



---

---

# **ESTIMACIÓN DE NIVELES DE SERVICIO Y VELOCIDADES DE OPERACIÓN EN SEGMENTOS DE CARRETERAS DE DOS CARRILES Y CARRILES MÚLTIPLES APLICACIÓN DEL HIGHWAY CAPACITY MANUAL**

Guillermo Torres Vargas  
José Alejandro González García  
José Antonio Arroyo Osorno  
Salvador Hernández García

**Publicación Técnica No. 525  
Sanfandila, Qro., 2018**







---

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**  
**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**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**  
**Sanfandila, Qro., 2018**

---



Este trabajo fue realizado en el Instituto Mexicano del Transporte por el Dr. Guillermo Torres Vargas, M. en I. José Alejandro González García, M. en I. José Antonio Arroyo Osorno, y M. en I. Salvador Hernández García, de la Coordinación de Economía de los Transportes y Desarrollo Regional.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna OI-07/16 “Estimación de niveles de servicio y velocidades de operación en segmentos de carreteras de dos carriles y carriles múltiples aplicación del “Highway Capacity Manual”.

El presente tiene por objetivo fundamental, proporcionar con la ayuda del “Highway Capacity Manual 2010”, una metodología más apegada a las características actuales para determinar las velocidades de operación de los diferentes tipos de vehículos, así como una herramienta útil para los responsables de la planeación, construcción y modernización de la infraestructura carretera la cual les permita conocer la evolución de las velocidades de operación de los distintos tipos de vehículos, necesarias para estimar los beneficios derivados de los ahorros en costos de operación vehicular y en tiempo de recorrido, indispensables en la determinación de los indicadores de rentabilidad.





# Contenido

---

	Sinopsis	vii
	Abstract	ix
	Resumen ejecutivo	xi
1	Introducción	1
1.1	Objeto de estudio	2
1.2	Justificación	2
1.3	Objetivos	3
1.3.1	Objetivo general	3
1.3.2	Objetivos particulares	3
1.4	Metodología	4
2	Análisis del nivel de servicio en carreteras	5
2.1	Obtención de FHMD (Factor horario de máxima demanda)	5
2.2	Volumen de servicio	6
3	Estimación del nivel de servicio utilizando el Highway Capacity Manual 2010	9
3.1	Análisis del nivel de servicio, considerando un carril por sentido	9
3.2	Análisis del nivel de servicio considerando carriles múltiples.	14
4	Estimación de las velocidades de operación	19
5	Ejemplo del análisis generalizado de niveles de servicio y velocidades de operación para carreteras de dos carriles	21
6	Ejemplo del análisis generalizado de niveles de servicio y velocidades de operación para carreteras de carriles múltiples	29

7	Conclusiones	35
8	Bibliografía	37

# Índice de cuadros

---

CUADRO		PÁGINA
2.1	Aforo vehicular.	5
2.2	Datos viales de la SCT.	8
3.1	Nivel de servicio para carreteras de dos carriles	9
3.2	Factor de ajuste por ancho de carril y acotamiento	10
3.3	Ajuste por número de puntos de acceso	10
3.4	Equivalente de pasajeros y autobuses y para vehículos recreativos	12
3.5	Factor de ajuste por zonas de no rebase	13
3.6	Ajuste de velocidad en función del ancho de carril	15
3.7	Ajuste de velocidad debido a la distancia libre lateral	16
3.8	Ajuste por tipo de faja separadora	16
3.9	Ajuste de velocidad debido al número de puntos de accesos	16
3.10	Equivalente de vehículos pesados	17
3.11	Nivel de servicio para carreteras de carriles múltiples	18
4.1	Factor de ajuste para convertir la velocidad del vehículo ligero en velocidad del vehículo pesado	19



# Sinopsis

---

Con base en el “Higway Capacity Manual 2010”, se dispondrá de elementos para determinar la velocidad de operación ligada a un nivel de servicio en la que opera una carretera determinada.

Se presenta, en primer lugar, el análisis para estimar el nivel de servicio en que se encuentra operando una carretera con base en un volumen de tránsito dado, lo anterior con objeto de conocer el año al que dicha carretera llega a su capacidad máxima.

En segundo lugar, con base en los resultados obtenidos al estimar el nivel de servicio, se obtienen las velocidades de operación asociadas a éstos, con los niveles de servicio y con la ayuda de las publicaciones técnicas del Instituto Mexicano del Transporte No. 407 y 471 “Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano” 2014 y 2016 respectivamente, se obtienen las velocidades de operación para los diferentes tipos de vehículos circulantes en la carretera a estudiar.



# Abstract

---

Based on the "Highway Capacity Manual 2010", elements will be available to determine the speed of operation linked to a service level in which a given road operates.

First, the analysis to estimate the level of service in which a road is operating based on a given volume of traffic is presented. The above in order to know the year in which a road reaches its maximum capacity.

Secondly, based on the results obtained when estimating the service level, the operating speeds associated with them are obtained. With the service levels and with the help of the technical publications of the Mexican Institute of Transportation No. 407 and 471 "Base operating costs of the representative vehicles of interurban transport" 2014 and 2016 respectively, operating speeds are determined for the different types of vehicles that circulate on the road under study.







# Resumen ejecutivo

---

En este documento se presenta un análisis utilizando el *Highway Capacity Manual* (HCM) 2010 para determinar el nivel de servicio y las velocidades de operación de una carretera con un TDPA (Tránsito Diario Promedio Anual) y unas características determinadas.

Con base en la metodología analizada se dispondrá de elementos para determinar la velocidad de operación ligada a un nivel de servicio en la que opera la carretera seleccionada para su análisis.

Asimismo, se presenta la manera de determinar los niveles de servicio y las velocidades de operación de una carretera en un horizonte de 30 años, y con esto se tendrá un insumo con características más apegadas a la realidad para la evaluación económica de proyectos de infraestructura carretera donde el horizonte de evaluación es hasta de 30 años.

Con la obtención de los niveles de servicio ligados a velocidades de operación obtenidos al utilizar el “Highway Capacity Manual 2010” y las publicaciones No 407 y 471 “Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano” 2014 y 2016 respectivamente se obtienen las velocidades de operación para los diferentes tipos de vehículos circulantes en la carretera en estudio

La propuesta metodológica utilizando el HCM 2010, constituye una herramienta complementaria para el análisis Costo-Beneficio de proyectos de inversión de infraestructura carretera, lo cual es de utilidad para los responsables de la toma de decisiones de las distintas áreas operativas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), en particular, y para las distintas áreas operativas del Sector Transporte de los tres niveles de gobierno en general.

Esta metodología también apoya a las autoridades responsables de la asignación de recursos de este tipo de proyectos, en el marco del desarrollo metodológico que se realiza en el contexto internacional, ya que gran cantidad de los países con mayor desarrollo que el de México han ido evolucionando en sus herramientas de análisis para la justificación económica de este tipo de proyectos de infraestructura.





# 1 Introducción

---

El estudio forma parte de la línea de investigación “Desarrollo metodológico para la evaluación económica y social de proyectos de transporte”, la cual está vigente en el Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

En México, la determinación de las velocidades de operación para la evaluación de proyectos de infraestructura carretera se realiza mediante el “Manual de Capacidad Vial de la SCT” basado en la tercera edición del “Highway Capacity Manual 1985”, el cual tiene más de treinta años.

Los diferentes tipos de vehículos, así como la tecnología, van evolucionando a través de los años, por esta razón se considera la determinación de las velocidades de operación con el “Highway Capacity Manual 2010” el cual está más apegado a las características de las carreteras y al tránsito actuales.

La velocidad de operación es fundamental a la hora de realizar una evaluación económica para un proyecto de infraestructura carretera, ya que se requiere conocer la velocidad de operación para la determinación de los insumos como son el valor del tiempo de las personas (usuarios de la infraestructura carretera) y los costos de operación vehicular.

En la evaluación de proyectos de infraestructura carretera en México, la determinación de la velocidad de operación es primordial para el cálculo de los insumos necesarios para la obtención de los ahorros debido a costos de operación vehicular y valor del tiempo de las personas. Con esto es posible estimar los beneficios que tendría al ampliar, modificar o construir una carretera.

La evolución del volumen de tránsito en una carretera es de gran importancia, pues de ella depende el costo de operación vehicular, así como el tiempo de traslado de las personas y las mercancías. Con los costos de operación vehicular y el valor del tiempo de los pasajeros, es posible cuantificar los beneficios derivados por ahorros en costo de operación y en tiempo de recorrido.

Al conocer la evolución del volumen vehicular en una carretera, es posible determinar, para un horizonte de hasta 30 años, el nivel de servicio anual en una carretera y así poder conocer el año en el que dicha carretera alcanza su capacidad máxima.

Conociendo la capacidad máxima de una carretera, se puede prever la saturación de ésta y así realizar planes de mejora para mantener la carretera en un nivel de servicio adecuado para su operación.

Con la ayuda del “Highway Capacity Manual 8HCM) 2010” es posible conocer el nivel de servicio en el que opera una carretera y la velocidad de operación del vehículo ligero, por lo que con la ayuda de las publicaciones No 407 y 471 “Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano” 2014 y 2016 respectivamente, se obtienen las velocidades de operación para los diferentes tipos de vehículos circulantes en la carretera a estudiar.

## **1.1 Objeto de estudio**

El presente trabajo es el resultado de una investigación inscrita dentro de la línea de investigación de Economía de los Transportes. El subtema particular es la evaluación de proyectos de infraestructura carretera y específicamente, se trata proporcionar un conjunto de elementos conceptuales que apoyen a los responsables de la toma de decisiones en la estimación adecuada del nivel de servicio y las velocidades de operación de los diferentes tipos de vehículos que operan en una carretera.

## **1.2 Justificación**

En México, la determinación de las velocidades de operación para la evaluación de proyectos de infraestructura carretera, se realiza mediante el “Manual de Capacidad Vial de la SCT” basado en la tercera edición del “Highway Capacity Manual 1985”, éste último ha sido actualizado en los años 2000 y 2010.

Los diferentes tipos de vehículos, así como la tecnología, van evolucionando a través de los años, por esta razón se considera la determinación de las velocidades de operación con el “Highway Capacity Manual 2010” el cual está más apegado a las características de las carreteras y al tránsito actuales.

El conocimiento de los niveles de servicio y las velocidades de operación con los que operan los diferentes tipos de carreteras que hay en el país, tiene gran relevancia ya que, con base en ello, se pueden planear los trabajos de ampliación, modificación o construcción de infraestructura carretera.

Se espera que los resultados de este proyecto de investigación contribuyan a apoyar a los responsables de la toma de decisiones en la actualización de los parámetros inherentes a las condiciones locales de México y coadyuve a la determinación de los insumos necesarios para la evaluación económica de proyectos de infraestructura carretera con el fin de realizar el registro de este tipo de proyectos ante la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, lo cual permite integrar la cartera anual de proyectos de inversión en infraestructura carretera.

La publicación se propuso de tal manera para proporcionar el modelo de análisis de niveles de servicio y velocidades de operación para cualquier carretera ya sea de uno o más carriles por sentido.

Esta metodología basada en el *Highway Capacity Manual* 2010 ha permitido, a los autores de este estudio, proporcionar un espectro de opciones que orienten a los analistas de proyectos de inversión en infraestructura carretera, para que cuenten con elementos de análisis actualizados, confiables y que den mayor certidumbre a las consideraciones sobre la justificación económica y financiera de dichos proyectos.

Con base en los avances del entorno tecnológico mundial, la metodología utilizada en “ESTIMACIÓN DE NIVELES DE SERVICIO Y VELOCIDADES DE OPERACIÓN EN SEGMENTOS DE CARRETERAS DE DOS CARRILES Y CARRILES MÚLTIPLES: APLICACIÓN DEL *HIGHWAY CAPACITY MANUAL*”, permitirá a los responsables de la toma de decisiones, contar con una herramienta amigable y ágil para estimar los niveles de servicio y las velocidades de operación de los diferentes vehículos que circulan por una carretera.

Esta propuesta toma en cuenta el cálculo de las velocidades de operación en un horizonte de proyecto de hasta 30 años.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

El estudio tiene por objetivo fundamental mostrar una alternativa a la metodología actual con la que se determinan las velocidades de operación y los niveles de servicio de los diferentes vehículos que transitan por una carretera, información que se obtiene con las velocidades máximas de los diferentes tipos de vehículos, consignada en la publicación técnica No. 407 del Instituto Mexicano del Transporte “Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2014” y con ello, obtener un insumo confiable en la determinación de los tiempos de recorrido y de los costos de operación de los diferentes tipos de vehículos.

### **1.3.2 Objetivos particulares**

Como objetivos particulares se tienen los siguientes:

Conocer con la ayuda de aforos vehiculares, el origen del Factor Horario de Máxima Demanda (FHMD) con el cual se maximiza el volumen horario.

Determinar con base en el "Highway Capacity Manual 2010," los niveles de servicio y las velocidades de operación a la cual opera una carretera ya sea de uno o más carriles por sentido.

Obtener de la velocidad de operación de los vehículos ligeros determinada con el "Highway Capacity Manual 2010", las velocidades de operación de los diferentes tipos de vehículos que circulan en una carretera tomando en cuenta los valores máximos sus velocidades, consignados en las publicaciones técnicas No. 407 y 471 "Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano" 2014 y 2016 respectivamente.

## **1.4 Metodología**

Para la realización de este estudio, se analizó el "Highway Capacity Manual 2010" de los Estados Unidos, de donde se toma la metodología propuesta, para determinar los niveles de servicio con los cuales opera una carretera tomando en cuenta las características geométricas de ésta, así como su Tránsito Diario Promedio Anual.

El nivel de servicio es una medida para caracterizar las condiciones de operación del tránsito. Se han establecido seis niveles de servicio denominados: A, B, C, D, E y F, que van del mejor al peor, las medidas para definir estos niveles en carreteras son: para carreteras de carriles múltiples la densidad y, para carreteras de dos carriles, la demora porcentual.

Al obtener los niveles de servicio y la velocidad de operación ligadas a dichos niveles, se procede a determinar las velocidades de operación de los diferentes tipos de vehículos que transitan por dicha carretera con la ayuda de las publicaciones técnicas No. 407 y 471 del Instituto Mexicano del Transporte.



## 2 Análisis del nivel de servicio en carreteras.

Se conceptualizará a las carreteras como las vías rurales o suburbanas cuyo tránsito es considerado continuo, las condiciones geométricas y de operación varían según el tipo de separación central y el número de accesos no controlados.

Para el análisis del nivel de servicio y velocidades de operación en carreteras se toman en cuenta 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 determina el nivel de servicio y la velocidad de operación 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, 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.

### 2.1. 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 el cuadro 2.1 se muestra el ejemplo de un aforo vehicular.

**Cuadro 2.1. Aforo vehicular.**

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	T2S2R2			
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	277	
8	0	15	71	6	12	0	4	0	0	1	94	317	
	15	30	73	6	7	0	3	1	1	0	91	352	
	30	45	50	6	11	0	5	3	0	0	75	370	
	45	0	80	6	9	0	6	4	0	1	106	366	

Fuente: Elaboración propia.

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 el cuadro 2.1, 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 siguiente expresión.

$$FHMD = VHMD / (4 Q_{15m\acute{a}x}) \dots\dots\dots (1)$$

Dónde:

FHMD: Factor horario de máxima demanda.

VHMD: Volumen horario de máxima demanda.

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

## **2.2. Volumen de servicio**

Con la ayuda de un aforo vehicular.

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

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

$$VS = \frac{VHMD}{FHMD} \dots\dots\dots (2)$$

Dónde:

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, es posible obtener el nivel de servicio y las velocidades de operación.

Con la ayuda de los datos viales de la SCT.

En caso de no contar con un aforo vehicular se puede recurrir a los datos viales de la SCT, en donde se puede encontrar información de la carretera 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” “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.

**Cuadro 2.2 Datos Viales de la SCT**

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. Qro. 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

Fuente: Datos viales SCT 2015.

Con la ayuda del Transito 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, al ser una aproximación de los volúmenes horarios más altos queda a consideración si es necesario dividirlo por el FHMD (factor horario de máxima demanda) proporcionado en el "Manual de Capacidad Vial" de la SCT.

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

Dónde:

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.

### 3 Estimación del nivel de servicio utilizando el *Highway Capacity Manual 2010*

---

Con base en el manual “Highway Capacity 2010”, se consideró calcular el nivel de servicio para las siguientes alternativas:

- Carretera de dos carriles
- Carretera de carriles múltiples

Con base en el manual de capacidad de carreteras “*Highway Capacity Manual 2010*”, se procede a estimar 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.

En análisis de carreteras para el “*Highway Capacity Manual 2010*” se tienen diferentes metodologías para analizar una carretera, 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.

#### 3.1 Análisis del nivel de servicio, considerando un carril por sentido.

Existen tres tipos de carreteras de dos carriles (I, II, III) con las cuales se calcula el nivel de servicio de diferentes maneras, en el cuadro 3.1 se muestra una comparativa de lo necesario para determinar el nivel de servicio en cada una de éstas, en este mismo cuadro se explican las características de las diferentes clases de carreteras asociadas a su nivel de servicio.

**Cuadro 3.1 Nivel de servicio para carreteras de 2 carriles.**

	CARRETERAS DE CLASE I		CLASE II	CLASE III
	VEL PROM km/h	TIEMPO DE SEGUIMIENTO (%)	TIEMPO DE SEGUIMIENTO (%)	% DE VELOCIDAD DE FLUJO LIBRE
NS				
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: Elaboración propia con base en el HCM 2010.

Para comparar las características del cuadro anterior se aplica el procedimiento siguiente:

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

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

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 el cuadro 3.2 se muestra el factor de ajuste por ancho de carril y ancho de acotamiento, el cual se requiere en la ecuación 4.

**Cuadro 3.2. 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: Elaboración propia con base en el HCM 2010.

El factor de ajuste por densidad de puntos de acceso se obtiene del cuadro 3.3, el cual es utilizado en la ecuación 4.

**Cuadro 3.3. Ajuste por número de puntos de acceso por Km.**

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

Fuente: Elaboración propia con base en el HCM 2010.

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.

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

Dónde:

ATS<sub>d</sub> = Velocidad promedio de viaje en la dirección de análisis (Km/h)

FFS = Velocidad de flujo libre (Km/h)

V<sub>d,ATS</sub> = Tasa de flujo para ATS determinado en la dirección de análisis (veh/h)

V<sub>o,ATS</sub> = Tasa de flujo para ATS determinado en dirección opuesta al análisis (veh/h)

F<sub>np,ATS</sub> = 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.

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

Donde:

v<sub>i,ATS</sub> = 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<sub>g,ATS</sub> = factor de ajuste por pendiente.

f<sub>HV,ATS</sub> = 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 es basado 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.

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

Donde:

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

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

$f_{hv}$  =Factor de ajuste por vehículos pesados.

El equivalente en vehículos de pasajeros y autobuses y para vehículos recreacionales se obtienen con el cuadro 3.4.

**Cuadro 3.4. Equivalente de pasajeros y autobuses y para vehículos recreacionales**

FLUJO EN veh/h	PLANO	LOMERIO
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
TODOS LOS FLUJOS	1	1.1

Fuente: Elaboración propia con base en el HCM 2010.

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.

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

Donde:

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

Vi=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 del cuadro 3.5.

**Cuadro 3.5. Factor de ajuste para zonas de no rebase**

FLUJO EN DOS DIRECCIONES DOS DIRECCIONES	% DE ZONAS DE NO REBASE					
	0	20	40	60	80	100
DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL50/50						
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
DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL60/40						
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
DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL70/30						
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
DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL80/20						
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
DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL90/10						
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

Fuente: Elaboración propia con base en el HCM 2010.

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

$$P_{FFS} = \frac{ATS_d}{FFS} \dots\dots\dots(10)$$

Dónde:

ATS= Velocidad promedio de viaje

FFS= Velocidad de flujo libre.

Los resultados obtenidos del 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 del cuadro 3.1 para así obtener el nivel de servicio de la carretera para las situaciones sin y con proyecto.

## **3.2 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, calculada durante flujos bajos a moderados hasta 1,000 vehículos/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.

fLW= Factor de ajuste por ancho de carril.

fLC =Factor de ajuste por distancia libre lateral

fM = Factor de ajuste por tipo de faja separadora.

Fa=Ajuste por puntos de acceso.

fLW= Factor de ajuste por ancho de carril.

fLW = Factor de ajuste asociado al ancho de carril. Este factor se determina dependiendo del ancho de carril de la vía de acuerdo a los valores que se muestran en el cuadro 3.6.

**Cuadro 3.6. Ajuste de velocidad en función del ancho de carril.**

ANCHO DE CARRIL	REDUCCIÓN 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: Elaboración propia con base en el HCM 2010.

fLC = Factor de ajuste por distancia libre lateral. Este factor 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 el cuadro 3.7.

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

**Cuadro 3.7. Ajuste de velocidad debido a la distancia libre lateral.**

4 CARRILES		6 CARRILES	
DISTANCIA LATERAL (m)	REDUCCIÓN Km/h	DISTANCIA LATERAL (m)	REDUCCIÓN 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: Elaboración propia con base en el HCM 2010.

fM = Factor de ajuste en la velocidad por tipo de faja separadora. Este factor depende del elemento que separa ambos sentidos de circulación de la vía, como se muestra en el cuadro 3.8.

**Cuadro 3.8. Ajuste por tipo de faja separadora.**

TIPO DE SEPARACIÓN	REDUCCIÓN EN Km/h
CARRETERAS SIN SEPARACIÓN	2.6
CARRETERAS DIVIDIDAS	0

Fuente: Elaboración propia con base en el HCM 2010.

Fa=Ajuste por puntos de acceso. 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 consignan en el cuadro 3.9.

**Cuadro 3.9. 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: Elaboración propia con base en el HCM 2010.

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

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

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 se determina con la ecuación 13.

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

Donde:

$E_T$ ,  $E_R$  = Equivalente en vehículos ligeros para camiones y autobuses y para vehículos recreacionales respectivamente, por tipo de terreno, cuya equivalencia se muestra en el cuadro 3.10.

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

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

**Cuadro 3.10. Equivalente de vehículos pesados.**

FACTOR	PLANO	LOMERIO	MONTAÑOSO
ET	1.5	2.5	4.5
ER	1.2	2	4

Fuente: Elaboración propia con base en el HCM 2010.

F<sub>p</sub> = Este factor 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 en el cuadro 3.11, es posible determinar el nivel de servicio en el cual se encuentra operando la carretera en estudio.

**Cuadro 3.11. Nivel de servicio para carreteras con carriles múltiples.**

FFS	CRITERIO	A	B	C	D	E
100Km/h	DENSIDAD	7	11	16	22	25
	VEL. PROM.	100	100	98.4	91.5	88
	VP	700	1100	1575	2015	2200
90Km/h	DENSIDAD	7	11	16	22	26
	VEL. PROM.	90	90	89.8	84.7	80.8
	VP	630	990	1435	1860	2100
80Km/h	DENSIDAD	7	11	16	22	27
	VEL. PROM.	80	80	80	77.6	74.1
	VP	560	880	1280	1705	2000
70Km/h	DENSIDAD	7	11	16	22	28
	VEL. PROM.	70	70	70	69.6	67.9
	VP	490	770	1120	1530	1900

Fuente: Elaboración propia con base en el HCM 2010.

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.

## **4 Estimación de las velocidades de operación.**

Se determinaron las velocidades de los vehículos pesados multiplicando el promedio de la velocidad por un factor de ajuste, obtenido de la división de la velocidad del vehículo del cual se quiere conseguir 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 determinaron los siguientes factores de ajuste para las diferentes velocidades referenciados en el cuadro 4.1.

**Cuadro 4.1. Factor de ajuste para convertir la velocidad del vehículo ligero en velocidad de vehículo pesado.**

<b>TIPO DE VEHICULO</b>	<b>VELOCIDAD EN CONDICIONES IDEALES km/h</b>	<b>FACTOR DE AJUSTE</b>
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.





## 5 Ejemplo del análisis generalizado de niveles de servicio y velocidades de operación para carreteras de dos carriles

A continuación, se muestra un ejemplo de la aplicación de la metodología para la obtención de los niveles de servicio y las velocidades de operación para carreteras de 2 carriles utilizando el "Highway Capacity Manual 2010"

Características de la carretera a analizar	
Velocidad de proyecto(km/h)	110
Ancho de calzada (m)	6.00
Ancho de corona (m)	7.20
Tipo de terreno	Plano
Restricción a rebases (%)	50
Volumen Horario	350
Distribución direccional (%)	50/50
Composición (A, B, C, R) (%)	80,10,10,0
Factor horario de máxima demanda	0.905
Accesos por km	2

Fuente: Elaboración propia.

Primeramente, se obtiene el FFS (Velocidad de flujo libre).

$$FFS = BFFS - fLS - Fa$$

BFFS, es la velocidad de flujo base, que es la velocidad de proyecto igual a 110 km/h.

El factor de ajuste por ancho de carril y acotamiento en km/h se determina con ayuda del siguiente cuadro:

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

- Ancho de calzada (m).....6.00
- Ancho de Corona (m).....7.20

Por lo tanto,

$$fLS = 5.9$$

El factor de ajuste por densidad de puntos de acceso “Fa” se determina con apoyo del cuadro siguiente:

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

- Accesos por km =2.

Por lo tanto, al realizar la interpolación entre 0 y 6 puntos de acceso se obtiene:

$$fA = 1.3$$

Con los datos anteriores, la velocidad de flujo libre es:

$$FFS = 110 - 5.9 - 1.3$$

$$FFS = 102.8 \text{ km/h}$$

Teniendo calculada la velocidad de flujo libre, se determina la velocidad promedio de viaje con la siguiente expresión:

$$ATSd = FFS - 0.00776(Vs) - fnp, ATS$$

Para resolver la expresión anterior se requiere determinar Vs (volumen de servicio) fnp (factor de ajuste por distribución direccional y zonas de no rebase fnp).

- FFS .....102.8km/h
- Tipo de terreno .....Plano

- Restricción a rebases (%).....40
- Volumen Horario.....350
- Distribución direccional (%).....50/50
- Composición (A, B, C, R) (%).....80, 10, 10, 0
- Factor horario de máxima demanda.....0.905

$$VS = 350 / 0.905 = 387$$

El factor de ajuste por distribución direccional y zonas de no rebase fnp se determina consultando el siguiente cuadro:

FLUJO EN DOS DIRECCIONES DOS DIRECCIONES	% DE ZONAS DE NO REBASE					
	0	20	40	60	80	100
DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL50/50						
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	15	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
DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL60/40						
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
DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL70/30						
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
DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL80/20						
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
DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL90/10						
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

Con los anteriores datos se tiene que el promedio de velocidad de viaje es:

$$ATS_d = 102.8 - 0.00776(387) - 19$$

$$ATS_d = 80.80 \text{ km/h}$$

Con este dato y el siguiente cuadro se puede determinar el nivel de servicio en el que opera la carretera de dos carriles.

	CARRETERAS DE CLASE I		CLASE II	CLASE III
	VEL PROM km/h	TIEMPO DE SEGUIMIENTO (%)	TIEMPO DE SEGUIMIENTO (%)	% DE VELOCIDAD DE FLUJO LIBRE
NS				
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

La carretera de dos carriles que contenga las características anteriormente mencionadas opera con un nivel de servicio:

**NS = B**

Para determinar el nivel de servicio en las carreteras tipo II se utiliza la siguiente expresión:

$$v_{i,ATS} = \frac{V_i}{PHF * f_{g,ATS} * f_{HV,ATS}}$$

Donde:

$V_i$  = Tasa de flujo

$V_i$  = 350 vph (volumen horario)

PHF = 0.905 (factor horario de máxima demanda)

El Factor de ajuste por efecto de vehículos pesados ( $f_{HV}$ ) se determina con la siguiente ecuación:

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

Con la ayuda del cuadro siguiente se obtiene la equivalencia de vehículos pesados a vehículos ligeros:

FLUJO EN veh/h	PLANO	LOMERIO
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
TODOS LOS FLUJOS	1	1.1

Donde para un volumen de 350 vph se tiene que:  
ET = 1.35

Y con un 20% de vehículos pesados se tiene:

$$PT = 0.20$$

Por lo tanto, el factor de ajuste por efecto de vehículos pesados es:

$$f_{HV} = 0.93$$

Al aplicar la ecuación de la tasa de flujo se tiene que la tasa de flujo es la siguiente:

$$V_i = 350 / 0.905 * 1 * 0.93$$

$$V_i = 415 \text{ vph}$$

Una vez determinada la tasa de flujo, se debe obtener el porcentaje de tiempo empleado en seguimiento. Para ello, se requiere conocer el porcentaje base de tiempo empleado en seguimiento con la siguiente ecuación.

$$PTSF_d = BPTSF_d + f_{np,PTSF} \left( \frac{v_{d,PTSF}}{v_{d,PTSF} + v_{o,PTSF}} \right)$$

Donde:

PTSF<sub>d</sub>=Porcentaje de tiempo empleado en seguimiento para la dirección de análisis, en decimal.

BPTSF<sub>d</sub>=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(vl/h)

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

Para determinar el porcentaje base de tiempo empleado en seguimiento se utiliza la siguiente expresión:

$$B_{PTSF} = 100[1 - \exp(-0.000879Vt)]$$

De esta manera se obtiene:

$$B_{PTSF}=100[1 - \exp(-0.000879*415)]$$

$$B_{PTSF}=30.57$$

Para determinar el “factor de ajuste de zonas de no rebase para PTSF en el segmento de análisis”, se utiliza el siguiente cuadro entrando con el flujo de vehículos en ambas direcciones, el porcentaje de rebase restringido en la zona a estudiar y la distribución direccional de vehículos en sentido y en contra sentido del cadenamamiento.

Con los datos mostrados anteriormente se tiene que  $f_{np}=19$ .

5 Ejemplo del análisis generalizado de niveles de servicio y velocidades de operación para carreteras de dos carriles

FLUJO EN DOS DIRECCIONES DOS DIRECCIONES	% DE ZONAS DE NO REBASE					
	0	20	40	60	80	100
DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL50/50						
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
DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL60/40						
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
DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL70/30						
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
DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL80/20						
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
DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL90/10						
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

Como la carretera se analiza en ambas direcciones se tiene que

$$\left( \frac{v_{d,PTSF}}{v_{d,PTSF} + v_{o,PTSF}} \right) = 1$$

Y se procede a determinar el porcentaje de tiempo empleado en seguimiento:

$$PTSF=30.57+19*1=49.57$$

Con este valor y utilizando el cuadro siguiente:

	CARRETERAS DE CLASE I		CLASE II	CLASE III
	VEL PROM km/h	TIEMPO DE SEGUIMIENTO (%)	TIEMPO DE SEGUIMIENTO (%)	% DE VELOCIDAD DE FLUJO LIBRE
NS				
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

Se obtiene un nivel de servicio "B". Al interpolar la velocidad promedio, el tiempo empleado en seguimiento del cuadro y el tiempo empleado en seguimiento obtenido, se obtiene que la velocidad de operación es de 87.77 km/h.

Para las carreteras de dos carriles tipo III se debe determinar el porcentaje de velocidad de flujo libre la cual se obtiene con la siguiente expresión:

$$PFFS = \frac{ATS_d}{FFS}$$

Donde:

PFFS= Porcentaje de velocidad de flujo libre

ATS= Velocidad promedio

FFS= Velocidad de flujo libre

Por lo que para este caso:

$$PFFS = 80.80 / 102.8$$

$$PFFS = 78.60\%$$

Este valor se encuentra entre 75.0 y 83.3 que corresponde a un nivel de servicio "C", al interpolar las velocidades de operación y el porcentaje de velocidad de flujo libre se tiene que la velocidad de operación es de 75.47km/h.



## 6 Ejemplo del análisis generalizado de niveles de servicio y velocidades de operación para carreteras de carriles múltiples

---

A continuación, se muestra un ejemplo de la aplicación de la metodología para la obtención de los niveles de servicio y las velocidades de operación para carreteras de carriles múltiples utilizando el “Highway Capacity Manual 2010”.

Características de la carretera a analizar	
FHMD	0.905
Velocidad de proyecto(km/h)	110
Carriles por sentido	2
Ancho de carril (m)	3.00
Distancia libre lateral (m)	0.60
Tipo de terreno	Plano
Volumen Horario por sentido 1	2100
Composición (A, B, C, R) (%)	80, 10, 10, 0
Tipo de separación	Dividida
Número de accesos por kilómetro	2
Tipo de conductores	familiarizados

La velocidad de flujo libre es obtenida a partir de la ecuación siguiente

$$FFS = BFFS - f_{LW} - f_{LC} - f_M - f_A$$

Donde:

FFS= Velocidad de flujo libre

BFFS= Velocidad de flujo libre base.

fLW= Factor de ajuste por ancho de carril.

fLC =Factor de ajuste por distancia libre lateral

fM = Factor de ajuste por tipo de faja separadora.

fA=Ajuste por puntos de acceso.

La velocidad de flujo base es igual a la velocidad de proyecto, por lo tanto, BFFS=110km/h

El factor de ajuste por efecto de ancho de carril se determina a partir del cuadro

ANCHO DE CARRIL	REDUCCIÓN 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

La carretera cuenta con un ancho de carril de 3.00 m por lo tanto fLW=10.6 km/h

El Factor de ajuste por distancia libre lateral se obtiene del cuadro:

4 CARRILES		6 CARRILES	
DISTANCIA LATERAL (m)	REDUCCIÓN Km/h	DISTANCIA LATERAL (m)	REDUCCIÓN 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

Como la carretera es de dos carriles por sentido y cuenta con una distancia libre lateral de 0.6m fLC= 5.8

Como es una carretera dividida fM=0

El factor de ajuste por puntos de acceso se obtiene del cuadro siguiente:

PUNTOS DE ACCESO POR Km	REDUCCIÓN EN Km/h
0	0
6	4
12	8
18	12
24	16

Como la carretera tiene 2 accesos por kilómetro fA= 1.33

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

FFS=110 km/h-10.6 km/h-5.8 km/h-0 km/h-1.33 km/h

FFS=92.27 km/h

Después de obtener la velocidad de flujo libre se calcula la tasa de flujo, la cual se determina con la siguiente formula:

$$V_p = \frac{V}{PHF \times N \times f_{HV} \times f_p}$$

Donde:

Vp = 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 pesado.

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

De la formula anterior, el único dato que se desconoce es el  $f_{HV}$  = Factor de ajuste por vehículos pesados, el cual se determinó con la siguiente ecuación:

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

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

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

Para obtener la equivalencia de vehículos pesados a vehículos ligeros se utiliza el siguiente cuadro:

FACTOR	PLANO	LOMERIO	MONTAÑOSO
ET	1.5	2.5	4.5
ER	1.2	2	4

Al tener un porcentaje de vehículos pesados de 20% y un terreno plano entonces se tiene que  $f_{HV}=0.91$

Entonces, sabiendo que el factor horario de máxima demanda ( $PHF$ )=0.95, que se tienen 2 carriles por sentido ( $N$ )=2, el factor de ajuste por efecto de vehículos pesados ( $f_{HV}$ )=0.91 y que el tipo de conductores en esta carretera es familiarizado:

$$V_p = 2100 / (0.905 * 2 * 0.91 * 1)$$

$$V_p = 1275 \text{ vphpc}$$

Son 1275 vehículos por hora por carril,

Al conocer  $V_p$  y sabiendo que la velocidad de flujo libre ( $FFS$ ) es 92.27km/h, se utiliza el siguiente cuadro para obtener el nivel de servicio y la velocidad de operación de los vehículos ligeros.

6 Ejemplo del análisis generalizado de niveles de servicio y velocidades de operación para carreteras de carriles múltiples

FFS	CRITERIO	A	B	C	D	E
100Km/h	DENSIDAD	7	11	16	22	25
	VEL. PROM.	100	100	98.4	91.5	88
	VP	700	1100	1575	2015	2200
90Km/h	DENSIDAD	7	11	16	22	26
	VEL. PROM.	90	90	89.8	84.7	80.8
	VP	630	990	1435	1860	2100
80Km/h	DENSIDAD	7	11	16	22	27
	VEL. PROM.	80	80	80	77.6	74.1
	VP	560	880	1280	1705	2000
70Km/h	DENSIDAD	7	11	16	22	28
	VEL. PROM.	70	70	70	69.6	67.9
	VP	490	770	1120	1530	1900

Por lo que al ingresar los datos obtenidos en el cuadro anterior se tiene que el nivel de servicio en esta carretera es "C".

Por lo que al interpolar la tasa de flujo y la velocidad promedio resulta que la velocidad de operación de los vehículos ligeros es de 89.9km/h.



## 7 Conclusiones

---

El presente estudio, permitirá contar con una guía a seguir 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 esto, se pretende proveer de una herramienta amigable a los responsables de la toma de decisiones para la obtención los niveles de servicio y de las velocidades de operación, bajo la óptica del *Highway Capacity Manual 2010*; fundamentales para la obtención de los beneficios derivados de una modificación, ampliación o construcción de infraestructura carretera, los cuales son parte de los insumos necesarios para su análisis costo-beneficio.

Con la estimación de velocidades de operación de los distintos tipos de vehículos que conforman el volumen de tránsito TDPA, el analista de proyectos de inversión contará con elementos suficientes para la estimación de costos de operación vehicular por tipo de vehículo, así como con el tiempo de recorrido de dichos vehículos en las condiciones actuales (sin proyecto) y, en la condición futura de propuesta de modernización (ampliación de sección o de incremento en el número de carriles de circulación), o bien de la construcción de una obra nueva consideradas estas propuestas como la condición futura (con proyecto), ello permitirá obtener los beneficios debidos a los ahorros en costos de operación vehicular y a los ahorros en tiempo de recorrido necesarios para la estimación de los indicadores de rentabilidad económica de este tipo de infraestructura y determinar, a partir de ellos, la factibilidad o viabilidad para llevar a cabo el proyecto de modernización o de construcción de carreteras.

Con la visión obtenida con el manual que actualmente 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, como la modernización y, en general, el mejoramiento de la infraestructura acorde con los adelantos que ha tenido la industria automotriz en años recientes.

Los beneficios podrán ser obtenidos por tipo de vehículo, así como los beneficios totales derivados del proyecto que se pretenda realizar, determinando asimismo los beneficios en forma anualizada y a lo largo del horizonte económico del proyecto.

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 en 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. “Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2014” Publicación técnica N° 407, Instituto Mexicano del Transporte, 2014.

ARROYO J, TORRES G, GOZÁLEZ J, HERNÁNDEZ S. “Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2016” Publicación técnica N° 471, Instituto Mexicano del Transporte, 2016.

CERVINI, Héctor F. Valor Social del Tiempo (versión preliminar), Departamento de Economía Aplicada, Universidad Autónoma de Barcelona.- <[http://www.ecap.uab.es/jpasqual/materials/valor\\_social\\_tiempo.pdf](http://www.ecap.uab.es/jpasqual/materials/valor_social_tiempo.pdf)>

CONASAMI. Salario Mínimo General Promedio, Comisión Nacional de Salarios Mínimos, México, <<http://www.conasami.gob.mx>>

CORTÉS F. El ingreso y la desigualdad en su distribución, México: 1997-2000, Papeles de Población No. 35 enero/marzo 2003. Universidad Autónoma del Estado de México. <<http://papelesdepoblacion.uaemex.mx/pp35/pp35.html> >.

GOZÁLEZ J, TORRES G, ARROYO J, HERNÁNDEZ S. “Guía para la obtención de los insumos necesarios para la evaluación económica de proyectos de infraestructura carretera” Publicación técnica N° 485, Instituto Mexicano del Transporte, 2016.

GWILLIAM, Kenneth. The value of time in economic evaluation of transport projects, lessons from recent research in “Infrastructure Notes” No. OT-5, Transport Sector World Bank, January 1995 <http://www.worldbank.org/transport/publicat/td-ot5.htm>

SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES “Manual de capacidad vial” México, 1991.

TORRES G, GOZÁLEZ J, ARROYO J, HERNÁNDEZ S, “Cálculo de la velocidad de operación como insumo para la evaluación económica de proyectos de infraestructura carretera” Publicación técnica N° 458, Instituto Mexicano del Transporte, 2015

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD “Highway capacity manual 2010” Washington D.C. 2010.



Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado-Galindo”  
Parque Tecnológico San Fandila  
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México  
CP 76703  
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610  
Fax +52 (442) 216 9671

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

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

Esta publicación fue desarrollada en el marco de un sistema de gestión de calidad  
certificada bajo la norma ISO 9001:2015