	-	1.6	-	0.20
Euro 3	Enero de 2001	0.95	-	0.86	0.78	0.10
Euro 4	Enero de 2006	0.95	-	0.46	0.39	0.06
Euro 5	Septiembre de 2010	0.74	-	0.3505	0.280	0.005
Euro 6	Septiembre de 2015	0.74	-	0.350	0.280	0.005
Gasolina						
Euro 1	Octubre de 1994	6.9	-	1.7	-	-
Euro 2	Enero de 1998	5.0	-	0.8	-	-
Euro 3	Enero de 2001	5.22	0.29	-	0.21	-
Euro 4	Enero de 2006	2.27	0.16	-	0.11	-
Euro 5	Septiembre de 2010	2.27	0.16	-	0.082	0.005
Euro 6						

Normativa europea sobre emisiones contaminantes para camiones pesados y autobuses

Tipo	Fecha	Ciclo de ensayos	CO	HC	NOx	PM	Humo
Euro I	1992, < 85 kW	ECE R-49	4.5	1.1	8.0	0.612	
	1992, > 85 kW		4.5	1.1	8.0	0.36	
Euro II	Oct. 1996		4.0	1.1	7.0	0.25	
	Oct. 1998		4.0	1.1	7.0	0.15	
Euro III	Oct. 1999 <i>Sólo EEVs</i>	ESC & ELR	1.5	0.25	2.0	0.02	0.15
	Oct. 2000	ESC & ELR	2.1	0.66	5.0	0.10 0.13	0.8
Euro IV	Oct. 2005		1.5	0.46	3.5	0.02	0.5
Euro V	Oct. 2008		1.5	0.46	2.0	0.02	0.5

Anexo 7. Tiempos de viaje en Querétaro-Celaya, Palmillas y Tepetzotlán

Tiempo total de viaje (h) en caseta de cobro Querétaro – Celaya y Tepetzotlán, días típicos

Tiempo total de viaje Querétaro-Celaya			
Sistema	MTC	ETC	FFT
Tiempo total de viaje A	117.80	34.55	22.36
Tiempo total de viaje B	100.09	46.74	27.36
Tiempo total de viaje C2	7.15	2.39	2.30
Tiempo total de viaje C3	6.99	1.33	1.27
Tiempo total de viaje T3S2	8.13	2.62	2.12
Tiempo total de viaje T3S3	4.60	1.57	1.17
Tiempo total de viaje T3S2R4	3.02	1.29	0.69
Tiempo total de viaje Todos	247.77	90.49	57.27

Tiempo total de viaje Tepetzotlán			
Sistema	MTC	ETC	FFT
Tiempo total de viaje A	584.79	147.73	68.95
Tiempo total de viaje B	847.93	203.15	93.25
Tiempo total de viaje C2	36.50	8.88	4.38
Tiempo total de viaje C3	26.72	6.73	3.11
Tiempo total de viaje T3S2	81.60	11.92	4.86
Tiempo total de viaje T3S3	25.69	3.67	1.92
Tiempo total de viaje T3S2R4	16.62	2.20	0.83
Tiempo total de viaje Todos	1,619.86	384.28	177.30

Tiempo total de viaje (h) en caseta de cobro Querétaro – Celaya, Palmillas y Tepetzotlán, días atípicos

Tiempo total de viaje Querétaro-Celaya			
Sistema	MTC	ETC	FFT
Tiempo total de viaje A	600.15	175.04	140.09
Tiempo total de viaje B	210.23	150.00	111.10
Tiempo total de viaje C2	9.20	2.90	2.33
Tiempo total de viaje C3	7.87	1.55	1.29
Tiempo total de viaje T3S2	9.12	3.20	2.54
Tiempo total de viaje T3S3	5.90	2.01	1.64
Tiempo total de viaje T3S2R4	4.50	1.78	1.01
Tiempo total de viaje Todos	846.59	336.44	259.81

Tiempo total de viaje Palmillas			
Sistema	MTC	ETC	FFT
Tiempo total de viaje A	2,669.55	400.75	166.25
Tiempo total de viaje B	1,065.03	274.53	90.00
Tiempo total de viaje C2	25.37	14.66	7.52
Tiempo total de viaje C3	25.04	2.25	0.58
Tiempo total de viaje T3S2	47.26	4.57	1.98
Tiempo total de viaje T3S3	8.16	7.52	2.15
Tiempo total de viaje T3S2R4	17.10	7.25	2.55
Tiempo total de viaje Todos	3,857.48	711.50	271.03

Tiempo total de viaje Tepotzotlán			
Sistema	MTC	ETC	FFT
Tiempo total de viaje A	3,823.30	552.50	426.55
Tiempo total de viaje B	1,841.40	255.12	204.30
Tiempo total de viaje C2	34.52	4.77	7.65
Tiempo total de viaje C3	25.04	3.81	5.20
Tiempo total de viaje T3S2	72.56	10.83	8.41
Tiempo total de viaje T3S3	26.94	4.95	3.28
Tiempo total de viaje T3S2R4	17.83	7.25	1.40
Tiempo total de viaje Todos	5,841.59	839.11	656.49

Anexo 8. Consumos de combustible en Querétaro-Celaya, Palmillas y Tepetzotlán

Consumo de combustible (l/h) en caseta de cobro Querétaro – Celaya y Tepetzotlán, días típicos

Consumo de combustible Querétaro-Celaya			
Sistema	MTC	ETC	FFT
Consumo de Combustible A	175.00	107.39	51.93
Consumo de Combustible B	27.95	15.75	12.10
Consumo de Combustible C2	35.78	24.12	12.25
Consumo de Combustible C3	44.36	19.29	12.14
Consumo de Combustible T3S2	67.25	34.50	22.11
Consumo de Combustible T3S3	28.50	17.25	9.65
Consumo de Combustible T3S2R4	32.25	18.25	9.12
Consumo de Combustible Todos	411.09	236.55	129.30

Consumo de combustible Tepetzotlán			
Sistema	MTC	ETC	FFT
Consumo de Combustible A	777.49	346.71	238
Consumo de Combustible B	265.54	95.24	70.66
Consumo de Combustible C2	263.1	108.71	43.89
Consumo de Combustible C3	199.83	90.9	33.95
Consumo de Combustible T3S2	630.66	187.22	121.31
Consumo de Combustible T3S3	254.56	57.4	25.85
Consumo de Combustible T3S2R4	213.24	40.43	12.06
Consumo de Combustible Todos	2604.42	926.61	545.72

Consumo de combustible (l/h) en caseta de cobro Querétaro – Celaya, Palmillas y Tepetzotlán, días atípicos

Consumo de combustible Querétaro-Celaya			
Sistema	MTC	ETC	FFT
Consumo de Combustible A	302.50	152.00	75.00
Consumo de Combustible B	36.96	18.54	14.00
Consumo de Combustible C2	54.71	27.52	17.28
Consumo de Combustible C3	53.46	28.29	18.21
Consumo de Combustible T3S2	87.25	44.23	28.56
Consumo de Combustible T3S3	49.61	17.25	11.47
Consumo de Combustible T3S2R4	44.75	21.22	10.22
Consumo de Combustible Todos	629.24	309.05	174.74

Consumo de combustible Palmillas			
Sistema	MTC	ETC	FFT
Consumo de Combustible A	1,314.86	789.02	450.15
Consumo de Combustible B	315.45	150.22	50.22
Consumo de Combustible C2	224.03	102.30	55.50
Consumo de Combustible C3	225.13	90.20	41.22
Consumo de Combustible T3S2	535.66	150.75	85.20
Consumo de Combustible T3S3	92.26	25.50	12.02
Consumo de Combustible T3S2R4	235.62	48.67	42.15
Consumo de Combustible Todos	2,943.01	1,356.66	736.46

Consumo de combustible Tepotzotlán			
Sistema	MTC	ETC	FFT
Consumo de Combustible A	1,469.13	950.20	351.00
Consumo de Combustible B	442.46	145.00	107.20
Consumo de Combustible C2	251.21	170.20	40.25
Consumo de Combustible C3	184.01	88.25	31.33
Consumo de Combustible T3S2	745.58	305.22	157.63
Consumo de Combustible T3S3	260.95	80.25	50.36
Consumo de Combustible T3S2R4	228.93	60.28	55.23
Consumo de Combustible Todos	3,582.27	1,799.40	793.00

Anexo 9. Emisiones contaminantes Querétaro-Celaya, Palmillas y Tepetzotlán

Emisiones contaminantes (g/h) en caseta de cobro Querétaro – Celaya y Tepetzotlán, días típicos

CO2 Querétaro-Celaya			
Sistema	MTC	ETC	FFT
IEM CO2 A	400,615.87	311,375.50	216,839.37
IEM CO2 B	153,275.00	69,365.00	51,683.70
IEM CO2 C2	221,961.64	180,220.49	130,245.33
IEM CO2 C3	131,821.97	102,282.19	76,803.07
IEM CO2 T3S2	224,572.03	166,106.14	119,879.11
IEM CO2 T3S3	144,628.20	99,530.42	67,296.83
IEM CO2 T3S2R4	89,513.24	83,330.50	41,011.50
IEM CO2 Todos	1,366,387.95	1,012,210.24	703,758.91

NOx Querétaro-Celaya			
Sistema	MTC	ETC	FFT
IEM NOx A	353.13	201.22	154.30
IEM NOx B	850.23	625.10	420.10
IEM NOx C2	1,402.33	925.33	951.23
IEM NOx C3	754.58	521.30	430.20
IEM NOx T3S2	1,561.20	1,110.22	470.10
IEM NOx T3S3	890.35	658.90	399.99
IEM NOx T3S2R4	710.22	502.30	255.20
IEM NOx Todos	6,522.04	4,544.37	3,081.12

PM Querétaro-Celaya			
Sistema	MTC	ETC	FFT
IEM PM A	41.86	29.90	10.70
IEM PM B	24.10	17.53	5.00
IEM PM C2	35.84	25.17	8.43
IEM PM C3	21.62	14.76	5.99
IEM PM T3S2	34.02	21.49	7.74
IEM PM T3S3	20.96	12.83	4.37
IEM PM T3S2R4	13.48	10.93	2.77
IEM PM Todos	191.88	132.61	45.00

VOC Querétaro-Celaya			
Sistema	MTC	ETC	FFT
IEM VOC A	884.48	420.90	349.70
IEM VOC B	76.85	65.95	46.23
IEM VOC C2	61.00	40.99	37.10
IEM VOC C3	30.56	22.63	23.01
IEM VOC T3S2	58.06	41.45	38.10
IEM VOC T3S3	37.97	24.92	21.33
IEM VOC T3S2R4	23.77	20.65	12.90
IEM VOC Todos	1,172.69	637.49	528.37

CO2 Tepotztlán			
Sistema	MTC	ETC	FFT
IEM CO2 A	2,745,679.10	1,076,069.32	844,201.07
IEM CO2 B	769,081.07	316,625.16	244,821.00
IEM CO2 C2	685,002.30	88,556.00	81,547.03
IEM CO2 C3	804,553.00	67,800.00	78,482.29
IEM CO2 T3S2	2,441,820.07	726,941.19	501,632.92
IEM CO2 T3S3	920,213.40	222,811.00	194,935.74
IEM CO2 T3S2R4	594,903.39	128,640.80	97,845.54
IEM CO2 Todos	8,961,251.93	2,627,442.91	2,043,463.47

NOx Tepotztlán			
Sistema	MTC	ETC	FFT
IEM NOx A	2,705.18	923.42	128.84
IEM NOx B	7,986.10	2,767.33	380.73
IEM NOx C2	7,892.00	3,100.07	45.80
IEM NOx C3	6,294.58	1,080.77	304.30
IEM NOx T3S2	22,156.16	5,674.24	706.23
IEM NOx T3S3	8,330.27	1,709.33	271.45
IEM NOx T3S2R4	5,430.00	1,011.09	115.62
IEM NOx Todos	60,793.74	16,266.25	1,952.97

PM Tepotztlán			
Sistema	MTC	ETC	FFT
IEM PM A	415.50	82.31	52.42
IEM PM B	357.82	45.66	24.21
IEM PM C2	390.20	43.32	20.56
IEM PM C3	350.23	13.02	18.22
IEM PM T3S2	524.67	66.97	31.36
IEM PM T3S3	421.51	22.61	13.58

IEM PM T3S2R4	427.60	11.90	5.27
IEM PM Todos	2,887.40	285.79	165.62

VOC Tepetzotlán			
Sistema	MTC	ETC	FFT
IEM VOC A	8,242.64	826.58	710.24
IEM VOC B	647.56	133.55	123.37
IEM VOC C2	175.98	20.09	17.55
IEM VOC C3	136.32	107.50	96.48
IEM VOC T3S2	737.18	107.29	87.19
IEM VOC T3S3	278.73	32.43	34.49
IEM VOC T3S2R4	182.03	19.59	14.59
IEM VOC Todos	10,400.44	1,247.03	1,083.91

Emisiones contaminantes (g/h) en caseta de cobro Querétaro – Celaya, Palmillas y Tepetzotlán, días atípicos

CO2 Querétaro-Celaya			
Sistema	MTC	ETC	FFT
IEM CO2 A	550,500.00	343,152.20	229,612.31
IEM CO2 B	203,421.45	90,634.50	57,845.13
IEM CO2 C2	270,336.28	200,145.23	135,475.36
IEM CO2 C3	170,145.30	147,556.00	85,224.35
IEM CO2 T3S2	245,691.23	188,974.64	124,231.30
IEM CO2 T3S3	172,699.33	107,589.10	71,225.34
IEM CO2 T3S2R4	110,332.40	88,748.50	43,665.10
IEM CO2 Todos	1,723,125.99	1,166,800.17	747,278.89

NOx Querétaro-Celaya			
Sistema	MTC	ETC	FFT
IEM NOx A	384.20	257.53	181.84
IEM NOx B	936.79	746.14	473.12
IEM NOx C2	1,604.46	1,216.12	1,069.23
IEM NOx C3	954.67	676.88	606.36
IEM NOx T3S2	1,756.69	1,195.30	986.21
IEM NOx T3S3	1,136.01	718.20	554.11
IEM NOx T3S2R4	718.85	596.69	334.50
IEM NOx Todos	7,491.67	5,406.86	4,205.37

PM Querétaro-Celaya			
Sistema	MTC	ETC	FFT
IEM PM A	70.00	31.20	12.20

IEM PM B	32.12	19.23	6.10
IEM PM C2	42.30	27.50	8.46
IEM PM C3	27.50	16.24	6.33
IEM PM T3S2	43.65	23.14	8.10
IEM PM T3S3	29.68	13.59	5.23
IEM PM T3S2R4	18.65	12.33	3.89
IEM PM Todos	263.90	143.23	50.31

VOC Querétaro-Celaya			
Sistema	MTC	ETC	FFT
IEM VOC A	1,102.20	550.20	349.70
IEM VOC B	102.30	90.22	55.23
IEM VOC C2	98.80	57.80	36.20
IEM VOC C3	55.65	39.60	24.10
IEM VOC T3S2	98.80	49.60	41.20
IEM VOC T3S3	65.20	30.10	24.36
IEM VOC T3S2R4	44.70	27.80	14.50
IEM VOC Todos	1,567.65	845.32	545.29

CO2 Palmillas			
Sistema	MTC	ETC	FFT
IEM CO2 A	4,021,778.00	799,474.99	52,325.33
IEM CO2 B	705,908.00	330,252.96	121,347.00
IEM CO2 C2	420,775.00	364,029.92	201,320.12
IEM CO2 C3	399,089.00	467,704.07	182,428.62
IEM CO2 T3S2	1,754,678.00	884,292.89	421,435.00
IEM CO2 T3S3	290,057.00	110,970.84	72,360.00
IEM CO2 T3S2R4	693,842.00	221,097.12	135,225.00
IEM CO2 Todos	8,286,127.00	3,177,822.79	1,186,441.07

NOx Palmillas			
Sistema	MTC	ETC	FFT
IEM NOx A	4,576.50	1,829.56	899.36
IEM NOx B	8,216.07	3,578.25	915.26
IEM NOx C2	4,643.04	2,393.88	1,525.36
IEM NOx C3	4,769.10	3,079.27	1,797.60
IEM NOx T3S2	17,223.44	7,989.25	4,525.31
IEM NOx T3S3	2,996.60	841.39	502.32
IEM NOx T3S2R4	6,848.14	2,302.25	1,307.29
IEM NOx Todos	49,272.89	22,013.85	11,472.50

PM Palmillas			
---------------------	--	--	--

Sistema	MTC	ETC	FFT
IEM PM A	470.25	125.27	55.63
IEM PM B	332.23	32.20	25.26
IEM PM C2	310.20	37.20	35.36
IEM PM C3	305.23	30.14	29.57
IEM PM T3S2	520.26	158.50	25.04
IEM PM T3S3	380.26	22.30	21.22
IEM PM T3S2R4	361.20	27.80	14.20
IEM PM Todos	2,679.63	433.41	206.28

VOC Palmillas			
Sistema	MTC	ETC	FFT
IEM VOC A	2,755.97	597.84	425.16
IEM VOC B	1,425.20	405.50	120.20
IEM VOC C2	1,350.25	250.60	78.26
IEM VOC C3	1,378.29	180.70	96.27
IEM VOC T3S2	3,214.45	350.35	187.25
IEM VOC T3S3	359.26	220.40	102.30
IEM VOC T3S2R4	833.20	170.20	81.25
IEM VOC Todos	11,316.62	2,175.59	1,090.69

CO2 Tepotzotlán			
Sistema	MTC	ETC	FFT
IEM CO2 A	7,397,626.10	625,189.68	496,700.39
IEM CO2 B	1,750,068.51	190,978.60	147,225.57
IEM CO2 C2	297,572.00	48,371.93	44,245.68
IEM CO2 C3	968,030.33	186,326.84	127,646.40
IEM CO2 T3S2	3,878,711.15	438,603.51	298,916.45
IEM CO2 T3S3	1,475,014.01	132,961.47	119,738.79
IEM CO2 T3S2R4	974,809.07	77,378.05	47,767.74
IEM CO2 Todos	16,741,830.20	1,699,810.08	1,282,241.02

NOx Tepotzotlán			
Sistema	MTC	ETC	FFT
IEM NOx A	6,193.12	1,827.60	325.60
IEM NOx B	16,031.29	4,575.29	750.22
IEM NOx C2	8,267.50	152.28	120.33
IEM NOx C3	7,500.22	1,343.38	525.20
IEM NOx T3S2	30,954.87	9,650.25	1,850.22
IEM NOx T3S3	11,846.28	2,120.20	800.22
IEM NOx T3S2R4	7,887.87	1,232.20	203.22
IEM NOx Todos	88,681.15	20,901.20	4,575.01

PM Tepotzotlán			
Sistema	MTC	ETC	FFT
IEM PM A	1,120.15	128.44	66.33
IEM PM B	1,000.20	110.42	27.21
IEM PM C2	889.20	73.40	24.51
IEM PM C3	922.14	91.62	27.80
IEM PM T3S2	1,567.20	134.40	37.88
IEM PM T3S3	995.45	122.50	20.23
IEM PM T3S2R4	1,015.11	70.60	7.28
IEM PM Todos	7,509.30	731.38	211.24

VOC Tepotzotlán			
Sistema	MTC	ETC	FFT
IEM VOC A	10,255.78	2,100.25	860.22
IEM VOC B	1,000.28	254.70	134.70
IEM VOC C2	205.87	80.97	23.22
IEM VOC C3	189.27	91.20	78.80
IEM VOC T3S2	1,125.30	247.70	87.19
IEM VOC T3S3	321.25	99.70	55.20
IEM VOC T3S2R4	380.27	120.23	32.10
IEM VOC Todos	13,478.02	2,994.75	1,271.43

Anexo 10. Costos de tiempos de viaje Querétaro-Celaya, Palmillas y Tepetzotlán

Costo de tiempo de viaje (MXN) en caseta de cobro Querétaro – Celaya y Tepetzotlán, días típicos

Costo de tiempo total de viaje Querétaro-Celaya					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
Tiempo total de viaje A	\$5,919.25	\$1,736.24	\$1,123.49	\$ 4,183.01	\$ 4,795.76
Tiempo total de viaje B	\$5,029.62	\$2,348.69	\$1,374.84	\$ 2,680.94	\$ 3,654.78
Tiempo total de viaje C2	\$359.29	\$120.10	\$115.58	\$ 239.19	\$ 243.71
Tiempo total de viaje C3	\$351.25	\$66.83	\$63.82	\$ 284.42	\$ 287.43
Tiempo total de viaje T3S2	\$408.53	\$131.66	\$106.53	\$ 276.88	\$ 302.00
Tiempo total de viaje T3S3	\$231.15	\$78.89	\$58.79	\$ 152.26	\$ 172.36
Tiempo total de viaje T3S2R4	\$151.50	\$64.82	\$34.67	\$ 86.68	\$ 116.83
Tiempo total de viaje Todos	\$12,450.59	\$4,547.22	\$2,877.72	\$ 7,903.37	\$ 9,572.88

Costo de tiempo total de viaje Tepetzotlán					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
Tiempo total de viaje A	\$29,385.90	\$7,423.33	\$3,464.74	\$ 21,962.57	\$ 25,921.16
Tiempo total de viaje B	\$42,608.58	\$10,208.19	\$4,685.91	\$ 32,400.40	\$ 37,922.67
Tiempo total de viaje C2	\$1,834.13	\$446.22	\$220.10	\$ 1,387.91	\$ 1,614.03
Tiempo total de viaje C3	\$1,342.68	\$338.18	\$156.28	\$ 1,004.50	\$ 1,186.40
Tiempo total de viaje T3S2	\$4,100.40	\$598.98	\$244.22	\$ 3,501.42	\$ 3,856.19
Tiempo total de viaje T3S3	\$1,290.92	\$184.42	\$96.48	\$ 1,106.51	\$ 1,194.44
Tiempo total de viaje T3S2R4	\$835.16	\$110.55	\$41.71	\$ 724.61	\$ 793.45
Tiempo total de viaje Todos	\$81,397.76	\$19,309.87	\$8,909.43	\$ 62,087.90	\$ 72,488.34

Costo de tiempo de viaje (MXN) en caseta de cobro Querétaro – Celaya, Palmillas y Tepetzotlán, días atípicos

Costo de tiempo total de viaje Querétaro-Celaya					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
Tiempo total de viaje A	\$30,150.00	\$8,793.75	\$7,035.00	\$ 21,356.25	\$ 23,115.00
Tiempo total de viaje B	\$10,552.50	\$7,537.50	\$5,577.75	\$ 3,015.00	\$ 4,974.75
Tiempo total de viaje C2	\$462.30	\$145.73	\$117.08	\$ 316.58	\$ 345.22
Tiempo total de viaje C3	\$395.47	\$77.89	\$64.82	\$ 317.58	\$ 330.65
Tiempo total de viaje T3S2	\$458.28	\$160.80	\$127.64	\$ 297.48	\$ 330.65
Tiempo total de viaje T3S3	\$296.48	\$101.00	\$82.41	\$ 195.47	\$ 214.07
Tiempo total de viaje T3S2R4	\$226.13	\$89.45	\$50.75	\$ 136.68	\$ 175.37
Tiempo total de viaje Todos	\$42,541.15	\$16,906.11	\$13,055.45	\$ 25,635.04	\$ 29,485.70

Costo de tiempo total de viaje Palmillas					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
Tiempo total de viaje A	\$80,486.93	\$12,082.61	\$5,012.44	\$ 68,404.32	\$ 75,474.50
Tiempo total de viaje B	\$32,109.75	\$8,276.18	\$2,713.50	\$ 23,833.58	\$ 29,396.25
Tiempo total de viaje C2	\$764.91	\$442.00	\$226.73	\$ 322.91	\$ 538.18
Tiempo total de viaje C3	\$754.96	\$67.84	\$17.49	\$ 687.12	\$ 737.47
Tiempo total de viaje T3S2	\$1,424.89	\$137.79	\$59.70	\$ 1,287.10	\$ 1,365.19
Tiempo total de viaje T3S3	\$246.02	\$226.73	\$64.82	\$ 19.30	\$ 181.20
Tiempo total de viaje T3S2R4	\$515.57	\$218.59	\$76.88	\$ 296.98	\$ 438.68
Tiempo total de viaje Todos	\$116,303.02	\$21,451.73	\$8,171.55	\$ 94,851.30	\$ 108,131.47

Costo de tiempo total de viaje Tepetzotlán					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
Tiempo total de viaje A	\$120,433.95	\$17,403.75	\$13,436.33	\$ 103,030.20	\$ 106,997.63
Tiempo total de viaje B	\$58,004.10	\$8,032.50	\$6,426.00	\$ 49,971.60	\$ 51,578.10
Tiempo total de viaje C2	\$1,087.38	\$150.26	\$240.98	\$ 937.13	\$ 846.41
Tiempo total de viaje C3	\$788.76	\$120.02	\$163.80	\$ 668.75	\$ 624.96
Tiempo total de viaje T3S2	\$2,285.64	\$341.15	\$264.92	\$ 1,944.50	\$ 2,020.73
Tiempo total de viaje T3S3	\$848.61	\$155.93	\$103.32	\$ 692.69	\$ 745.29
Tiempo total de viaje T3S2R4	\$561.65	\$228.38	\$44.10	\$ 333.27	\$ 517.55
Tiempo total de viaje Todos	\$184,010.09	\$26,431.97	\$20,679.44	\$ 157,578.12	\$ 163,330.65

Anexo 11. Costos de consumos de combustible Querétaro-Celaya, Palmillas y Tepetzotlán

Costo de consumo de combustible (MXN) en caseta de cobro Querétaro – Celaya y Tepetzotlán, días típicos

Costo de consumo de combustible Querétaro-Celaya					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
Consumo de Combustible A	\$3,031.00	\$1,859.99	\$899.43	\$ 1,171.01	\$ 2,131.57
Consumo de Combustible B	\$491.36	\$276.89	\$212.72	\$ 214.48	\$ 278.64
Consumo de Combustible C2	\$629.01	\$424.03	\$215.36	\$ 204.98	\$ 413.66
Consumo de Combustible C3	\$779.85	\$339.12	\$213.42	\$ 440.73	\$ 566.43
Consumo de Combustible T3S2	\$1,182.26	\$606.51	\$388.69	\$ 575.75	\$ 793.56
Consumo de Combustible T3S3	\$501.03	\$303.26	\$169.65	\$ 197.78	\$ 331.38
Consumo de Combustible T3S2R4	\$566.96	\$320.84	\$160.33	\$ 246.12	\$ 406.63
Consumo de Combustible Todos	\$7,181.46	\$4,130.63	\$2,259.59	\$ 3,050.83	\$ 4,921.87

Costo de consumo de combustible Tepetzotlán					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
Consumo de Combustible A	\$14,383.57	\$6,414.14	\$4,291.14	\$ 7,969.43	\$ 10,092.43
Consumo de Combustible B	\$4,787.69	\$1,717.18	\$1,274.00	\$ 3,070.51	\$ 3,513.69
Consumo de Combustible C2	\$4,743.69	\$1,960.04	\$791.34	\$ 2,783.65	\$ 3,952.36
Consumo de Combustible C3	\$3,602.93	\$1,638.93	\$612.12	\$ 1,964.01	\$ 2,990.82
Consumo de Combustible T3S2	\$11,370.80	\$3,375.58	\$2,187.22	\$ 7,995.22	\$ 9,183.58
Consumo de Combustible T3S3	\$4,589.72	\$1,034.92	\$466.08	\$ 3,554.79	\$ 4,123.64
Consumo de Combustible T3S2R4	\$3,844.72	\$728.95	\$217.44	\$ 3,115.76	\$ 3,627.28
Consumo de Combustible Todos	\$47,323.11	\$16,869.73	\$9,839.33	\$ 30,453.38	\$ 37,483.78

Costo de consumo de combustible (MXN) en caseta de cobro Querétaro – Celaya y Tepetzotlán, días atípicos

Costo de consumo de combustible Querétaro-Celaya					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
Consumo de Combustible A	\$5,239.30	\$2,632.64	\$1,299.00	\$ 2,606.66	\$ 3,940.30
Consumo de Combustible B	\$649.76	\$325.93	\$246.12	\$ 323.82	\$ 403.64
Consumo de Combustible C2	\$961.80	\$483.80	\$303.78	\$ 478.00	\$ 658.02
Consumo de Combustible C3	\$939.83	\$497.34	\$320.13	\$ 442.49	\$ 619.70
Consumo de Combustible T3S2	\$1,533.86	\$777.56	\$502.08	\$ 756.29	\$ 1,031.77
Consumo de Combustible T3S3	\$872.14	\$303.26	\$201.64	\$ 568.89	\$ 670.50
Consumo de Combustible T3S2R4	\$786.71	\$373.05	\$179.67	\$ 413.66	\$ 607.04
Tiempo total de viaje Todos	\$10,983.39	\$5,393.58	\$3,052.43	\$ 5,589.81	\$ 7,930.96

Consumo de combustible Palmillas					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
Consumo de Combustible A	\$22,773.38	\$13,870.97	\$7,913.64	\$ 8,902.40	\$ 14,859.74
Consumo de Combustible B	\$5,545.61	\$2,640.87	\$882.87	\$ 2,904.74	\$ 4,662.74
Consumo de Combustible C2	\$3,938.45	\$1,798.43	\$975.69	\$ 2,140.01	\$ 2,962.76
Consumo de Combustible C3	\$3,957.79	\$1,585.72	\$724.65	\$ 2,372.07	\$ 3,233.14
Consumo de Combustible T3S2	\$9,416.90	\$2,650.19	\$1,497.82	\$ 6,766.72	\$ 7,919.09
Consumo de Combustible T3S3	\$1,621.93	\$448.29	\$211.31	\$ 1,173.64	\$ 1,410.62
Consumo de Combustible T3S2R4	\$4,142.20	\$855.62	\$741.00	\$ 3,286.58	\$ 3,401.20
Consumo de combustible Todos	\$51,396.25	\$23,850.08	\$12,946.97	\$ 27,546.17	\$ 38,449.29

Consumo de combustible Tepetzotlán					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
Consumo de Combustible A	\$27,178.91	\$17,578.70	\$6,328.53	\$ 9,600.21	\$ 20,850.38
Consumo de Combustible B	\$7,977.55	\$2,614.35	\$1,932.82	\$ 5,363.20	\$ 6,044.74
Consumo de Combustible C2	\$4,529.32	\$3,068.71	\$725.71	\$ 1,460.61	\$ 3,803.61
Consumo de Combustible C3	\$3,317.70	\$1,591.15	\$564.88	\$ 1,726.55	\$ 2,752.82
Consumo de Combustible T3S2	\$13,442.81	\$5,503.12	\$2,842.07	\$ 7,939.69	\$ 10,600.74
Consumo de Combustible T3S3	\$4,704.93	\$1,446.91	\$907.99	\$ 3,258.02	\$ 3,796.94
Consumo de Combustible T3S2R4	\$4,127.61	\$1,086.85	\$995.80	\$ 3,040.76	\$ 3,131.81
Consumo de Combustible Todos	\$65,278.82	\$32,889.78	\$14,297.79	\$ 32,389.04	\$ 50,981.03

Anexo 12. Costos de emisiones contaminantes Querétaro-Celaya, Palmillas y Tepetzotlán

Costo de emisiones contaminantes (MXN) en caseta de cobro Querétaro – Celaya y Tepetzotlán, días típicos

Costo por CO2 Querétaro-Celaya					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
IEM CO2 A	\$1,145.69	\$890.48	\$620.12	\$ 255.21	\$ 525.57
IEM CO2 B	\$438.34	\$198.37	\$147.81	\$ 239.97	\$ 290.53
IEM CO2 C2	\$634.77	\$515.40	\$372.48	\$ 119.37	\$ 262.29
IEM CO2 C3	\$376.99	\$292.51	\$219.64	\$ 84.48	\$ 157.34
IEM CO2 T3S2	\$642.24	\$475.03	\$342.83	\$ 167.20	\$ 299.40
IEM CO2 T3S3	\$413.61	\$284.64	\$192.46	\$ 128.97	\$ 221.15
IEM CO2 T3S2R4	\$255.99	\$238.31	\$117.29	\$ 17.68	\$ 138.71
IEM CO2 Todos	\$3,907.63	\$2,894.75	\$2,012.63	\$ 1,012.89	\$ 1,895.00

Costo por NOx Querétaro-Celaya					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
IEM NOx A	\$84.95	\$48.41	\$37.12	\$ 36.55	\$ 47.83
IEM NOx B	\$204.54	\$150.38	\$101.06	\$ 54.16	\$ 103.48
IEM NOx C2	\$337.36	\$222.61	\$228.84	\$ 114.75	\$ 108.52
IEM NOx C3	\$181.53	\$125.41	\$103.49	\$ 56.12	\$ 78.04
IEM NOx T3S2	\$375.58	\$267.09	\$113.09	\$ 108.49	\$ 262.49
IEM NOx T3S3	\$214.19	\$158.51	\$96.23	\$ 55.68	\$ 117.97
IEM NOx T3S2R4	\$170.86	\$120.84	\$61.39	\$ 50.02	\$ 109.46
IEM NOx Todos	\$1,569.01	\$1,093.24	\$741.23	\$ 475.77	\$ 827.78

Costo por PM Querétaro-Celaya					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
IEM PM A	\$440.80	\$314.86	\$112.67	\$ 125.94	\$ 328.13
IEM PM B	\$253.78	\$184.60	\$52.65	\$ 69.18	\$ 201.13
IEM PM C2	\$377.41	\$265.05	\$88.77	\$ 112.36	\$ 288.64
IEM PM C3	\$227.67	\$155.43	\$63.08	\$ 72.24	\$ 164.59
IEM PM T3S2	\$358.24	\$226.30	\$81.50	\$ 131.95	\$ 276.74
IEM PM T3S3	\$220.72	\$135.10	\$46.02	\$ 85.61	\$ 174.70
IEM PM T3S2R4	\$141.95	\$115.10	\$29.17	\$ 26.85	\$ 112.78
IEM PM Todos	\$2,020.56	\$1,396.43	\$473.87	\$ 624.13	\$ 1,546.70

Costo por VOC Querétaro-Celaya					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
IEM VOC A	\$26.32	\$12.52	\$10.40	\$ 13.79	\$ 15.91

IEM VOC B	\$2.29	\$1.96	\$1.38	\$ 0.32	\$ 0.91
IEM VOC C2	\$1.81	\$1.22	\$1.10	\$ 0.60	\$ 0.71
IEM VOC C3	\$0.91	\$0.67	\$0.68	\$ 0.24	\$ 0.22
IEM VOC T3S2	\$1.73	\$1.23	\$1.13	\$ 0.49	\$ 0.59
IEM VOC T3S3	\$1.13	\$0.74	\$0.63	\$ 0.39	\$ 0.50
IEM VOC T3S2R4	\$0.71	\$0.61	\$0.38	\$ 0.09	\$ 0.32
IEM VOC Todos	\$34.89	\$18.97	\$15.72	\$ 15.92	\$ 19.17

Costo por CO2 Tepotzotlán					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
IEM CO2 A	\$7,852.17	\$3,077.37	\$2,414.27	\$ 4,774.80	\$ 5,437.90
IEM CO2 B	\$2,199.44	\$905.49	\$700.15	\$ 1,293.95	\$ 1,499.29
IEM CO2 C2	\$1,958.99	\$253.25	\$233.21	\$ 1,705.73	\$ 1,725.78
IEM CO2 C3	\$2,300.88	\$193.90	\$224.44	\$ 2,106.99	\$ 2,076.44
IEM CO2 T3S2	\$6,983.18	\$2,078.93	\$1,434.58	\$ 4,904.26	\$ 5,548.60
IEM CO2 T3S3	\$2,631.65	\$637.20	\$557.48	\$ 1,994.45	\$ 2,074.17
IEM CO2 T3S2R4	\$1,701.32	\$367.89	\$279.82	\$ 1,333.43	\$ 1,421.50
IEM CO2 Todos	\$25,627.63	\$7,514.03	\$5,843.95	\$ 18,113.60	\$ 19,783.68

Costo por NOx Tepotzotlán					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
IEM NOx A	\$650.74	\$222.15	\$31.00	\$ 428.60	\$ 619.75
IEM NOx B	\$1,921.20	\$665.74	\$91.59	\$ 1,255.46	\$ 1,829.60
IEM NOx C2	\$1,898.58	\$745.79	\$11.02	\$ 1,152.80	\$ 1,887.56
IEM NOx C3	\$1,514.29	\$260.00	\$73.21	\$ 1,254.29	\$ 1,441.08
IEM NOx T3S2	\$5,330.12	\$1,365.05	\$169.90	\$ 3,965.06	\$ 5,160.22
IEM NOx T3S3	\$2,003.95	\$411.21	\$65.30	\$ 1,592.74	\$ 1,938.65
IEM NOx T3S2R4	\$1,306.30	\$243.24	\$27.81	\$ 1,063.06	\$ 1,278.48
IEM NOx Todos	\$14,625.17	\$3,913.18	\$469.83	\$ 10,712.00	\$ 14,155.35

Costo por PM Tepotzotlán					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
IEM PM A	\$4,375.36	\$866.75	\$552.00	\$ 3,508.61	\$ 3,823.36
IEM PM B	\$3,767.76	\$480.82	\$254.94	\$ 3,286.94	\$ 3,512.82
IEM PM C2	\$4,108.94	\$456.17	\$216.50	\$ 3,652.77	\$ 3,892.44
IEM PM C3	\$3,687.73	\$137.11	\$191.86	\$ 3,550.62	\$ 3,495.87
IEM PM T3S2	\$5,524.22	\$705.22	\$330.23	\$ 4,819.00	\$ 5,193.99
IEM PM T3S3	\$4,438.54	\$238.09	\$143.00	\$ 4,200.45	\$ 4,295.54
IEM PM T3S2R4	\$4,502.78	\$125.31	\$55.49	\$ 4,377.47	\$ 4,447.28
IEM PM Todos	\$30,405.34	\$3,009.47	\$1,744.04	\$ 27,395.87	\$ 28,661.30

Costo por VOC Tepetzotlán					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
IEM VOC A	\$245.25	\$24.59	\$21.13	\$ 220.66	\$ 224.12
IEM VOC B	\$19.27	\$3.97	\$3.67	\$ 15.29	\$ 15.60
IEM VOC C2	\$5.24	\$0.60	\$0.52	\$ 4.64	\$ 4.71
IEM VOC C3	\$4.06	\$3.20	\$2.87	\$ 0.86	\$ 1.19
IEM VOC T3S2	\$21.93	\$3.19	\$2.59	\$ 18.74	\$ 19.34
IEM VOC T3S3	\$8.29	\$0.96	\$1.03	\$ 7.33	\$ 7.27
IEM VOC T3S2R4	\$5.42	\$0.58	\$0.43	\$ 4.83	\$ 4.98
IEM VOC Todos	\$309.45	\$37.10	\$32.25	\$ 272.35	\$ 277.20

**Costo de emisiones contaminantes (MXN) en caseta de cobro Querétaro –
Celaya, Palmillas y Tepetzotlán, días atípicos**

Costo por CO2 Querétaro-Celaya					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
IEM CO2 A	\$1,574.33	\$981.36	\$656.65	\$ 592.98	\$ 917.68
IEM CO2 B	\$581.75	\$259.20	\$165.43	\$ 322.55	\$ 416.32
IEM CO2 C2	\$773.11	\$572.38	\$387.44	\$ 200.73	\$ 385.68
IEM CO2 C3	\$486.59	\$421.98	\$243.73	\$ 64.60	\$ 242.86
IEM CO2 T3S2	\$702.63	\$540.43	\$355.28	\$ 162.20	\$ 347.35
IEM CO2 T3S3	\$493.89	\$307.69	\$203.69	\$ 186.20	\$ 290.20
IEM CO2 T3S2R4	\$315.53	\$253.81	\$124.87	\$ 61.73	\$ 190.66
IEM CO2 Todos	\$4,927.84	\$3,336.85	\$2,137.09	\$ 1,591.00	\$ 2,790.75

Costo por NOx Querétaro-Celaya					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
IEM NOx A	\$92.43	\$61.95	\$43.75	\$ 30.47	\$ 48.68
IEM NOx B	\$225.36	\$179.50	\$113.82	\$ 45.86	\$ 111.55
IEM NOx C2	\$385.99	\$292.56	\$257.23	\$ 93.42	\$ 128.76
IEM NOx C3	\$229.67	\$162.84	\$145.87	\$ 66.83	\$ 83.79
IEM NOx T3S2	\$422.61	\$287.55	\$237.25	\$ 135.05	\$ 185.35
IEM NOx T3S3	\$273.29	\$172.78	\$133.30	\$ 100.51	\$ 139.99
IEM NOx T3S2R4	\$172.93	\$143.55	\$80.47	\$ 29.39	\$ 92.46
IEM NOx Todos	\$1,802.27	\$1,300.73	\$1,011.69	\$ 501.54	\$ 790.59

Costo por PM Querétaro-Celaya					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
IEM PM A	\$737.12	\$328.55	\$128.47	\$ 408.58	\$ 608.65
IEM PM B	\$338.23	\$202.50	\$64.24	\$ 135.74	\$ 274.00
IEM PM C2	\$445.43	\$289.58	\$89.09	\$ 155.85	\$ 356.35
IEM PM C3	\$289.58	\$171.01	\$66.66	\$ 118.57	\$ 222.93

IEM PM T3S2	\$459.65	\$243.67	\$85.30	\$ 215.98	\$ 374.35
IEM PM T3S3	\$312.54	\$143.11	\$55.07	\$ 169.43	\$ 257.47
IEM PM T3S2R4	\$196.39	\$129.84	\$40.96	\$ 66.55	\$ 155.43
IEM PM Todos	\$2,778.96	\$1,508.26	\$529.78	\$ 1,270.70	\$ 2,249.18

Costo por VOC Querétaro-Celaya					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
IEM VOC A	\$32.79	\$16.37	\$10.40	\$ 16.42	\$ 22.39
IEM VOC B	\$3.04	\$2.68	\$1.64	\$ 0.36	\$ 1.40
IEM VOC C2	\$2.94	\$1.72	\$1.08	\$ 1.22	\$ 1.86
IEM VOC C3	\$1.66	\$1.18	\$0.72	\$ 0.48	\$ 0.94
IEM VOC T3S2	\$2.94	\$1.48	\$1.23	\$ 1.46	\$ 1.71
IEM VOC T3S3	\$1.94	\$0.90	\$0.72	\$ 1.04	\$ 1.22
IEM VOC T3S2R4	\$1.33	\$0.83	\$0.43	\$ 0.50	\$ 0.90
IEM VOC Todos	\$46.64	\$25.15	\$16.22	\$ 21.49	\$ 30.42

Costo por CO2 Palmillas					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
IEM CO2 A	\$11,501.59	\$ 2,286.36	\$ 149.64	\$ 9,215.23	\$ 11,351.95
IEM CO2 B	\$ 2,018.77	\$ 944.47	\$ 347.03	\$ 1,074.31	\$ 1,671.74
IEM CO2 C2	\$ 1,203.34	\$ 1,041.06	\$ 575.74	\$ 162.28	\$ 627.60
IEM CO2 C3	\$ 1,141.33	\$ 1,337.55	\$ 521.71	-\$ 196.23	\$ 619.61
IEM CO2 T3S2	\$ 5,018.08	\$ 2,528.92	\$ 1,205.23	\$ 2,489.15	\$ 3,812.84
IEM CO2 T3S3	\$ 829.51	\$ 317.36	\$ 206.94	\$ 512.16	\$ 622.58
IEM CO2 T3S2R4	\$ 1,984.27	\$ 632.30	\$ 386.72	\$ 1,351.97	\$ 1,597.55
IEM CO2 Todos	\$23,696.89	\$ 9,088.02	\$ 3,393.02	\$ 14,608.87	\$ 20,303.87

Costo por NOx Palmillas					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
IEM NOx A	\$ 1,100.97	\$ 440.14	\$ 216.36	\$ 660.83	\$ 884.61
IEM NOx B	\$ 1,976.54	\$ 860.82	\$ 220.18	\$ 1,115.72	\$ 1,756.36
IEM NOx C2	\$ 1,116.98	\$ 575.90	\$ 366.96	\$ 541.08	\$ 750.02
IEM NOx C3	\$ 1,147.30	\$ 740.78	\$ 432.45	\$ 406.52	\$ 714.85
IEM NOx T3S2	\$ 4,143.45	\$ 1,921.98	\$ 1,088.66	\$ 2,221.47	\$ 3,054.79
IEM NOx T3S3	\$ 720.89	\$ 202.41	\$ 120.84	\$ 518.48	\$ 600.05
IEM NOx T3S2R4	\$ 1,647.46	\$ 553.85	\$ 314.50	\$ 1,093.61	\$ 1,332.96
IEM NOx Todos	\$11,853.60	\$ 5,295.88	\$ 2,759.94	\$ 6,557.72	\$ 9,093.65

Costo por PM Palmillas					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
IEM PM A	\$ 4,951.90	\$ 1,319.14	\$ 585.80	\$ 3,632.76	\$ 4,366.09
IEM PM B	\$ 3,498.50	\$ 339.08	\$ 266.00	\$ 3,159.42	\$ 3,232.50
IEM PM C2	\$ 3,266.51	\$ 391.73	\$ 372.35	\$ 2,874.79	\$ 2,894.16

IEM PM C3	\$ 3,214.18	\$ 317.38	\$ 311.38	\$ 2,896.79	\$ 2,902.80
IEM PM T3S2	\$ 5,478.52	\$ 1,669.06	\$ 263.68	\$ 3,809.46	\$ 5,214.84
IEM PM T3S3	\$ 4,004.27	\$ 234.83	\$ 223.45	\$ 3,769.44	\$ 3,780.82
IEM PM T3S2R4	\$ 3,803.56	\$ 292.74	\$ 149.53	\$ 3,510.82	\$ 3,654.03
IEM PM Todos	\$28,217.44	\$ 4,563.96	\$ 2,172.20	\$ 23,653.49	\$ 26,045.24

Costo por VOC Palmillas					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
IEM VOC A	\$ 82.00	\$ 17.79	\$ 12.65	\$ 64.21	\$ 69.35
IEM VOC B	\$ 42.41	\$ 12.07	\$ 3.58	\$ 30.34	\$ 38.83
IEM VOC C2	\$ 40.18	\$ 7.46	\$ 2.33	\$ 32.72	\$ 37.85
IEM VOC C3	\$ 41.01	\$ 5.38	\$ 2.86	\$ 35.63	\$ 38.15
IEM VOC T3S2	\$ 95.64	\$ 10.42	\$ 5.57	\$ 85.22	\$ 90.07
IEM VOC T3S3	\$ 10.69	\$ 6.56	\$ 3.04	\$ 4.13	\$ 7.65
IEM VOC T3S2R4	\$ 24.79	\$ 5.06	\$ 2.42	\$ 19.73	\$ 22.37
IEM VOC Todos	\$ 336.71	\$ 64.73	\$ 32.45	\$ 271.98	\$ 304.26

Costo por CO2 Tepozotlán					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
IEM CO2 A	\$21,155.93	\$1,787.93	\$1,420.48	\$ 19,367.99	\$ 19,735.45
IEM CO2 B	\$5,004.89	\$546.17	\$421.04	\$ 4,458.73	\$ 4,583.85
IEM CO2 C2	\$851.00	\$138.34	\$126.53	\$ 712.67	\$ 724.47
IEM CO2 C3	\$2,768.40	\$532.86	\$365.05	\$ 2,235.54	\$ 2,403.35
IEM CO2 T3S2	\$11,092.44	\$1,254.33	\$854.85	\$ 9,838.11	\$ 10,237.59
IEM CO2 T3S3	\$4,218.28	\$380.25	\$342.43	\$ 3,838.04	\$ 3,875.85
IEM CO2 T3S2R4	\$2,787.78	\$221.29	\$136.61	\$ 2,566.50	\$ 2,651.18
IEM CO2 Todos	\$47,878.73	\$4,861.16	\$3,666.99	\$ 43,017.57	\$ 44,211.75

Costo por NOx Tepozotlán					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
IEM NOx A	\$1,489.88	\$439.67	\$78.33	\$ 1,050.21	\$ 1,411.55
IEM NOx B	\$3,856.65	\$1,100.68	\$180.48	\$ 2,755.97	\$ 3,676.17
IEM NOx C2	\$1,988.92	\$36.63	\$28.95	\$ 1,952.28	\$ 1,959.97
IEM NOx C3	\$1,804.33	\$323.18	\$126.35	\$ 1,481.15	\$ 1,677.98
IEM NOx T3S2	\$7,446.83	\$2,321.56	\$445.11	\$ 5,125.26	\$ 7,001.72
IEM NOx T3S3	\$2,849.86	\$510.06	\$192.51	\$ 2,339.81	\$ 2,657.36
IEM NOx T3S2R4	\$1,897.59	\$296.43	\$48.89	\$ 1,601.16	\$ 1,848.70
IEM NOx Todos	\$21,334.06	\$5,028.21	\$1,100.61	\$ 16,305.85	\$ 20,233.45

Costo por PM Tepozotlan					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
IEM PM A	\$11,795.57	\$1,352.52	\$698.48	\$ 10,443.05	\$ 11,097.09
IEM PM B	\$10,532.46	\$1,162.76	\$286.53	\$ 9,369.70	\$ 10,245.93

IEM PM C2	\$9,363.59	\$772.93	\$258.10	\$ 8,590.66	\$ 9,105.49
IEM PM C3	\$9,710.04	\$964.79	\$292.74	\$ 8,745.25	\$ 9,417.29
IEM PM T3S2	\$16,503.17	\$1,415.28	\$398.89	\$ 15,087.89	\$ 16,104.28
IEM PM T3S3	\$10,482.44	\$1,289.97	\$213.03	\$ 9,192.47	\$ 10,269.41
IEM PM T3S2R4	\$10,688.31	\$743.44	\$76.66	\$ 9,944.86	\$ 10,611.65
IEM PM Todos	\$79,075.56	\$7,701.69	\$2,224.43	\$ 71,373.88	\$ 76,851.13

Costo por VOC Tepetzotlán					
Sistema	MTC	ETC	FFT	Dif. MTC-ETC	Dif. MTC-FFT
IEM VOC A	\$305.15	\$62.49	\$25.59	\$ 242.66	\$ 279.56
IEM VOC B	\$29.76	\$7.58	\$4.01	\$ 22.18	\$ 25.75
IEM VOC C2	\$33.48	\$7.37	\$2.59	\$ 26.11	\$ 30.89
IEM VOC C3	\$9.56	\$2.97	\$1.64	\$ 6.59	\$ 7.92
IEM VOC T3S2	\$11.31	\$3.58	\$0.96	\$ 7.74	\$ 10.36
IEM VOC T3S3	\$6.13	\$2.41	\$0.69	\$ 3.72	\$ 5.43
IEM VOC T3S2R4	\$5.63	\$2.71	\$2.34	\$ 2.92	\$ 3.29
IEM VOC Todos	\$401.03	\$89.11	\$37.83	\$ 311.92	\$ 363.19

Anexo 13. Tabla y gráfica comparativa de impacto económico y ambiental en la hora de máxima demanda por tipo de sistema de peaje y tipo de día de aforo

Resultados Finales						
Caseta de cobro	Típicos			Atípicos		
	Sistema			Sistema		
	MTC	ETC	FFT	MTC	ETC	FFT
Querétaro - Celaya	\$ 27,164.15	\$ 14,081.24	\$ 8,380.75	\$ 63,080.26	\$ 28,470.68	\$ 19,802.66
Palmillas	\$ 138,366.28	\$ 48,730.57	\$ 24,913.66	\$ 264,803.65	\$ 64,314.40	\$ 30,945.95
Tepetzotlán	\$ 199,688.47	\$ 50,686.28	\$ 26,846.57	\$ 457,149.36	\$ 89,108.11	\$ 42,007.09

