



**COMUNICACIONES**

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



# Algunos efectos económicos causados por la reducción de un carril debido a acciones de conservación

---

José Antonio Arroyo Osorno  
Gabriela Cruz González  
Salvador Hernández García

Publicación Técnica No. 810  
**Querétaro, México**  
**2024**

ISSN 0188-7297



Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Estudios Económicos y Sociales del Transporte del Instituto Mexicano del Transporte, por el M. en I. José Antonio Arroyo Osorno. Se agradece la colaboración de la Dra. en Ec. Gabriela Cruz González y del M. en C. Salvador Hernández García, así como el apoyo del M. en C. Emilio Abarca Pérez en la revisión del documento.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna *OI-05/23 Algunos efectos económicos en el transporte de las mercancías causados por la reducción de un carril debido a acciones de conservación.*

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores (as) y no necesariamente reflejan los puntos de vista del Instituto Mexicano del Transporte.



# Tabla de Contenido

---

	Página
Sinopsis.....	v
Abstract.....	vii
Introducción.....	1
1. Análisis del nivel de servicio en carreteras.....	3
1.1 Obtención del FHMD (Factor Horario de Máxima Demanda) .....	3
1.2 Volumen de servicio .....	5
2. Nivel de servicio con base en el Highway Capacity Manual 2010.....	9
2.1 Análisis del nivel de servicio, considerando un carril por sentido...9	
2.2 Análisis del nivel de servicio, considerando carriles múltiples .....	15
2.3 Estimación de las velocidades de operación.....	20
3. Ejemplo de caso.....	21
Conclusiones.....	39
Bibliografía .....	41



## Sinopsis

---

Esta publicación pretende desarrollar una propuesta metodológica que plasme los efectos que ocasionan las acciones de conservación, tanto para el tiempo de recorrido de las mercancías como en el costo de combustible y para la carretera misma, como resultado de acciones de conservación y/o modernización de la vía, que sea de utilidad para los responsables de la planeación y operación de carreteras y apoye su toma de decisiones en la evaluación de proyectos carreteros.

La metodología propuesta se basa en el HCM 2010, que es el documento dónde se determinan los niveles de servicio con los cuales opera una carretera, tomando en cuenta las características geométricas de esta, así como su Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA).



# Abstract

---

This publication pretends to develop a methodological proposal that shows the effects caused by conservation actions, both for the travel time of goods as the cost of fuel and for the road itself, as a result of conservation and/or modernization actions of the road, which is useful for those responsible for the planning and operation of highways and supports their decision making in the evaluation of highway projects.

The proposed methodology is based on the HCM 2010, which is the document where the operating service levels of a highway are determined, taking into account its geometric characteristics, as well as its Annual Average Daily Traffic (TDPA, by its acronyms in Spanish).



# Introducción

---

La realización de este estudio se debe a la necesidad de complementar y ampliar los documentos elaborados anteriormente en la Coordinación de Estudios Económicos y Sociales del Transporte (CEEST) sobre la línea de investigación “Desarrollo metodológico para la evaluación económica y social de proyectos de transporte”. En ese sentido, es importante resaltar la trascendencia que tiene el transporte de mercancías en la cadena de distribución de bienes y servicios para la población. El transporte en tiempo y forma de los productos de consumo y bienestar garantiza que los mismos lleguen no alterados y en buenas condiciones físicas. Para ello, es fundamental contar con vías de comunicación en buen estado superficial y con niveles de servicio adecuados. Las mercancías sufren daños cuándo la superficie de rodamiento de las carreteras está en malas condiciones o existe un flujo excesivo de vehículos en la vialidad que les impide llegar oportunamente a su destino. Para los responsables de la planeación y operación de las carreteras es relevante visualizar lo anterior con la finalidad de que traten de reducir al máximo los efectos que las acciones de conservación o mantenimiento de los caminos tienen en el transporte de las mercancías.

El estado superficial y el nivel de servicio de una carretera influyen en el tiempo de recorrido de los vehículos, así como en la velocidad de operación de los mismos y en los costos de operación en que incurren. Por lo que, el desarrollo de la presente propuesta de investigación tiene la finalidad de contribuir a estimar los efectos ocasionados en el nivel de servicio de la vía, así como en el tiempo de recorrido de las mercancías y el costo de combustible, entre otros, derivados de las medidas adoptadas para la conservación o mantenimiento de las carreteras.

Para llevar a cabo acciones de conservación o mantenimiento en la sección estructural de las carreteras se recurre a cerrar un(os) carril(es). Por ello, para estimar los efectos económicos sobre el transporte de las mercancías, esta investigación parte del hecho del cierre de un carril. Con relación a lo anterior, es importante mencionar la Publicación Técnica 747 del IMT “Una estimación de los efectos ocasionados por el cierre de un carril en carreteras”, trabajo que antecede a esta propuesta de investigación, que fue desarrollado para medir los efectos sobre los usuarios de la carretera, y que servirá como uno de los documentos de referencia para el desarrollo de este estudio.

La propuesta de investigación a desarrollar se encuadra dentro de la sección “Impulsar la reactivación económica, el mercado interno y el empleo” que se encuentra en el apartado 3 *Economía* del Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024. En dicho apartado se establece que ***El sector público fomentará la creación de empleos mediante programas sectoriales, proyectos regionales y obras de infraestructura.*** Asimismo, el estudio propuesto se encuentra alineado al objetivo prioritario 1 del Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2020-2024 “Contribuir al bienestar social mediante la construcción, modernización y conservación de infraestructura carretera accesible, segura, eficiente y sostenible, que conecte a las personas de cualquier condición, con visión de desarrollo regional e intermodal”, su estrategia prioritaria 1.5 “Mejorar la planeación y prospectiva de la infraestructura carretera para contar con procesos sólidos y ágiles de terminación de obra y detectar oportunamente las necesidades futuras de la infraestructura carretera” y a la línea de acción 1.5.5 “Aumentar la investigación científica y capacidad tecnológica vinculadas a las necesidades del sector”.

# 1. Análisis del nivel de servicio en carreteras

---

De acuerdo con el Highway Capacity Manual, en el presente estudio se conceptualiza a las carreteras como las vías rurales o suburbanas cuyo tránsito es considerado continuo, y las condiciones geométricas y de operación varían según el tipo, separación central y el número de accesos no controlados.

Para el análisis del nivel de servicio y velocidades de operación en carreteras el “Highway Capacity Manual” considera dos metodologías. Por una parte, se tiene el análisis para las carreteras de dos carriles y por otra, el análisis para las carreteras compuestas por carriles múltiples. Para fines del estudio se contempla la obtención de los niveles de servicio y las velocidades de operación mediante un análisis generalizado.

Con base en el “Highway Capacity Manual 2010”, se determinan el nivel de servicio y la velocidad de operación en que se encuentra operando una carretera. Se toma en cuenta el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA), con su composición vehicular correspondiente, y a partir de éste, se estima el volumen horario de máxima demanda (VHMD), mismo que, dividido entre el Factor horario de máxima demanda (FHMD), constituye el insumo para obtener el volumen de servicio con que cuenta una carretera, el cual permitirá determinar el nivel de servicio y la velocidad de operación en que se encuentra operando una carretera.

## 1.1 Obtención del FHMD (Factor Horario de Máxima Demanda)

El factor horario de máxima demanda sirve para convertir el volumen horario de máxima demanda en el volumen de servicio.

Para la obtención del FHMD se requiere de un aforo vehicular realizado en la zona de estudio, dicho aforo vehicular debe contener el volumen de vehículos que pasan en el lugar de estudio a lo largo de un día, este aforo se divide en intervalos de 15 minutos. En la figura 1.1 se muestra el ejemplo de un aforo vehicular.

*Algunos efectos económicos causados por la reducción de un carril debido a acciones de conservación*

UBICACIÓN: Carretera 1											
PERIODO DE AFORO: 7:00a.m--7:00a.m											
FECHA: 26 de Octubre de 2015											
ORIENTACIÓN: Sur - Norte											
MOVIMIENTO: Ambas direcciones											
Hora	Minutos		Tipo de Vehículo							Subtotal Periodo	Total Hora
	Del :	Al:	A	B	C2	C3	T2S1	T2S2	T3S2		
7	0	15	33	6	10	0	5	0	0	0	54
	15	30	45	6	0	0	1	3	1	0	56
	30	45	40	6	10	0	1	0	0	0	57
	45	0	85	6	6	0	10	2	0	1	110
8	0	15	71	6	12	0	4	0	0	1	94
	15	30	73	6	7	0	3	1	1	0	91
	30	45	50	6	11	0	5	3	0	0	75
	45	0	80	6	9	0	6	4	0	1	106

**Figura 1.1 Aforo vehicular**

Fuente: reproducción del cuadro 2.1 de la Publicación Técnica 525 (Torres, 2018).

Para fines de estudio, este aforo vehicular incluye 2 horas de las 24 horas en que se realizó dicho aforo.

Con la ayuda de estos datos y basándose en la figura 1.1, se procede a determinar el FHMD de la siguiente manera:

Se identifica la hora con mayor flujo vehicular, la cual es de las 7:45 am a las 8:45 am.

El aforo vehicular en esta hora es de 370 vehículos, estos vehículos representan el Volumen Horario de Máxima Demanda (VHMD).

De la hora con mayor flujo vehicular se identifica el volumen máximo en un lapso de 15 minutos, el cual es de 7:45 am a 8:00 am.

El aforo vehicular en estos 15 minutos es de 110 vehículos, estos representan el  $Q_{15max}$  (volumen máximo durante 15 minutos).

Teniendo identificados estos datos se obtiene el FHMD mediante la ecuación:

$$FHMD = VHMD / (4Q_{15max}) \quad (1)$$

Donde:

*FHMD*: Factor horario de máxima demanda.

*VHMD*: Volumen horario de máxima demanda.

$Q_{15max}$ : Volumen máximo durante 15 minutos.

## 1.2 Volumen de servicio

Es el máximo volumen de vehículos que puede transitar sobre una carretera en el lapso de 1 hora.

Con ayuda del FHMD se puede obtener el Volumen de servicio, usando la siguiente expresión:

$$VS = VHMD / FHMD \quad (2)$$

Donde:

*FHMD*: Factor horario de máxima demanda.

*VHMD*: Volumen horario de máxima demanda.

*VS*: Volumen de servicio.

Con la ayuda del Volumen de servicio (*VS*) y el “Manual de Capacidad Vial” de la SCT (1991), es posible obtener el nivel de servicio y las velocidades de operación.

Con ayuda de los datos viales, disponibles en [sct.gob.mx](http://sct.gob.mx):

En caso de no contar con un aforo vehicular se puede recurrir a los datos viales ya mencionados, donde se encuentra información de la carretera (figura 1.2), tal como:

- 1.- LUGAR: Contiene los nombres de los puntos generadores, como son, ciudades, poblaciones y entronques.
- 2.- Km: Kilómetro del punto generador antes referido.
- 3.- TE (Tipo de Estación): Considerando el sentido en que crece el kilometraje de la carretera, el número “1” indica que el aforo fue efectuado antes del punto generador, el “2” que fue realizado en el punto generador y el “3” que el aforo se llevó a cabo después del punto generador.
- 4.- SC (Sentido de Circulación): El número “1” indica que los datos corresponden al sentido de circulación en que crece el cadenamiento del camino, el “2” al sentido en que decrece el kilometraje y el “0” a ambos sentidos.
- 5.- TDPA: Es el tránsito diario promedio anual registrado en el punto generador.

6.- CLASIFICACION VEHICULAR: Se refiere a los tipos de vehículos que integran al tránsito, los cuales son: "A", "B", "C2", "C3", "T3S2", "T3S3" y "T3S2R4".

7.- K': Este factor es útil para determinar el volumen horario de proyecto, el dato que se proporciona es aproximado y se obtuvo a partir de relacionar los volúmenes horarios más altos registrados en la muestra de aforo semanal y el tránsito diario promedio anual.

8.- D (Factor Direccional): Este factor se obtuvo de dividir el volumen de tránsito horario en el sentido de circulación más cargado entre el volumen, en ambos sentidos a la misma hora.

9.- COORDENADAS: Se presentan las coordenadas geográficas del sitio de ubicación del equipo de aforo automático. Adicionalmente, se presentan algunos histogramas de los puntos más representativos de los aforos de muestra semanal que indican la variación en porcentaje de los volúmenes registrados por día de la semana.

6 CARR: Querétaro - San Luis Potosí		CLAVE: 00165												RUTA: MEX-057				AÑO: 2014		
LUGAR	ESTACION				CLASIFICACION VEHICULAR EN PORCIENTO												COORDENADAS			
	KM	TE	SC	TDPA	M	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	OTROS	A	B	C	K'	D	LATITUD	LONGITUD
Querétaro	0.00																			
T. Der. Libramiento de Querétaro	6.28	3	1	42894	0.8	89.6	0.6	3.5	0.9	2.0	1.6	0.2	0.8	90.4	0.6	9.0	0.079	0.505	20.636726	-100.428729
T. Der. Libramiento de Querétaro	6.28	3	2	43695	0.9	88.8	0.6	3.7	1.1	2.1	1.7	0.2	0.9	89.7	0.6	9.7	0.075	0.505	20.636683	-100.428989
T. Izq. Juriquilla	15.63	3	1	29597	0.6	82.5	1.9	10.0	1.5	2.4	0.7	0.3	0.1	83.1	1.9	15.0	0.097	0.513	20.704647	-100.437259
T. Izq. Juriquilla	15.63	3	2	31192	0.4	86.1	0.2	3.1	1.0	4.0	3.0	0.6	1.6	86.5	0.2	13.3	0.071	0.513	20.704646	-100.437262
T. Izq. San Miguel de Allende	28.53	1	1	24423	0.6	79.6	2.0	10.3	1.8	3.6	1.0	0.8	0.3	80.2	2.0	17.8	0.136	0.505	20.809258	-100.448818
T. Izq. San Miguel de Allende	28.53	1	2	23942	0.3	78.4	2.1	10.9	1.9	3.9	1.2	1.0	0.3	78.7	2.1	19.2	0.105	0.505	20.810012	-100.449039
T. Izq. San Miguel de Allende	28.53	3	1	17300	0.8	65.3	3.1	10.4	2.9	11.2	2.7	2.6	1.0	66.1	3.1	30.8	0.070	0.503	20.823907	-100.445706
T. Izq. San Miguel de Allende	28.53	3	2	17514	0.9	61.0	3.3	11.8	3.1	13.0	3.0	2.9	1.0	61.9	3.3	34.8	0.079	0.503	20.823892	-100.445729
Lim. Edos. Term. Oro. Ppia. Gto.	36.70																			
X. C. San José Iturbide - El Arenal	46.83	1	1	17032	1.1	66.9	3.2	4.1	2.9	14.6	2.9	3.4	0.9	68.0	3.2	28.8	0.061	0.502	20.969508	-100.429423
X. C. San José Iturbide - El Arenal	46.83	1	2	17192	1.1	63.0	3.7	4.7	3.3	16.4	3.2	3.5	1.1	64.1	3.7	32.2	0.062	0.502	20.969510	-100.429423
X. C. Ent. San Miguel de Allende - Dr. Mora	61.93	1	1	14295	2.0	63.0	5.2	7.4	3.3	11.2	4.6	2.4	0.9	65.0	5.2	29.8	0.072	0.519	21.077291	-100.513120
X. C. Ent. San Miguel de Allende - Dr. Mora	61.93	1	2	15449	2.6	59.9	5.3	7.8	3.5	12.4	4.8	2.6	1.1	62.5	5.3	32.2	0.070	0.519	21.077303	-100.513104
X. C. San Luis de La Paz - Guanajuato	86.68	1	1	12503	1.1	69.0	4.2	5.3	2.5	12.6	2.6	2.2	0.5	70.1	4.2	25.7	0.074	0.506	21.282189	-100.591727
X. C. San Luis de La Paz - Guanajuato	86.68	1	2	12810	1.1	66.2	4.6	5.7	2.9	13.4	3.1	2.5	0.5	67.3	4.6	28.1	0.076	0.506	21.282188	-100.591724
T. Izq. San Diego de La Unión	119.07	3	1	10061	2.4	66.3	3.6	5.2	3.6	11.6	4.1	2.3	0.9	68.7	3.6	27.7	0.053	0.509	21.539109	-100.746055
T. Izq. San Diego de La Unión	119.07	3	2	9716	1.3	63.9	3.9	5.4	4.1	13.2	4.4	2.7	1.1	65.2	3.9	30.9	0.064	0.509	21.539105	-100.746055

Figura 1.2 Datos Viales de la SCT

Fuente: Datos viales SCT 2015.

Con la ayuda del Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) y el factor k' se puede obtener el volumen de servicio con el cual opera cualquier carretera referida en los datos viales (ecuación 3). Al ser una aproximación de los volúmenes horarios más altos queda a consideración si es necesario el dividirlo por el Factor Horario de Máxima Demanda (FHMD), proporcionado en el "Manual de Capacidad Vial".

$$VS = TDPA * K' \quad (3)$$

Donde:

VS: Volumen de servicio.

TDPA: Tránsito diario promedio anual.

$K'$ : Factor  $K'$

Al contar con la clasificación vehicular y el volumen de servicio en el que opera una carretera es posible determinar los niveles de servicio y las velocidades de operación en carreteras.



## **2. Nivel de servicio con base en el Highway Capacity Manual 2010**

---

El manual “Highway Capacity 2010” ejemplifica la forma de calcular el nivel de servicio para las siguientes alternativas:

- Carretera de dos carriles
- Carretera de carriles múltiples

Del manual de capacidad de carreteras “*Highway Capacity Manual 2010*”, se estima el nivel de servicio en que se encuentra operando una carretera. Se toma en consideración el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA), con su composición vehicular correspondiente y, a partir de éste, se estima el volumen horario de máxima demanda que se requiere como insumo para obtener el volumen de servicio con que cuenta la carretera actual.

Para el análisis de carreteras en el “*Highway Capacity Manual 2010*” se tienen diferentes metodologías, éstas se dividen según las características de la carretera, mismas que pueden variar en el análisis de uno y dos o más carriles por sentido.

### **2.1 Análisis del nivel de servicio, considerando un carril por sentido**

Existen tres tipos de carretas de dos carriles (I, II, III) con las cuales se calcula el nivel de servicio de diferentes maneras. En la tabla 2.1 se muestra una comparativa de lo necesario para determinar el nivel de servicio en cada una de éstas, en esta misma tabla se explican las características de las diferentes clases de carreteras asociadas a su nivel de servicio.

**Tabla 2.1 Nivel de servicio para carreteras de 2 carriles**

NS	Carreteras de clase I		Clase II	Clase III
	Velocidad promedio km/h	Tiempo de seguimiento (%)	Tiempo de seguimiento (%)	% de Velocidad de flujo libre
A	88	35	40	91.7
B	80-88	35-50	40-55	83.3-91.7
C	72-80	50-65	55-70	75.0-83.3
D	64-72	65-80	70-85	66.7-75.0
E	64	80	85	66.7

Fuente: reproducción del cuadro 3.1 de la Publicación Técnica 525 (Torres, 2018).

Para comparar las características de la tabla anterior se aplica el procedimiento siguiente:

Se determina la velocidad de flujo libre con base en la expresión:

$$FFS = BFFS - fLS - fA \quad (4)$$

Donde:

*FFS*= Velocidad de flujo libre, estimada en km/h

*BFFS*= Velocidad de flujo base (km/h)

*fLS*=Ajuste por ancho de carril y acotamiento (km/h)

*fA*=Ajuste por densidad de puntos de acceso.

En la tabla 2.2 se muestra el factor de ajuste por ancho de carril y ancho de acotamiento, el cual se requiere en la ecuación 4.

**Tabla 2.2 Factor de ajuste por ancho de carril y acotamiento**

Ancho de carril (m)	Acotamiento (m)			
	0>0.6	0.6<1.2	1.2<1.8	>1.8
2.7<3	10.3	7.7	5.6	3.5
>3<3.3	8.5	5.9	3.8	1.7
>3.3<3.6	7.5	4.9	2.8	0.7
>3.6	6.8	4.2	2.1	0

Fuente: reproducción del cuadro 3.2 de la Publicación Técnica 525 (Torres, 2018).

El factor de ajuste por densidad de puntos de acceso se obtiene de la tabla 2.3, el cual es utilizado en la ecuación 4.

**Tabla 2.3 Ajuste por número de puntos de acceso por km**

Puntos de acceso por km	Reducción en FFS km/h
0	0
6	4
12	8
18	12
24	16

Fuente: reproducción del cuadro 3.3 de la Publicación Técnica 525 (Torres, 2018).

La velocidad promedio de viaje se determina con la velocidad de flujo libre, tomada de la ecuación 4, y se determina con la ecuación 5.

$$ATS_d = FFS - 0.00776(V_{d,ATS} + V_{o,ATS}) - f_{np,ATS} \quad (5)$$

Donde:

$ATS_d$  = Velocidad promedio de viaje en la dirección de análisis (Km/h)

$FFS$  = Velocidad de flujo libre (Km/h)

$V_{d,ATS}$  = Tasa de flujo para ATS determinado en la dirección de análisis (veh/h)

$V_{o,ATS}$  = Tasa de flujo para ATS determinado en dirección opuesta al análisis (veh/h)

$f_{np,ATS}$  = Factor de ajuste para ATS de acuerdo a las zonas de no rebase en la dirección de análisis.

Con la velocidad promedio de viaje se puede obtener el nivel de servicio de las carreteras de dos carriles tipo "I".

Para determinar el nivel de servicio de las carreteras tipo "II" se procede de la siguiente manera:

Se parte de la expresión 6 que representa la tasa de flujo.

$$V_{i,ATS} = \frac{V_i}{PHF * f_{g,ATS} * f_{HV,ATS}} \quad (6)$$

Donde:

$V_{i,ATS}$  = tasa de flujo estimada para ATS i (veh/h).

$i$  = "d" (análisis en una dirección) o "o" (dirección opuesta).

$V$  = volumen Horario por dirección i (veh/h).

$PHF$  = factor de hora pico.

$f_{g,ATS}$  = factor de ajuste por pendiente.

$f_{HV,ATS}$  = factor de ajuste por vehículos pesados.

Se obtiene el factor de hora pico, el cual representa la variación del flujo vehicular en una hora. En carreteras de dos carriles, el análisis se basa en una tasa de flujo para un periodo de 15 minutos dentro de la hora pico. El PHF debe ser medido en campo o se utilizará el valor de 1.0 cuando no se cuente con éste.

Una variable en la expresión para determinar la tasa de flujo, es el factor de ajuste por vehículos pesados, el cual se determinó con la ecuación 7.

$$f_{HV,ATS} = \frac{1}{1 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1)} \quad (7)$$

Donde:

$E_T, E_R$  = Equivalente en vehículos de pasajeros para camiones y autobuses, y para vehículos recreacionales respectivamente.

$P_T, P_R$  = Proporción de camiones y autobuses, y vehículos recreacionales respectivamente, en el flujo vehicular, expresado como decimal.

$f_{HV,ATS}$  = Factor de ajuste por vehículos pesados.

El equivalente en vehículos de pasajeros y autobuses, y vehículos recreacionales, se obtiene de la tabla 2.4.

**Tabla 2.4 Equivalente de pasajeros y autobuses y para vehículos recreacionales**

Flujo en veh/h	Plano	Lomerío
100	1.9	2.7
200	1.5	2.3
300	1.4	2.1
400	1.3	2
500	1.2	1.8
600	1.1	1.7
700	1.1	1.6
800	1.1	1.4
900	1	1.3
<b>Todos los flujos</b>	<b>1</b>	<b>1.1</b>

Fuente: reproducción del cuadro 3.4 de la Publicación Técnica 525 (Torres, 2018).

Se determina el porcentaje de tiempo empleado en seguimiento con la ecuación:

$$PTSF_d = BPTSF_d + f_{np}, PTSF \left( \frac{V_d, PTSF}{V_d, PTSF + V_o, PTSF} \right) \quad (8)$$

Donde:

$PTSF_d$  = Porcentaje de tiempo empleado en seguimiento para la dirección de análisis (expresado en decimales).

$BPTSF_d$  = Porcentaje base de tiempo empleado en seguimiento en la dirección de análisis.

$f_{np,PTSF}$  = Factor de ajuste de zonas de no rebase para PTSF en el segmento de análisis.

$V_d,PTSF$  = Tasa de flujo en la dirección de análisis para el PTSF (veh/h)

$V_o,PTSF$  = Tasa de flujo en la dirección opuesta al análisis para el PTSF (veh/h).

Para determinar el tiempo empleado en seguimiento, es necesario determinar el tiempo empleado en seguimiento base, el cual se obtiene con la ecuación 9.

$$BPTSF = 100 [1 - \exp(-0.000879V_i)] \quad (9)$$

Donde:

$BPTSF$  = Porcentaje base de tiempo empleado en seguimiento en la dirección de análisis.

$V_i$  = Tasa de flujo

Con el tiempo empleado en seguimiento es posible determinar el nivel de servicio en carreteras de 2 carriles de clase I y II.

El factor de ajuste para zonas de no rebase se obtiene de la figura 2.1.

FLUJO EN DOS DIRECCIONES DOS DIRECCIONES	% DE ZONAS DE NO REBASE					
	0	20	40	60	80	100
<b>DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL50/50</b>						
200	0	10.1	17.2	20.2	21	21.8
400	0	12.4	19	22.7	23.8	24.8
600	0	11.2	16	18.7	19.7	20.5
800	0	9	12.3	14.1	14.5	15.4
1400	0	3.6	5.5	6.7	7.3	7.9
2000	0	1.8	2.9	3.7	4.1	4.4
2600	0	1.1	1.6	2	2.3	2.4
3200	0	0.7	0.9	1.1	1.2	1.4
<b>DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL60/40</b>						
200	1.6	11.8	17.2	22.5	23.1	23.7
400	0.5	11.7	16.2	20.7	21.5	22.2
600	0	11.5	15.2	18.9	19.8	20.7
800	0	7.6	10.3	13	13.7	14.4
1400	0	3.7	5.4	7.1	7.6	8.1
2000	0	2.3	3.4	3.6	4	4.3
2600	0	0.9	1.4	1.9	2.1	2.2
<b>DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL70/30</b>						
200	2.8	13.4	19.1	24.8	25.2	25.5
400	1.1	12.5	17.3	22	22.6	23.2
600	0	11.6	15.4	19.1	20	20.9
800	0	7.7	10.5	13.3	14	14.6
1400	0	3.8	5.6	7.4	7.9	8.3
2000	0	1.4	4.9	3.5	3.9	4.2
<b>DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL80/20</b>						
200	5.1	17.5	24.3	31	31.3	31.6
400	2.5	15.8	21.5	27.1	27.6	28
600	0	14	18.6	23.2	23.9	24.5
800	0	9.3	12.7	16	16.5	17
1400	0	4.6	6.7	8.7	9.1	9.5
2000	0	2.4	3.4	4.5	4.7	4.9
<b>DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL90/10</b>						
200	5.6	21.6	29.4	37.2	37.4	37.6
400	2.4	19	25.6	32.2	32.5	32.8
600	0	16.3	21.8	27.2	27.6	28
800	0	10.9	14.8	18.6	19	19.4
1400	0	5.5	7.8	10	10.4	10.7

**Figura 2.1 Factor de ajuste para zonas de no rebase**

Fuente: reproducción del cuadro 3.5 de la Publicación Técnica 525 (Torres, 2018).

La expresión para determinar el nivel de servicio en las carreteras de dos carriles tipo III requiere el porcentaje de la velocidad de flujo libre, el cual se obtiene de la ecuación 10.

$$PFFS = ATS_d / FFS \quad (10)$$

Donde:

ATS= Velocidad promedio de viaje

FFS= Velocidad de flujo libre.

Los resultados obtenidos de promedio de velocidad de viaje, porcentaje de tiempo empleado en seguimiento y el porcentaje de la velocidad de flujo libre se comparan con los datos de la tabla 2.1 para así obtener el nivel de servicio de la carretera para las situaciones sin y con proyecto.

## 2.2 Análisis del nivel de servicio, considerando carriles múltiples

Para calcular el nivel de servicio en carreteras de carriles múltiples es necesario conocer la velocidad de flujo libre.

La velocidad a flujo libre, es la velocidad media de los vehículos ligeros, medida durante flujos bajos a moderados hasta 1,000 vehículos ligeros/hora/carril.

La velocidad de flujo libre (FFS) puede ser determinada por medición directa en campo o por estimación indirecta a partir de una velocidad a flujo libre base.

La primera, se realiza en un segmento representativo en las horas con flujos bajos o moderados, midiendo velocidades de al menos 100 vehículos, tomados indistintamente en todos los carriles.

En el segundo caso, es posible estimarla a partir de la velocidad a flujo libre base (BFFS) que debe ser ajustada para tener en cuenta las características reales del segmento tales como: ancho de carril, distancia libre lateral derecha y densidad del total de puntos de acceso.

Con la ecuación 11 se obtiene la velocidad de flujo libre.

$$FFS = BFFS - f_{LW} - f_{LC} - f_M - f_A \quad (11)$$

Donde:

$BFFS$ = Velocidad de flujo libre base.

$f_{LW}$ = Factor de ajuste por ancho de carril.

$f_{LC}$ =Factor de ajuste por distancia libre lateral

$f_M$  = Factor de ajuste por tipo de faja separadora.

$f_A$ =Ajuste por puntos de acceso.

El factor de ajuste  $f_{LW}$ , asociado al ancho de carril, se determina dependiendo del ancho de carril de la vía, de acuerdo a los valores que se muestran en la tabla 2.5.

**Tabla 2.5 Ajuste de velocidad en función del ancho de carril**

Ancho de carril en m	Reducción en km/h
3.6	0
3.5	1
3.4	2.1
3.3	3.1
3.2	5.6
3.1	8.1
3	10.6

Fuente: reproducción del cuadro 3.6 de la Publicación Técnica 525 (Torres, 2018).

El factor de ajuste por distancia libre lateral  $f_{LC}$ , se determina a partir de la distancia que existe entre el hombro de la vía y los obstáculos laterales. Si la distancia de cada uno de los hombros al obstáculo lateral es mayor de 1.8 m se debe considerar este valor, es decir, la suma de la distancia a ambos lados no excederá de 3.6 m, tal y como se muestra en la tabla 2.6.

La reducción de velocidad estará en función del número de carriles con que cuente la vía.

**Tabla 2.6 Ajuste de velocidad debido a la distancia libre lateral**

4 Carriles		6 Carriles	
Distancia lateral en m	Reducción en km/h	Distancia lateral en m	Reducción en km/h
3.6	0	3.6	0
3	0.6	3	0.6
2.4	1.5	2.4	1.5
1.8	2.1	1.8	2.1
1.2	3	1.2	2.7
0.6	5.8	0.6	4.5
0	8.7	0	6.3

Fuente: reproducción del cuadro 3.7 de la Publicación Técnica 525 (Torres, 2018).

El factor de ajuste en la velocidad por tipo de faja separadora  $f_M$  depende del elemento que separa ambos sentidos de circulación de la vía, como se muestra en la tabla 2.7.

**Tabla 2.7 Ajuste por tipo de faja separadora**

Tipo de separación	Reducción en km/h
Carreteras sin separación	2.6
Carreteras divididas	0

Fuente: reproducción del cuadro 3.8 de la Publicación Técnica 525 (Torres, 2018).

Ajuste por puntos de acceso,  $f_A$ . La reducción de velocidad para este caso, toma en consideración el número de accesos por kilómetro que tiene la vialidad. La magnitud de dicha reducción está en función de la cantidad de accesos identificados de acuerdo a los valores que se indican en la tabla 2.8.

**Tabla 2.8 Ajuste de la velocidad debido al número de accesos**

Puntos de acceso por km	Reducción en km/h
0	0
6	4
12	8
18	12
24	16

Fuente: reproducción del cuadro 3.9 de la Publicación Técnica 525 (Torres, 2018).

Después de estimar la velocidad de flujo libre, se determina la tasa de flujo con la ecuación 12.

$$V_P = \frac{V}{PHF * N * f_{HV} * f_p} \quad (12)$$

Donde:

$V_p$  = Tasa de flujo equivalente en condición base (veh/h/carril)

$V$  = Volumen horario (veh/h)

$PHF$  = Factor de hora pico

$N$  = Número de carriles

$f_{HV}$  = Factor de ajuste por vehículos pesados

$f_p$  = Factor de ajuste por tipo de conductor

### Factor de Hora Pico

Este factor representa la variación del flujo vehicular en una hora, en carreteras de carriles múltiples el rango típico del PHF es de 0.75 a 0.95. PHF más bajos son característicos de carreteras rurales. PHF más altos, corresponden a condiciones urbanas.

### Ajuste por vehículos pesados

El factor de ajuste por vehículos pesados ( $f_{HV}$ ) se determina con la ecuación 13.

$$fHV = \frac{1}{1 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1)} \quad (13)$$

Donde:

$E_T$ ,  $E_R$  = Equivalente en vehículos ligeros para camiones y autobuses, y vehículos recreacionales respectivamente, por tipo de terreno, cuya equivalencia se muestra en la tabla 2.9.

$P_T$ ,  $P_R$  = Proporción de camiones y autobuses, y vehículos recreacionales respectivamente, expresado en forma decimal.

$fHV$  = Factor de ajuste por vehículos pesados.

**Tabla 2.9 Equivalente de vehículos pesados**

<b>Factor</b>	<b>Plano</b>	<b>Lomerío</b>	<b>Montañoso</b>
$E_T$	1.5	2.5	4.5
$E_R$	1.2	2	4

Fuente: reproducción del cuadro 3.10 de la Publicación Técnica 525 (Torres, 2018).

El factor de ajuste por tipo de conductor  $f_p$  se refiere a la influencia de la población conductora, ya que los conductores cotidianos conducen con mayor eficiencia en las carreteras que aquellos que no están familiarizados con ella. El valor oscila entre 0.85 y 1.00 en la mayoría de los casos.

Cuando no existe evidencia documentada sobre este valor, se emplea usualmente el valor de 1.00 para el análisis de capacidad vial.

Una vez estimadas la velocidad de flujo libre y la tasa de flujo, y con apoyo de la tabla 2.10, es posible determinar el nivel de servicio en el cual se encuentra operando la carretera en estudio.

**Tabla 2.10 Nivel de servicio para carreteras con carriles múltiples**

FFS	Criterio	A	B	C	D	E
<b>100 km/h</b>	Densidad	7	11	16	22	25
	Vel. Prom.	100	100	98.4	91.5	88
	V <sub>p</sub>	700	1100	1575	2015	2200
<b>90 km/h</b>	Densidad	7	11	16	22	26
	Vel. Prom.	90	90	89.8	84.7	80.8
	V <sub>p</sub>	630	990	1435	1860	2100
<b>80 km/h</b>	Densidad	7	11	16	22	27
	Vel. Prom.	80	80	80	77.6	74.1
	V <sub>p</sub>	560	880	1280	1705	2000
<b>70 km/h</b>	Densidad	7	11	16	22	28
	Vel. Prom.	70	70	70	69.6	67.9
	V <sub>p</sub>	490	770	1120	1530	1900

Fuente: reproducción del cuadro 3.11 de la Publicación Técnica 525 (Torres, 2018).

Al determinar el nivel de servicio, es posible conocer la velocidad de operación promedio en que está operando la vía. Dicha velocidad es la que se utiliza para estimar los tiempos de recorrido y los costos de operación del flujo usuario. Al comparar los tiempos de recorrido y los costos de operación entre las alternativas con proyecto y sin proyecto, es posible estimar los beneficios debidos a los ahorros en tiempo, así como los relativos a los costos de operación vehicular.

Este proceso debe repetirse de forma iterativa, a lo largo del horizonte económico del proyecto, con objeto de estimar el flujo de beneficios que deberán considerarse en la estimación de los indicadores de rentabilidad económica.

## 2.3 Estimación de las velocidades de operación

Las velocidades de los vehículos pesados se determinaron multiplicando el promedio de la velocidad por un factor de ajuste, obtenido de la división de la velocidad del vehículo del cual se quiere obtener la velocidad en condiciones ideales entre la velocidad del vehículo tipo “A”, también en condiciones ideales. Estas velocidades fueron obtenidas de la publicación técnica No 407, con lo que se obtuvieron los siguientes factores de ajuste para las diferentes velocidades (tabla 2.11).

**Tabla 2.11 Factor de ajuste para convertir la velocidad del vehículo ligero en velocidad de vehículo pesado**

Tipo de vehículo	Velocidad en condiciones ideales km/h	Factor de ajuste
A	85	1.000
B	80	0.941
C2	69	0.812
C3	65	0.765
T3S2	73	0.859
T3S3	65	0.765
T3S2R4	54	0.635

Fuente: Elaboración propia con base en la publicación técnica No. 407 Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2014.

Se tomó como referencia la publicación técnica No 407, “Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2014” para las siete configuraciones vehiculares representativas de México.

### 3. Ejemplo de caso

---

Para ejemplificar algunos de los efectos significativos ocasionados por el cierre de un carril en una carretera, derivados de acciones de conservación y/o modernización de la vía, se realizó una medición de velocidades en la carretera 57 México-Querétaro el día 26 de septiembre de 2023 de 9:00 a 9:15 am en el km 133+100 de la localidad de Polotitlán, Estado de México (tabla 3.1).

Las velocidades se midieron en ambos sentidos (sentido 1, México-Querétaro y sentido 2, Querétaro-México), con una pistola de radar.

La autopista 57 México-Querétaro cuenta con un nivel de servicio B en ese sitio [*Capacidad y niveles de servicio en la Red Federal de Carreteras (2022)*] y las velocidades promedio obtenidas, para cada uno de los vehículos en el sentido 1 (México-Querétaro), son las que se muestran en la tabla 3.2.

Algunos efectos económicos causados por la reducción de un carril debido a acciones de conservación

**Tabla 3.1 Mediciones realizadas**

Vialidad: Autopista 57 México-Querétaro													
Tramo:													
Sitio: km 133+100						Fecha: 26 de septiembre de 2023							
Hora de inicio: 9:00 h			Latitud:			Hora de término: 9:15 h			Longitud:				
Operador de pistola:						Límite de Velocidad: 110 km/h							
Observaciones:													
Sentido 1						Sentido 2							
Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código	Vel (km/h)	Código		
1	78	T3-S2-R4	72	T3-S2-R4	99	Autobús	1	85	T3-S3	95	Autobús	95	Autobús
2	98	T3-S3	83	T3-S2	86	T3-S2	2	104	T3-S3	70	T3-S2-R4	78	T3-S2
3	89	T3-S2	128	Automóvil	83	T3-S2	3	96	T3-S2-R4	106	Automóvil	91	Automóvil
4	90	C3	99	T3-S2-R4	96	T3-S2	4	78	T3-S2-R4	127	Automóvil	114	Automóvil
5	112	C2	95	T3-S3	97	T3-S2	5	94	T3-S2	105	Automóvil	87	Automóvil
6	115	VAN	93	T3-S3	91	T3-S2	6	94	Automóvil	95	Autobús	99	Autobús
7	107	Automóvil	84	C2	95	Automóvil	7	85	C2	94	T3-S2	72	C3
8	97	Autobús	99	Autobús	130	Automóvil	8	99	T3-S2	103	T3-S2	99	T3-S2
9	75	T3-S2-R4	107	Automóvil	139	Automóvil	9	100	Automóvil	104	VAN	72	T3-S2
10	79	T3-S3	84	C3	97	Automóvil	10	99	Automóvil	120	Automóvil	99	Autobús
11	100	T3-S2	87	T3-S2	95	T3-S2	11	94	Autobús	102	Automóvil	105	Automóvil
12	95	C3	127	Automóvil	90	T3-S3	12	90	T3-S2	102	Automóvil	124	Automóvil
13	82	C2	101	Automóvil	96	Automóvil	13	94	VAN	103	Automóvil	113	Automóvil
14	100	Autobús	135	Automóvil	97	T3-S2-R4	14	90	T3-S2-R4	83	T3-S2	117	Automóvil
15	128	VAN	131	Automóvil	99	Automóvil	15	87	Automóvil	124	Automóvil	87	T3-S2
16	113	Automóvil	79	C2	89	T3-S2	16	82	C3	135	Automóvil	130	Automóvil
17	107	T3-S2-R4	79	C2	90	Automóvil	17	86	T3-S2	130	Automóvil	126	Automóvil
18	85	T3-S3	136	Automóvil	90	Automóvil	18	97	Automóvil	105	T3-S2	138	Automóvil
19	86	T3-S2	89	Automóvil	94	T3-S2	19	99	Automóvil	77	Automóvil	87	T3-S2
20	89	C3	79	C2	92	C2	20	96	T3-S3	101	VAN	99	T3-S2
21	76	C2	80	VAN	90	C2	21	130	Automóvil	110	T3-S3	89	T3-S2-R4
22	100	Autobús	78	Automóvil	93	Automóvil	22	131	Automóvil	117	Automóvil	109	Automóvil
23	123	VAN	119	Automóvil	99	T3-S2	23	78	C3	133	Automóvil	102	Automóvil
24	141	Automóvil	120	Automóvil	82	T3-S3	24	92	C3	88	Automóvil	97	Autobús
25	121	T3-S2-R4	76	C2	83	Automóvil	25	58	VAN	115	Automóvil	105	T3-S2
26	110	T3-S2	79	T3-S3	92	T3-S2	26	120	T3-S2-R4	109	Automóvil	108	T3-S2
27	126	T3-S2	72	C3	102	Automóvil	27	84	T3-S2	89	T3-S2	94	T3-S3
28	127	Automóvil	99	C2	140	Automóvil	28	121	VAN	95	T3-S2	86	Autobús
29	91	C2	105	Automóvil	130	Automóvil	29	114	C3	125	T3-S2	99	T3-S2
30	78	VAN	88	Automóvil	117	Automóvil	30	88	T3-S2-R4	90	Automóvil	71	T3-S2-R4
31	102	T3-S2-R4	87	T3-S3	92	T3-S2	31	81	Automóvil	112	Automóvil	105	T3-S2
32	108	T3-S2	96	C2	95	Automóvil	32	78	T3-S2	87	T3-S3	120	Automóvil
33	148	VAN	107	Autobús	128	Automóvil	33	80	Automóvil	86	Autobús	134	Automóvil
34	100	C3	109	Automóvil	116	Automóvil	34	90	Automóvil	125	Automóvil	96	T3-S2
35	155	Automóvil	97	T3-S2	140	Automóvil	35	76	Automóvil	126	Automóvil	99	Automóvil
36	79	C2	90	Autobús	141	Automóvil	36	74	Automóvil	106	C3	103	VAN
37	103	T3-S2-R4	124	Automóvil	96	T3-S2-R4	37	67	T3-S2	116	Automóvil	106	Automóvil
38	89	T3-S2-R4	90	T3-S2	140	Automóvil	38	71	T3-S2	126	Automóvil	116	Automóvil
39	120	VAN	94	C3	99	T3-S3	39	74	Automóvil	112	Automóvil	86	T3-S2
40	105	T3-S3	92	Automóvil	100	T3-S3	40	67	T3-S2	92	T3-S2	133	Automóvil
41	133	C3	97	T3-S2-R4	104	Automóvil	41	79	T3-S2-R4	108	Automóvil	117	Automóvil
42	134	T3-S3	98	Automóvil	113	Automóvil	42	70	T3-S2	78	T3-S2	82	T3-S2-R4
43	108	Autobús	98	T3-S3	99	T3-S3	43	73	Automóvil	108	Automóvil	84	T3-S3
44	123	C2	100	T3-S3	135	Automóvil	44	78	T3-S3	116	Automóvil	85	C3
45	75	T3-S2-R4	92	T3-S2	138	Automóvil	45	79	T3-S2	96	T3-S2-R4	86	Automóvil
46	86	T3-S3	82	T3-S2	100	T3-S2	46	92	T3-S3	116	Automóvil	93	Autobús
47	92	Autobús	75	T3-S3	101	Automóvil	47	90	C3	109	Automóvil	85	Automóvil
48	126	Automóvil	132	Automóvil	97	T3-S3	48	72	T3-S2	133	Automóvil	100	T3-S2
49	83	C3	80	T3-S3	97	T3-S2-R4	49	132	Automóvil	122	T3-S2	76	T3-S2
50	102	T3-S2	82	T3-S2	122	T3-S2-R4	50	115	Automóvil	78	Automóvil	99	T3-S2-R4

  

Códigos:	M	A	B	C2	C3	S2/T2S2	S3	Full	Ma	CR	O
Tipo de Vehículo:	Motocicletas	Ligeros	Autobuses	Camión unitario	Camión unitario	Simplemente articulado T-S	Simplemente articulado T-S	Doblemente articulado T-S-R	Madrina	Articulados	Otros
Vehículos incluidos:	Motocicletas	Automóviles	De dos ejes	De 2 ejes	De 3 ejes	T3S2-S2	T3S3-S3	T3S2R4	Vehículos que transportan autos	Camión Unitario Remolque	Tractores-T3/T2
	Motonetes	Vans	De tres ejes			T2S2-T2S2					Cuatinetas o similares
	Cuatrimotos	Pick-ups									Vehículos especiales

Fuente: Elaboración propia, con base en las lecturas tomadas.

**Tabla 3.2 Velocidades promedio en el sentido 1**

Tipo de vehículo	Velocidad promedio km/h
A	115.10
B	99.11
C2	89.13
C3	93.33
T3S2	95.19
T3S3	93.05
T3S2R4	93.43

Fuente: Elaboración propia, con base en las mediciones realizadas.

Con base en el HCM 2010 y considerando las condiciones mostradas en la tabla 3.3 se procede a realizar el análisis correspondiente, debido al cierre de un carril por la ejecución de acciones de conservación y/o modernización de un tramo de esta vía. Ante esta situación, la vialidad dispone de dos carriles por sentido.

**Tabla 3.3 Información base con dos carriles**

Características de la carretera	
FHMD	0.905
Velocidad de proyecto(km/h)	110
Carriles por sentido	2
Ancho de carril (m)	3.00
Distancia libre lateral (m)	1.80
Tipo de terreno	Plano
Volumen Horario por sentido 1	2,100
Composición (A, B, C, R) (%)	61, 3, 36, 0
Tipo de separación	Dividida
Número de accesos por kilómetro	1
Tipo de conductores	familiarizados

Fuente: Elaboración propia.

La velocidad de flujo libre se obtiene a partir de la ecuación 11:

$$FFS = BFFS - f_{LW} - f_{LC} - f_M - f_A \quad (11)$$

Donde:

$FFS$ = Velocidad de flujo libre.

$BFFS$ = Velocidad de flujo libre base.

$f_{LW}$ = Factor de ajuste por ancho de carril.

$f_{LC}$ =Factor de ajuste por distancia libre lateral.

$f_M$  = Factor de ajuste por tipo de faja separadora.

$f_A$ =Ajuste por puntos de acceso.

La velocidad de flujo base es igual a la velocidad de proyecto, por lo tanto,  $BFFS=110\text{km/h}$ .

El factor de ajuste por efecto de ancho de carril se determina a partir de la tabla 2.5 (capítulo 2 de esta publicación):

La carretera cuenta con un ancho de carril de 3.00 m, por lo tanto,  $f_{LW}=10.6 \text{ km/h}$ .

El Factor de ajuste por distancia libre lateral se obtiene de la tabla 2.6 (capítulo 2 de esta publicación):

Como la carretera es de dos carriles por sentido y cuenta con una distancia libre lateral de 1.8 m,  $f_{LC}= 2.1$ .

Como es una carretera dividida,  $f_M=0$  (tabla 2.7 del capítulo 2 de esta publicación).

El factor de ajuste por puntos de acceso se obtiene de la tabla 2.8 (capítulo 2 de esta publicación):

Como la carretera tiene 1 acceso por kilómetro,  $f_A= 0.67$ .

Al haber obtenido los factores de ajuste por las condiciones de la carretera se tiene que:

$$FFS=110 \text{ km/h}-10.6 \text{ km/h}-2.1 \text{ km/h}-0 \text{ km/h}-0.67 \text{ km/h}$$

$$FFS=96.63 \text{ km/h}$$

Después de obtener la velocidad de flujo libre se obtiene la tasa de flujo, la cual se determina con la ecuación 12:

$$V_p = \frac{V}{PHF * N * fHV * f_p} \quad (12)$$

Donde:

$V_p$  = Tasa de flujo equivalente en condición base (veh/h/carril).

$V$  = Volumen horario (veh/h).

$PHF$  = Factor de hora pico.

$N$  = Número de carriles.

$fHV$  = Factor de ajuste por vehículos pesados.

$f_p$  = Factor de ajuste por tipo de conductor.

De la fórmula anterior el único dato que desconocemos es el  $fHV$  = Factor de ajuste por vehículos pesados, el cual se determina con la ecuación 13:

$$fHV = \frac{1}{1 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1)} \quad (13)$$

Donde:

$E_T, E_R$  = Equivalente en vehículos de pasajeros para camiones y autobuses, y para vehículos recreacionales, respectivamente, por tipo de terreno.

$P_T, P_R$  = Proporción de camiones y autobuses, y vehículos recreacionales, respectivamente, expresado en forma decimal.

Para obtener la equivalencia de vehículos pesados a vehículos ligeros se utiliza la tabla 2.9 (capítulo 2 de esta publicación):

Al tener un porcentaje de vehículos pesados de 39% y un terreno plano se tiene que,  $fHV=0.84$ .

Entonces,

Sabiendo que el factor horario de máxima demanda es ( $PHF$ )=0.905, que se tienen 2 carriles por sentido ( $N$ )=2, que el factor de ajuste por efecto de vehículos pesados es ( $fHV$ )=0.84 y que el tipo de conductores en esta carretera es familiarizado:

$$V_p = 2,100 / (0.905 * 2 * 0.84 * 1)$$

$$V_p = 1,382 \text{ vphpc}$$

Son 1,382 vehículos por hora por carril.

Al conocer  $V_p$  y sabiendo que la velocidad de flujo libre (*FFS*) es 96.63 km/h, se utiliza la tabla 2.10 (capítulo 2 de esta publicación) para obtener el nivel de servicio y la velocidad de operación de los vehículos ligeros.

Al ingresar con los datos obtenidos en la tabla 2.10 se tiene que, el nivel de servicio en esta carretera es "C".

Interpolando la tasa de flujo y la velocidad promedio se tiene que, la velocidad de operación de los vehículos ligeros es de 89.82 km/h.

Con la obtención de la velocidad de operación de los vehículos ligeros, se calcula la velocidad de operación de los diferentes vehículos que conforman el TDPA (Tránsito Diario Promedio Anual) de la carretera, aplicando los factores de ajuste contenidos en la tabla 2.11 (capítulo 2 de esta publicación):

Tomando en cuenta que la velocidad de operación de los vehículos ligeros es de 89.82 km/h, se tiene que las velocidades de los diferentes vehículos que conforman el TDPA son los referidos en la tabla 3.4:

**Tabla 3.4 Velocidades de operación de los diferentes tipos de vehículos que transitan por la carretera de carriles múltiples**

Tipo de vehículo	Factor de ajuste	Velocidad km/h
A	1.000	89.82
B	0.941	84.52
C2	0.812	72.93
C3	0.765	68.71
T3S2	0.859	77.16
T3S3	0.765	68.71
T3S2R4	0.635	57.04

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, la carretera cuenta con un nivel de servicio "C" y las velocidades de operación obtenidas en la tabla anterior.

Como se puede observar en el ejemplo realizado, al cerrar un carril en un tramo de la carretera, por acciones de conservación y/o modernización, el

nivel de servicio, así como las velocidades de operación de los diferentes vehículos que conforman el tránsito de la misma, disminuyen.

Ahondando un poco más en el párrafo anterior, es importante enfatizar que, al cerrar un carril de la carretera analizada, por acciones de conservación y/o modernización, el nivel de servicio de la vía pasó de “B” a “C”. Esto quiere decir, que la congestión de vehículos aumentó en los dos carriles que quedaron en operación en el tramo, reduciendo su velocidad y afectando la calidad y comodidad del viaje de los usuarios.

Analizando la información de la carretera con dos carriles operando, por el cierre de un carril, se tiene que, la circulación en la misma es de 1,382 vehículos por hora por carril, o lo que es lo mismo, 2,764 vehículos por hora transitando en los dos carriles. Asimismo, se sabe que la composición vehicular es de 61% de automóviles, 3% de autobuses y 36% de camiones.

Entonces, de los 1,382 vehículos por hora por carril, 843 son automóviles, 41 autobuses y 498 camiones.

Suponiendo que, de los 498 camiones, las configuraciones fueran las siguientes: 49 camiones C2, 89 camiones C3, 113 T3-S2, 134 T3-S3 y 113 T3-S2-R4.

Para ejemplificar la importancia del valor del tiempo de los usuarios que viajan y que se enfrentan a situaciones de conservación y/o modernización de uno o varios tramos de una carretera, se supondrá también un tramo en reparación de 30 km de recorrido (en este caso, se consideró el tramo que va del km 116 al km 146 de la autopista 57 México-Querétaro, realizando un aforo vehicular de las 9:00 h a las 9:15 h en el km 133+100 del poblado de Polotitlán, Estado de México.

Ahora bien, en el boletín NOTAS 201 del IMT, se menciona que para el valor del tiempo de los usuarios de una carretera “...es recomendable utilizar el estimado nacional de \$60.39/h cuando los proyectos de infraestructura carretera constituyan parte de un eje carretero nacional o un tramo de alguna red de transporte en la que confluyan usuarios de largo itinerario”.

En función de lo anterior, y utilizando las velocidades de operación obtenidas, se tiene que los tiempos de recorrido estimados y el valor del tiempo del viaje para cada tipo de vehículo, son los siguientes:

**Automóvil:**

Tiempo de recorrido:

Tres carriles			Dos carriles		
	Km	Horas		Km	Horas
Velocidad	115.10	1	Velocidad	89.82	1
	30	0.261		30	0.334

Valor del tiempo:

Tres carriles		Dos carriles	
(\$)	Horas	(\$)	Horas
60.39	1	60.39	1
15.762	0.261	20.170	0.334

Diferencia en el valor del tiempo del viaje:

$$\$20.170 - \$15.762 = \$4.408/\text{veh}$$

Tiempo de recorrido y diferencia en el valor del tiempo del viaje para los demás vehículos, en el tramo en reparación:

**Autobús:**

Tiempo de recorrido:

Tres carriles: 0.303 h                      Dos carriles: 0.355 h

Diferencia en el valor del tiempo del viaje:

$$\$21.438 - \$18.298 = \$3.140/\text{veh}$$

**Camión de dos ejes C2:**

Tiempo de recorrido:

Tres carriles: 0.337 h                      Dos carriles: 0.411 h

Diferencia en el valor del tiempo del viaje:

$$\$24.820 - \$20.351 = \$4.470/\text{veh}$$

**Camión de tres ejes:**

Tiempo de recorrido:

Tres carriles: 0.321 h                      Dos carriles: 0.437 h

Diferencia en el valor del tiempo del viaje:

$$\$26.390 - \$19.385 = \$7.005/\text{veh}$$

**Tractocamión T3-S2:**

Tiempo de recorrido:

Tres carriles: 0.315 h                      Dos carriles: 0.389 h

Diferencia en el valor del tiempo del viaje:

$$\$23.492 - \$19.023 = \$4.469/\text{veh}$$

**Tractocamión T3-S3:**

Tiempo de recorrido:

Tres carriles: 0.322 h                      Dos carriles: 0.437 h

Diferencia en el valor del tiempo del viaje:

$$\$26.390 - \$19.446 = \$6.944/\text{veh}$$

**Tractocamión T3-S2-R4:**

Tiempo de recorrido:

Tres carriles: 0.321 h                      Dos carriles: 0.526 h

Diferencia en el valor del tiempo del viaje:

$$\$31.765 - \$19.385 = \$12.380/\text{veh}$$

La tabla 3.5 muestra la diferencia existente en los tiempos de recorrido de los diferentes tipos de vehículos que circulan en un carril, cuando en el tramo de la vialidad se ha cerrado un carril por motivos de conservación y/o modernización.

**Tabla 3.5 Tiempo perdido por el cierre de un carril**

<b>Vehículos</b>	<b>Tiempo perdido/vehículo, t(min)</b>	<b>Veh/h/carril</b>	<b>Tiempo perdido/todos los vehículos, t(min)</b>	<b>Tiempo perdido/todos los vehículos, t(h)</b>
A	4.38	843	3,692.34	61.54
B	3.12	41	127.92	2.13
C2	4.44	49	217.56	3.63
C3	6.96	89	619.44	10.32
T3-S2	4.44	113	501.72	8.36
T3-S3	6.90	134	924.60	15.41
T3-S2-R4	12.30	113	1,389.90	23.17
		1,382	7,473.48	124.56

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la tabla anterior, los vehículos que más tiempo pierden de manera individual son el T3-S2-R4, el camión de tres ejes C3 y el T3-S3; seguidos por el T3-S2, el camión de dos ejes C2 y el automóvil, así como del autobús.

Por el número de vehículos que transitan, los que registran más tiempo perdido en conjunto son los automóviles (61.54 h), seguidos de los tractocamiones T3-S2-R4 (23.17 h) y T3-S3 (15.41 h), así como del camión de tres ejes C3 (10.32 h) y el T3-S2 (8.36 h), el camión de dos ejes C2 (3.63 h) y, por último, los autobuses (2.13 h).

El tiempo perdido por hora de circulación, para todos los vehículos en un carril (1,382) es de 124.56 horas. Por lo que, para los dos carriles el tiempo perdido será de 249.12 horas. En un día, el tiempo perdido por todos los vehículos en el tramo significa 5,978.88 horas.

Por lo que se refiere al valor del tiempo de viaje, la tabla 3.6 ofrece el costo en pesos (\$) para cada tipo de vehículo, y para el grupo en su conjunto, en un carril para el tramo en estudio.

**Tabla 3.6 Valor del tiempo de viaje por el cierre de un carril**

Vehículos	Costo en el tramo/vehículo, (\$)	Veh/h/carril	Costo en el tramo/todos los vehículos, (\$)
A	4.41	843	3,715.94
B	3.14	41	128.74
C2	4.47	49	219.03
C3	7.01	89	623.45
T3-S2	4.47	113	505.00
T3-S3	6.94	134	930.50
T3-S2-R4	12.38	113	1,398.94
		1,382	7,521.59

Fuente: Elaboración propia.

De manera similar a la tabla 3.5, para el caso del valor del tiempo, el mayor costo en el tiempo de viaje de manera individual lo asumen el T3-S2-R4, el camión de tres ejes C3 y el T3-S3, seguidos por el T3-S2, el camión de dos ejes C2, el automóvil y el autobús.

De acuerdo al volumen de vehículos que transitan en la vía, el mayor costo en el tiempo de viaje está representado por los automóviles (3,715.94 pesos), seguido de los T3-S2-R4 (1,398.94 pesos), los T3-S3 (930.50 pesos), los camiones de tres ejes C3 (623.45 pesos), los T3-S2 (505.00 pesos), los camiones de dos ejes C2 (219.03 pesos) y los autobuses (128.74 pesos).

El valor del tiempo de viaje por hora de todos los vehículos que circulan en un carril (1,382) es de 7,521.59 pesos. Para el total de vehículos (2,764) que circulan por hora en la carretera, el valor del tiempo de viaje es de 15,043.18 pesos y, en un día, el valor del tiempo de viaje en el tramo asciende a 361,036.32 pesos.

En relación con las velocidades de operación de los vehículos se puede decir que, si un T3-S2-R4 que circula a 100 km/h tiene un rendimiento promedio de combustible de 2.57 km/l, para este tipo de vehículo en el ejemplo de este trabajo, a una velocidad de 93.43 km/h (con los tres carriles de circulación disponibles), tendría un rendimiento promedio de 2.40 km/l y a una velocidad de 57.04 km/h (con dos carriles de circulación disponibles) tendría un rendimiento promedio de 1.47 km/l. Esto quiere decir que, al disponer la carretera de un carril menos de circulación, el rendimiento de combustible en el tramo sería de 0.93 km/l o lo que es lo mismo 930 metros/l menos. Asimismo, el consumo de combustible para este tipo de vehículo se incrementaría 7.91 litros en el tramo en reparación. En un T3-S3, que circula a una velocidad también de 100 km/h y tiene un rendimiento promedio de combustible de 2.86 km/l,

para el ejemplo de este estudio a las velocidades de 93.05 km/h y 68.71 km/h (con tres y dos carriles disponibles en la carretera, respectivamente), el rendimiento de combustible sería de 2.66 km/l y de 1.97 km/l, en cada caso. Lo anterior implica que, al cerrar un carril en la vía, el rendimiento de combustible en el tramo sería de 0.69 km/l menos y el incremento en el consumo de combustible sería de 3.95 litros, para este tipo de vehículo.

De la misma forma, se estiman los rendimientos de combustible para los demás tipos de vehículos. Un T3-S2 que transita a una velocidad de 100 km/h tiene un rendimiento promedio de combustible de 3.00 km/l. A las velocidades calculadas en este trabajo de 95.19 km/h y 77.16 km/h, con tres y dos carriles disponibles en la carretera; respectivamente, el rendimiento de combustible sería de 2.86 km/l y de 2.31 km/l. En consecuencia, el rendimiento de combustible sería de 0.55 km/l menos para este vehículo en el tramo. Para un camión de tres ejes C3, que recorre la vialidad a una velocidad de 100 km/h, el rendimiento de combustible promedio es de 4.45 km/l. Por lo que, a la velocidad de 93.33 km/h, corresponde un rendimiento de combustible de 4.15 km/l y, a la velocidad de 68.71 km/h de 3.06 km/l, lo que significa un menor rendimiento de combustible de 1.09 km/l.

Un camión de dos ejes C2 que viaja a una velocidad de 100 km/h tiene un rendimiento de combustible promedio de 5.05 km/l. Para las velocidades de 89.13 km/h y de 72.93 km/h el rendimiento de combustible promedio sería de 4.50 km/l y 3.68 km/l, respectivamente. Lo anterior, representa un rendimiento de combustible menos de 0.82 km/l en el tramo.

En el caso de un autobús, que marcha a 100 km/h y que tiene un rendimiento promedio de combustible de 3.00 km/l, el rendimiento de combustible para las velocidades obtenidas en este documento, de 99.11 km/h y 84.52 km/h, sería de 2.97 km/l y 2.54 km/l, respectivamente. Siendo el rendimiento de combustible en el tramo, de 0.43 km/l menos.

Finalmente, para un automóvil que circula a 100 km/h y que tiene un rendimiento de combustible promedio de 10 km/l, el rendimiento de combustible sería de 11.51 km/l y 8.98 km/l para las velocidades de operación de 115.10 km/h y 89.82 km/h estimadas en el ejercicio. De tal manera que, el rendimiento de combustible disminuye en 2.53 km/l.

Lo anteriormente descrito para cada unidad, así como los menores rendimientos de combustible para todos los vehículos que circulan en un carril por hora, se resume en la tabla 3.7, del cual se estima que, el rendimiento de combustible para todos los vehículos que viajan en la

carretera es de 5,094.62 km/l menos por hora y de 122,270.88 km/l menos por día.

**Tabla 3.7 Rendimiento de combustible de los vehículos por el cierre de un carril**

Vehículos	Menor rendimiento de combustible/vehículo, (km/l)	Veh/h/carril	Menor rendimiento de combustible/todos los vehículos, (km/l)
A	2.53	843	2,132.79
B	0.43	41	17.63
C2	0.82	49	40.18
C3	1.09	89	97.01
T3-S2	0.55	113	62.15
T3-S3	0.69	134	92.46
T3-S2-R4	0.93	113	105.09
		1,382	2,547.31

Fuente: Elaboración propia.

El incremento en el consumo de combustible por hora en el tramo, para los vehículos que van en la carretera, tanto individualmente como en conjunto en un carril, se presenta a continuación. De la información contenida en la tabla 3.8, el incremento en el consumo de combustible para todos los vehículos que transitan en la carretera es de 5,384.76 litros por hora y de 129,234.24 litros por día.

**Tabla 3.8 Incremento en el consumo de combustible de los vehículos por el cierre de un carril**

Vehículos	$\Delta$ en el consumo de combustible/vehículo, (l)	Veh/h/carril	$\Delta$ en el consumo de combustible/todos los vehículos, (l)
A	0.73	843	615.39
B	1.71	41	70.11
C2	1.48	49	72.52
C3	2.57	89	228.73
T3-S2	2.50	113	282.50
T3-S3	3.95	134	529.30
T3-S2-R4	7.91	113	893.83
		1,382	2,692.38

Fuente: Elaboración propia.

Haciendo el mismo análisis para el sentido 2 y considerando las velocidades promedio obtenidas para los diferentes vehículos (tabla 3.9), así como las condiciones establecidas en la tabla 3.3, los resultados son los siguientes:

**Tabla 3.9 Velocidades promedio en el sentido 2**

Tipo de vehículo	Velocidad promedio km/h
A	108.12
B	93.90
C2	85.00
C3	89.88
T3S2	90.00
T3S3	92.22
T3S2R4	88.17

Fuente: Elaboración propia, con base en las mediciones realizadas.

La tabla 3.10 muestra la diferencia existente en los tiempos de recorrido de los diferentes tipos de vehículos que circulan en un carril, cuando en el tramo de la vialidad se ha cerrado un carril por motivos de conservación y/o modernización.

**Tabla 3.10 Tiempo perdido por el cierre de un carril**

Vehículos	Tiempo perdido/vehículo, t(min)	Veh/h/carril	Tiempo perdido/todos los vehículos, t(min)	Tiempo perdido/todos los vehículos, t(h)
A	3.42	843	2,883.06	48.05
B	2.16	41	88.56	1.48
C2	3.48	49	170.52	2.84
C3	6.18	89	550.02	9.17
T3-S2	3.36	113	379.68	6.33
T3-S3	6.72	134	900.48	15.01
T3-S2-R4	11.16	113	1,261.08	21.02
		1,382	6,233.40	103.90

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la tabla anterior, los vehículos que más tiempo pierden de manera individual son el T3-S2-R4, el T3-S3 y el camión de tres ejes C3; seguidos por el camión de dos ejes C2 y el automóvil, así como por el T3-S2 y el autobús.

Por el número de vehículos que transitan, los que registran más tiempo perdido en conjunto son los automóviles (48.05 h), seguidos de los tractocamiones T3-S2-R4 (21.02 h) y T3-S3 (15.01 h), así como del camión de tres ejes C3 (9.17 h) y el T3-S2 (6.33 h), el camión de dos ejes C2 (2.84 h) y, por último, los autobuses (1.48 h).

El tiempo perdido por hora de circulación, para todos los vehículos en un carril (1,382) es de 103.90 horas. Por lo que, para los dos carriles el tiempo perdido será de 207.80 horas. En un día, el tiempo perdido por todos los vehículos en el tramo significa 4,987.20 horas.

Por lo que se refiere al valor del tiempo de viaje, la tabla 3.11 ofrece el costo en pesos (\$) para cada tipo de vehículo, y para el grupo en su conjunto, en un carril para el tramo en estudio.

**Tabla 3.11 Valor del tiempo de viaje por el cierre de un carril**

<b>Vehículos</b>	<b>Costo en el tramo/vehículo, (\$)</b>	<b>Veh/h/carril</b>	<b>Costo en el tramo/todos los vehículos, (\$)</b>
A	3.44	843	2,899.92
B	2.17	41	88.97
C2	3.50	49	171.50
C3	6.22	89	553.58
T3-S2	3.38	113	381.94
T3-S3	6.76	134	905.84
T3-S2-R4	11.23	113	1,268.99
		1,382	6,270.74

Fuente: Elaboración propia.

De manera similar a la tabla 3.10, para el caso del valor del tiempo, el mayor costo en el tiempo de viaje de manera individual lo asumen el T3-S2-R4, el T3-S3 y el camión de tres ejes C3, seguidos por el camión de dos ejes C2, el automóvil, el T3-S2, y el autobús.

De acuerdo al volumen de vehículos que transitan en la vía, el mayor costo en el tiempo de viaje está representado por los automóviles (2,899.92 pesos), seguido de los T3-S2-R4 (1,268.99 pesos), los T3-S3 (905.84 pesos), los camiones de tres ejes C3 (553.58 pesos), los T3-S2 (381.94 pesos), los camiones de dos ejes C2 (171.50 pesos) y los autobuses (88.97 pesos).

El valor del tiempo de viaje por hora de todos los vehículos que circulan en un carril (1,382) es de 6,270.74 pesos. Para el total de vehículos (2,764) que circulan por hora en la carretera, el valor del tiempo de viaje es de 12,541.48 pesos y, en un día, el valor del tiempo de viaje en el tramo asciende a 300,995.52 pesos.

En relación con las velocidades de operación de los vehículos se puede decir que, si un T3-S2-R4 que circula a 100 km/h tiene un rendimiento promedio de combustible de 2.57 km/l, para este tipo de vehículo en el ejemplo de este trabajo, a una velocidad de 88.17 km/h (con los tres

carriles de circulación disponibles), tendría un rendimiento promedio de 2.27 km/l y a una velocidad de 57.04 km/h (con dos carriles de circulación disponibles) tendría un rendimiento promedio de 1.47 km/l. Esto quiere decir que, al disponer la carretera de un carril menos de circulación, el rendimiento de combustible en el tramo sería de 0.80 km/l o lo que es lo mismo 800 metros/l menos. Asimismo, el consumo de combustible para este tipo de vehículo se incrementaría 7.19 litros en el tramo en reparación. En un T3-S3, que circula a una velocidad también de 100 km/h y tiene un rendimiento promedio de combustible de 2.86 km/l, para el ejemplo de este estudio a las velocidades de 92.22 km/h y 68.71 km/h (con tres y dos carriles disponibles en la carretera, respectivamente), el rendimiento de combustible sería de 2.64 km/l y de 1.97 km/l, en cada caso. Lo anterior implica que, al cerrar un carril en la vía, el rendimiento de combustible en el tramo sería de 0.67 km/l menos y el incremento en el consumo de combustible sería de 3.87 litros, para este tipo de vehículo.

De la misma forma, se estiman los rendimientos de combustible para los demás tipos de vehículos. Un T3-S2 que transita a una velocidad de 100 km/h tiene un rendimiento promedio de combustible de 3.00 km/l. A las velocidades calculadas en este trabajo de 90.00 km/h y 77.16 km/h, con tres y dos carriles disponibles en la carretera; respectivamente, el rendimiento de combustible sería de 2.70 km/l y de 2.31 km/l. En consecuencia, el rendimiento de combustible sería de 0.39 km/l menos para este vehículo en el tramo. Para un camión de tres ejes C3, que recorre la vialidad a una velocidad de 100 km/h, el rendimiento de combustible promedio es de 4.45 km/l. Por lo que, a la velocidad de 89.88 km/h, corresponde un rendimiento de combustible de 4.00 km/l y, a la velocidad de 68.71 km/h de 3.06 km/l, lo que significa un menor rendimiento de combustible de 0.94 km/l.

Un camión de dos ejes C2 que viaja a una velocidad de 100 km/h tiene un rendimiento de combustible promedio de 5.05 km/l. Para las velocidades de 85.00 km/h y de 72.93 km/h el rendimiento de combustible promedio sería de 4.29 km/l y 3.68 km/l, respectivamente. Lo anterior, representa un rendimiento de combustible menos de 0.61 km/l en el tramo.

En el caso de un autobús, que marcha a 100 km/h y que tiene un rendimiento promedio de combustible de 3.00 km/l, el rendimiento de combustible para las velocidades obtenidas en este documento, de 93.90 km/h y 84.52 km/h, sería de 2.82 km/l y 2.54 km/l, respectivamente. Siendo el rendimiento de combustible en el tramo, de 0.28 km/l menos.

Finalmente, para un automóvil que circula a 100 km/h y que tiene un rendimiento de combustible promedio de 10 km/l, el rendimiento de

combustible sería de 10.81 km/l y 8.98 km/l para las velocidades de operación de 108.12 km/h y 89.82 km/h estimadas en el ejercicio. De tal manera que, el rendimiento de combustible disminuye en 1.83 km/l.

Lo anteriormente descrito para cada unidad, así como los menores rendimientos de combustible para todos los vehículos que circulan en un carril por hora, se resume en la tabla 3.12, del cual se estima que, el rendimiento de combustible para todos los vehículos que viajan en la carretera es de 3,783.94 km/l menos por hora y de 90,814.56 km/l menos por día.

**Tabla 3.12 Rendimiento de combustible de los vehículos por el cierre de un carril**

Vehículos	Menor rendimiento de combustible/vehículo, (km/l)	Veh/h/carril	Menor rendimiento de combustible/todos los vehículos, (km/l)
A	1.83	843	1,542.69
B	0.28	41	11.48
C2	0.61	49	29.89
C3	0.94	89	83.66
T3-S2	0.39	113	44.07
T3-S3	0.67	134	89.78
T3-S2-R4	0.80	113	90.40
		1,382	1,891.97

Fuente: Elaboración propia.

El incremento en el consumo de combustible por hora en el tramo, para los vehículos que van en la carretera, tanto individualmente como en conjunto en un carril, se presenta a continuación. De la información contenida en la tabla 3.13, el incremento en el consumo de combustible para todos los vehículos que transitan en la carretera es de 4,650.16 litros por hora y de 111,603.84 litros por día.

**Tabla 3.13 Incremento en el consumo de combustible de los vehículos por el cierre de un carril**

Vehículos	$\Delta$ en el consumo de combustible/vehículo, (l)	Veh/h/carril	$\Delta$ en el consumo de combustible/todos los vehículos, (l)
A	0.56	843	472.08
B	1.17	41	47.97
C2	1.16	49	56.84
C3	2.30	89	204.70
T3-S2	1.88	113	212.44
T3-S3	3.87	134	518.58
T3-S2-R4	7.19	113	812.47
		1,382	2,325.08

Fuente: Elaboración propia.

Como se ha mostrado, lo anterior impacta en los tiempos de recorrido y en el valor del tiempo de viaje de los usuarios para llegar a su destino, así como en los rendimientos y consumos de combustible de los vehículos. Lo anterior, sin incluir el costo por un mayor tiempo de uso y desgaste en las autopartes y neumáticos, entre otros.

Sumado a lo anterior, un mayor tiempo de estancia de los vehículos en la vía ocasiona mayores daños al medio ambiente, estrés en los usuarios, una mayor carga vehicular a los carriles disponibles, etc.

Los resultados alcanzados en este trabajo son para un terreno sensiblemente plano, con las condiciones geométricas de la carretera, así como las del tránsito descritas, el nivel de servicio de la carretera y las velocidades obtenidas de los diferentes vehículos.

En el caso del cierre parcial o total de una carretera, por motivos diferentes a conservación y/o modernización, para evaluar los impactos ocasionados a los usuarios se tendría que considerar otro tipo de variables.

Es importante que los responsables de la planeación y operación de este tipo de infraestructura consideren y establezcan medidas que ayuden a mitigar los efectos mencionados, ya sea programando acciones de conservación y/o modernización en horarios menos transitados y en épocas adecuadas del año, entre otras.

## Conclusiones

---

El estudio realizado permitirá contar con una metodología útil para la obtención de los niveles de servicio en distintos tramos carreteros, con distintas características geométricas, en un horizonte de proyecto determinado; permitiendo a su vez, ligar los niveles de servicio con las velocidades de operación utilizando el Highway Capacity Manual 2010.

Con la visión obtenida con el manual que recomienda el TRB, los analistas de proyectos de infraestructura para el transporte, específicamente en lo que a infraestructura carretera se refiere, podrán contar con una herramienta de ayuda a la toma de decisiones que considera la evolución en la nueva tecnología para la construcción de este tipo de infraestructura, así como los desarrollos tecnológicos que ha experimentado la industria automotriz en las dos últimas décadas.

Este estudio de investigación tiene la intención de proporcionar, por otra parte, elementos de análisis que permitan actualizar los criterios utilizados por los analistas de proyectos de infraestructura carretera, acordes con la evolución que se ha presentado desde el punto de vista tecnológico, tanto en la construcción, modernización, y en general en el mejoramiento de la infraestructura, acorde con los adelantos que ha tenido la industria automotriz en los años recientes.

Finalmente, cabe señalar que esta herramienta metodológica constituye una herramienta práctica de ayuda en la toma de decisiones, para los responsables de fundamentar la justificación económica para el registro de proyectos de inversión de infraestructura carretera ante la autoridad responsable de la asignación de recursos. Además de ser de gran utilidad para llevar a cabo las evaluaciones ex – ante, constituye una buena alternativa para realizar las evaluaciones ex – post de los proyectos, una vez que han sido puestos en operación y poder con ello corroborar tanto por parte de la autoridad encargada de su operación como de la encargada de la asignación de recursos, el impacto proporcionado por este tipo de obras de infraestructura en la población usuaria.



## Bibliografía

---

- Arroyo, J., Aguerrebere R. y Torres, G. (2014). *Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2014*. [Publicación técnica No. 407]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt407.pdf>
- Arroyo, J., Torres, G., González, J. y Hernández, S. (2016). *Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2016*. [Publicación técnica No. 471]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt471.pdf>
- Arroyo, J., Cruz, G., Hernández, S. y Alvarado, G. (2023). *Una estimación de los efectos ocasionados por el cierre de un carril en carreteras*. [Publicación técnica No. 747]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt747.pdf>
- Arroyo, J., Cruz, G., Hernández, S. y Alvarado, G. (2023). *Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2023*. [Publicación técnica No. 756]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt756.pdf>
- Cervini, H. (2006). *Valor Social del Tiempo (versión preliminar)*. Departamento de Economía Aplicada. Universidad Autónoma de Barcelona. [Consulta en línea]. [http://www.ecap.uab.es/jpasqual/materials/valor\\_social\\_tiempo.pdf](http://www.ecap.uab.es/jpasqual/materials/valor_social_tiempo.pdf)
- Comisión Nacional de los Salarios Mínimos [CONASAMI]. (2023). *Salario Mínimo General Promedio*. Comisión Nacional de Salarios Mínimos. [Consulta en línea]. <http://www.conasami.gob.mx>
- Cortés, F. (2003). *El ingreso y la desigualdad en su distribución, México: 1997-2000*. Papeles de Población No. 35. Universidad Autónoma del Estado de México. [Consulta en línea]. <http://papelesdepoblacion.uaemex.mx/pp35/pp35.html>

Diario Oficial de la Federación [DOF]. (2020). *Decreto por el que se aprueba el Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2020-2024*. Edición del jueves 2 de julio de 2020. [Consulta en línea]. [www.dof.gob.mx](http://www.dof.gob.mx)

Gobierno de México (2019). *Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024*. [Consulta en línea]. <https://framework-gb.cdn.gob.mx/landing/documentos/PND.pdf>

González, J., Torres, G., Arroyo, J. y Hernández, S. (2016). *Guía para la obtención de los insumos necesarios para la evaluación económica de proyectos de infraestructura carretera*. [Publicación técnica No. 485]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt485.pdf>

Gwilliam, K. (1995). *The value of time in economic evaluation of transport projects, lessons from recent research in "Infrastructure Notes" No. OT-5*. Transport Sector World Bank. [Consulta en línea]. <http://www.worldbank.org>

Hernández, S., Cruz, G., Alvarado, G. y Arroyo, J. (2023). *Estimación del valor del tiempo de los ocupantes de los vehículos que circulan por la red carretera de México, 2023*. [Boletín NOTAS No. 201]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=573&IdBoletin=202>

Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT]. (1991). *Manual de capacidad vial*. SCT.

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. Subsecretaría de Infraestructura. Dirección General de Servicios Técnicos [DGST]. (2022). *Capacidad y niveles de servicio en la Red Federal de Carreteras (2022)*. SICT.

Torres, G., González, J., Arroyo, J. y Hernández, S. (2015). *Cálculo de la velocidad de operación como insumo para la evaluación económica de proyectos de infraestructura carretera*. [Publicación técnica No. 458]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt458.pdf>

Torres, G., González, J., Arroyo, J. y Hernández, S. (2018). *Estimación de niveles de servicio y velocidades de operación en segmentos de carreteras de dos carriles y carriles múltiples aplicación del*

*Highway Capacity Manual*. [Publicación técnica No. 525]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt525.pdf>

Transportation Research Board. (2010). *Highway Capacity Manual 2010*. Washington D.C.



# COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo"  
San Fandila, Pedro Escobedo  
C.P. 76703  
Querétaro, México  
Tel: +52 442 216 97 77 ext. 2610

[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)

<http://www.imt.mx/>