

Capacidad y niveles de servicio

Transporte por carretera

UdelaR - Facultad de Ingeniería

Emiliano Gómez Páez
egomezpaez@fing.edu.uy

31 de mayo de 2023

1 Capacidad

- Definición y usos
- ¿De qué depende?
- ¿Cuánto vale?

2 Niveles de servicio

- Definición

3 Recursos

- Highway Capacity Manual
- NS en carreteras de dos carriles (2000)
- NS para carreteras de dos carriles - Ejemplo
- NS en carreteras de dos carriles (2022)

1. Capacidad

- **La capacidad de una sección de carretera es el número máximo de vehículos que tienen una probabilidad razonable de atravesar la sección durante un período dado de tiempo (generalmente una hora) en unas condiciones determinadas de carretera y del tráfico.**
- Para alcanzar la capacidad será necesario que haya una demanda de tráfico suficiente en el acceso a la sección y que no exista una sección anterior de menor capacidad, que impida que la intensidad de tráfico se mantenga en la entrada; ni una sección posterior de menor capacidad que de lugar a la formación de una cola de vehículos que llegue a impedir la salida de los mismos de la sección considerada.
- Debido a la fluctuación aleatoria del tráfico pueden presentarse valores muy altos de la intensidad durante períodos muy cortos, por lo que normalmente interesa más definir la capacidad mediante el número de vehículos que pasan durante un período suficientemente largo como para eliminar estas oscilaciones aleatorias, por ejemplo, una hora.

Capacidad: ¿de qué depende?

- La capacidad depende de las condiciones existentes. Estas condiciones se refieren fundamentalmente a las características de la sección (características geométricas, condición del pavimento, etc.) y a las del tráfico (especialmente su composición).
- Además habrá que tener en cuenta las regulaciones de la circulación que existan (limitaciones de velocidad, prohibiciones de adelantamientos, etc.) y que influirán sobre el tráfico.
- Depende también del estilo de conducción del lugar. Conductores más agresivos pueden lograr mayores valores de capacidad.
- Por último, habría que considerar las condiciones ambientales y meteorológicas. Sin embargo se tiene poca experiencia sobre la influencia de estos factores, ya que generalmente es pequeña y sólo en condiciones excepcionales puede llegar a ser importante.
- En este sentido, la capacidad de una sección de carretera podrá alcanzar un valor máximo cuando sus propias condiciones y las del tráfico sean óptimas, lo que corresponde a una capacidad en condiciones ideales.

- Se suele trabajar con la unidad **vehículos de pasajeros (autos) por hora por carril**.
- El valor varía según la bibliografía consultada.
- En los apuntes se presenta una metodología para estimarla (caso carretera con dos o más carriles por sentido):

$$C = 2000 n f_c f_i f_d f_p$$

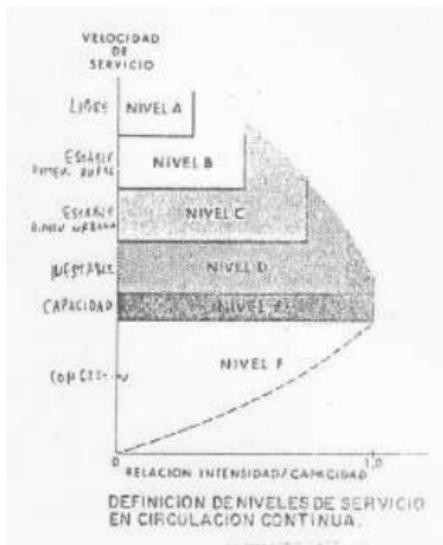
- Se toma como base 2.000 pc/h/carril,
- se multiplica ese valor por la cantidad de carriles (n), y
- se penaliza en función de los anchos de los carriles (f_c), los obstáculos a los márgenes del camino (f_i y f_d) y la composición del tránsito (f_p).
- El HCM propone 1.700 veh/h/carril para carreteras de dos carriles, con un tránsito total máximo de 3.200 veh/h en ambos sentidos.

2. Niveles de servicio

- El nivel de servicio es una medida puramente cualitativa que tiene en cuenta el efecto de varios factores tales como la velocidad y tiempo de recorrido, la seguridad, la comodidad de conducción y los costes de funcionamiento.
- El HCM ha establecido seis niveles de servicios denominados: A, B, C, D, E y F, que van del mejor al peor.
- La manera de combinar estos factores dependerá del tipo o elemento de carretera que se esté considerando, por lo que la definición de cada nivel de servicio particular será distinta, por ejemplo, en intersecciones, en tramos de carreteras de dos carriles, en autopistas, etc.
- En la práctica resulta muy difícil tener en cuenta todos los factores mencionados y por ello el Manual de Capacidad define los niveles de servicio mediante uno o dos factores que pueden medirse y que son los más representativos del estudio de la circulación para el tipo de elemento de carretera que se esté estudiando.
- Dado un determinado nivel de servicio se llama **intensidad de servicio** correspondiente a dicho nivel, al máximo número de vehículos que pueden atravesar por unidad de tiempo (generalmente una hora) una sección de carretera, de forma que se mantenga dicho nivel de servicio.

Niveles de servicio: una intuición

Hipótesis válida solo para esta página: la velocidad es la única medida que influye en el NS.



Nivel de Servicio A



Nivel de Servicio B



Nivel de Servicio C



Nivel de Servicio D



Nivel de Servicio E



Nivel de Servicio F

¡OJO! La velocidad no tiene por qué ser la única medida para determinar el nivel de servicio en la realidad.

Hipótesis válida solo para esta página: la velocidad es la única medida que influye en el NS.

Tipo de infraestructura vial	Medidas de eficiencia
<u>Autopistas</u> <ul style="list-style-type: none"> • Segmentos básicos • Tramos de entrecruzamientos • Rampas de enlaces 	Densidad, velocidad, relación volumen a capacidad Densidad, velocidad Densidad, velocidad
<u>Carreteras</u> <ul style="list-style-type: none"> • Múltiples carriles • Dos carriles 	Densidad, velocidad, relación volumen a capacidad Velocidad, % de tiempo de seguimiento
<u>Intersecciones</u> <ul style="list-style-type: none"> • Con semáforos • De prioridad 	Demora por controles Demora por controles
<u>Arterias urbanas</u>	Velocidad de recorrido
<u>Transporte colectivo</u>	Velocidad de marcha y recorrido, tiempo de espera
<u>Ciclo rutas</u>	Eventos, demoras, velocidad
<u>Peatones</u>	Espacio, eventos, demoras, velocidad

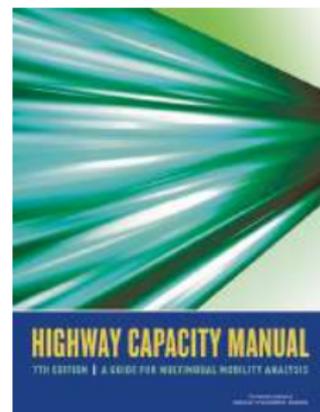
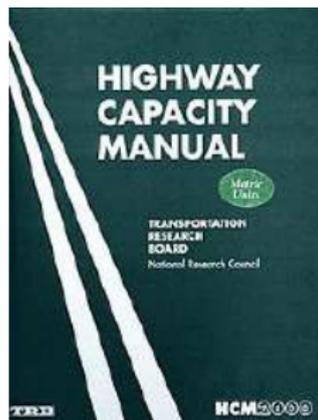
Fuente: TRB. *Highway Capacity Manual*. HCM 2010.

El procedimiento básico del HCM 2010, en general, para los diferentes tipos de infraestructuras viales, considera tres niveles de aplicación de la metodología de análisis de capacidad y niveles de servicio.

- 1 **Análisis operacional:** orientada hacia las condiciones existentes o anticipadas de la infraestructura vial, el tránsito y los dispositivos de control. La aplicación más útil del análisis operacional es cuando se requiere evaluar el efecto de una medida de corto a mediano alcance, o una mejora de bajo costo, tales como: configuraciones para usos de carriles, implementación de dispositivos de control, cambio de la programación de un semáforo, espaciamiento y ubicación de paraderos o el aumento del radio de una curva en una carretera, etc.
- 2 **Análisis de diseño o proyecto:** Este nivel de análisis principalmente se utiliza para establecer las características físicas detalladas que le permitan a un sistema vial nuevo o modificado operar a un nivel de servicio deseado, tal como el C o el D, a mediano y largo plazo.
- 3 **Análisis de planeamiento:** Está dirigido hacia estrategias en el largo plazo, cuando se empieza a planear un elemento del sistema vial y no se conocen con exactitud todos los detalles necesarios, especialmente los relativos a la demanda de tránsito, por lo que la aplicación es menos precisa, y se suelen emplear valores por defecto.

3. Metodologías

- El Highway Capacity Manual (HCM) es una publicación de Transportation Research Board de la National Academies of Science de Estados Unidos.
- Contiene conceptos, lineamientos y procesos para calcular capacidad y niveles de servicio en distintas infraestructuras viales incluyendo: carreteras, autopistas, vías arteriales, rotondas, intersecciones semaforizadas y no semaforizadas, etc.
- Es ampliamente utilizado.



El HCM (2000) nos presenta una metodología para calcular el NS en carreteras de dos carriles. En el capítulo 12 explica los conceptos generales y en el capítulo 20 se encuentra la metodología que se debe aplicar.



¿Qué variables consideran los conductores para evaluar una ruta?

- 1 El HCM (2000) divide las rutas en dos clases según su función.
 - **Clase 1:** conectan dos generadores de viajes, normalmente ciudades. Los conductores esperan circular a velocidades altas.
 - **Clase 2:** dan accesibilidad a zonas con menos actividad. La velocidad alta no es tan importante.
- 2 La metodología está limitada:
 - No admite pendientes de 3% por longitudes mayores a 1,0 km. De ser el caso se debería evaluar el NS por sentido.
 - Se debe considerar aparte los tramos que tengan un tercer carril. Se plantean dos opciones: passing lanes y climbing lanes.
 - En esta clase vamos a ver el caso más sencillo.

EXHIBIT 20-3. LOS CRITERIA (GRAPHICAL) FOR TWO-LANE HIGHWAYS IN CLASS I

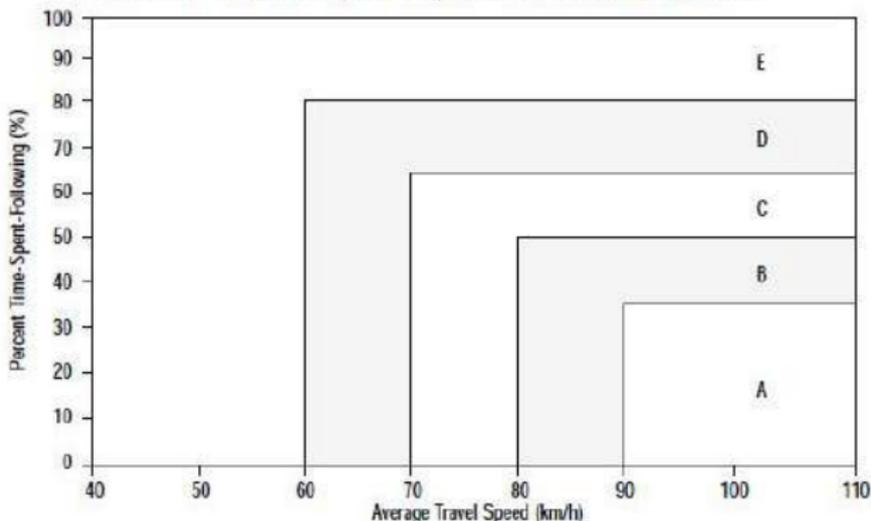


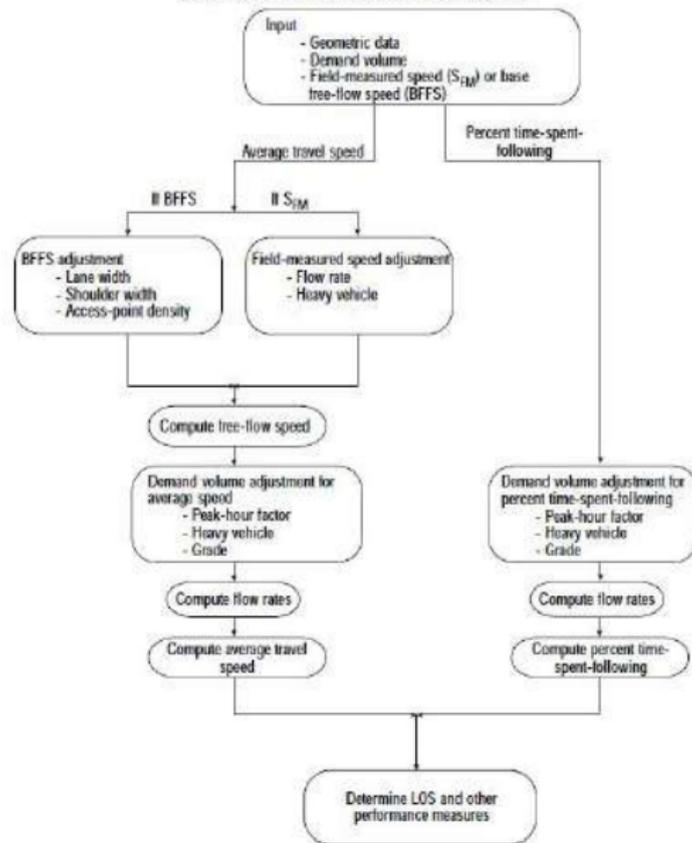
EXHIBIT 20-4. LOS CRITERIA FOR TWO-LANE HIGHWAYS IN CLASS II

LOS	Percent Time Spent Following
A	≤ 40
B	> 40–55
C	> 55–70
D	> 70–85
E	> 85

Note:

LOS F applies whenever the flow rate exceeds the segment capacity.

EXHIBIT 20-1. TWO-LANE HIGHWAY METHODOLOGY



Determinar velocidad de flujo libre (FFS)

Opción 1: medida en campo

$$FFS = S_{FM} + 0.0125 \frac{V_L}{f_{HV}} \quad (20-1)$$

where

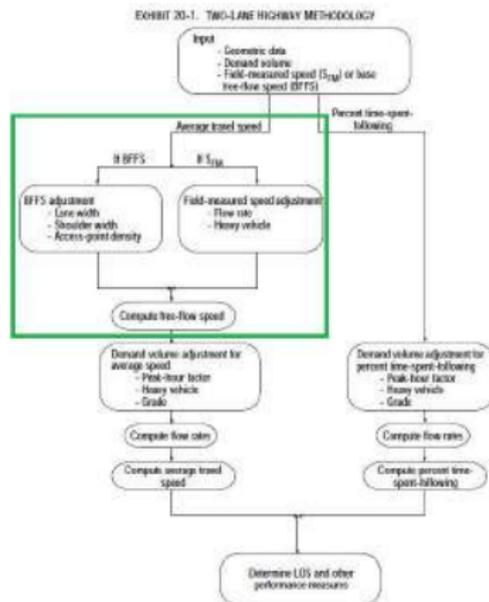
- FFS = estimated free-flow speed (km/h),
- S_{FM} = mean speed of traffic measured in the field (km/h),
- V_L = observed flow rate for the period when field data were obtained (veh/h),
- and
- f_{HV} = heavy-vehicle adjustment factor, determined as shown in Equation 20-4.

Opción 2: aproximación teórica

$$FFS = BFFS - f_{LS} - f_A \quad (20-2)$$

where

- FFS = estimated FFS (km/h);
- $BFFS$ = base FFS (km/h);
- f_{LS} = adjustment for lane width and shoulder width, from Exhibit 20-5; and
- f_A = adjustment for access points, from Exhibit 20-6.



Determinar la tasa de flujo de demanda

$$V_p = \frac{V}{PHF \cdot f_G \cdot f_{HV}}$$

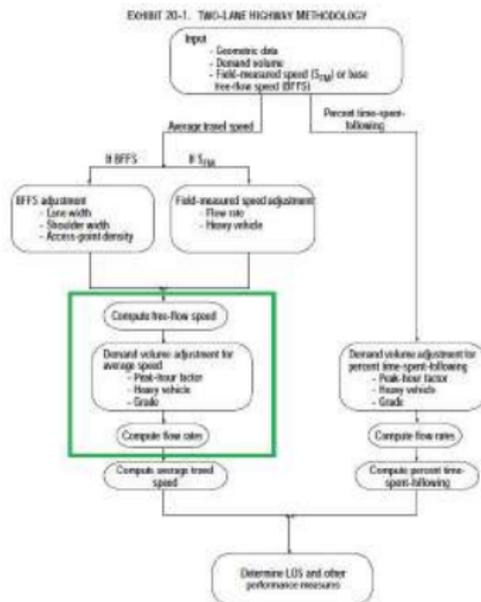
where

- V_p = passenger-car equivalent flow rate for peak 15-min period (pc/h),
- V = demand volume for the full peak hour (veh/h),
- PHF = peak-hour factor,
- f_G = grade adjustment factor, and
- f_{HV} = heavy-vehicle adjustment factor.

PHF (factor de hora pico): es la relación de entre el volumen horario (V) y la intensidad máxima encontrada en un intervalo menor a una hora (por ejemplo: 15min), expresado en veh/h.

$$PHF = \frac{V}{4 \times V_{15}}$$

Se puede calcular o utilizar algún valor de referencia en la bibliografía.



Determinar la tasa de flujo de demanda

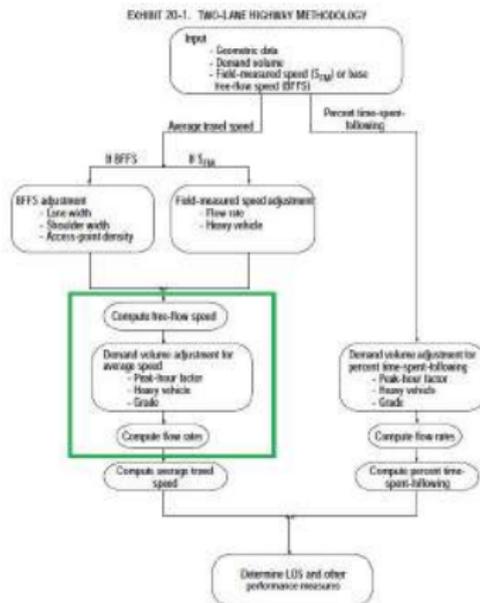
$$v_p = \frac{V}{PHF \cdot f_G \cdot f_{HV}}$$

where

- v_p = passenger-car equivalent flow rate for peak 15-min period (pc/h),
- V = demand volume for the full peak hour (veh/h),
- PHF = peak-hour factor,
- f_G = grade adjustment factor, and
- f_{HV} = heavy-vehicle adjustment factor.

Terreno llano (level): no hay pendientes mayores a 3% que superen los 0,8km.

Terreno ondulado (rolling): se producen demoras por pendientes en vehículos pesados.



Determinar la tasa de flujo de demanda

$$v_p = \frac{V}{PHF \cdot f_G \cdot f_{HV}}$$

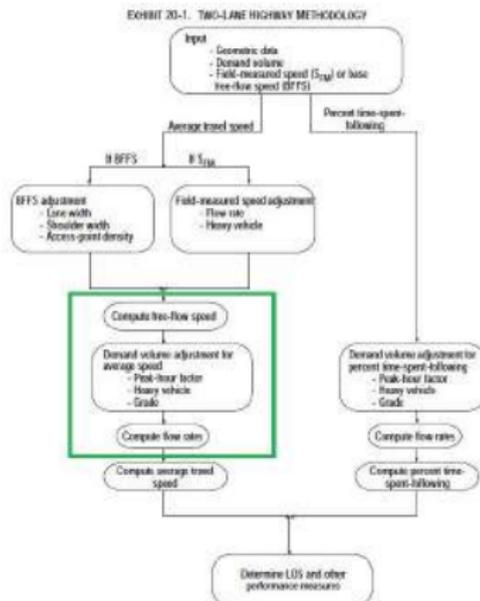
where

- v_p = passenger-car equivalent flow rate for peak 15-min period (pc/h),
- V = demand volume for the full peak hour (veh/h),
- PHF = peak-hour factor,
- f_G = grade adjustment factor, and
- f_{HV} = heavy-vehicle adjustment factor.

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T (E_T - 1) + P_R (E_R - 1)} \quad (20-4)$$

where

- P_T = proportion of trucks in the traffic stream, expressed as a decimal;
- P_R = proportion of RVs in the traffic stream, expressed as a decimal;
- E_T = passenger-car equivalent for trucks, obtained from Exhibit 20-9 or Exhibit 20-10; and
- E_R = passenger-car equivalent for RVs, obtained from Exhibit 20-9 or Exhibit 20-10.

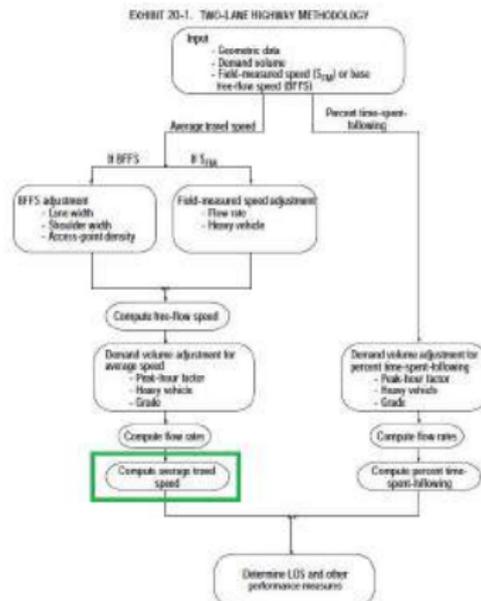


Determinar la velocidad de recorrido media

$$ATS = FFS - 0.0125v_p - f_{np} \quad (20-5)$$

where

- ATS = average travel speed for both directions of travel combined (km/h),
- f_{np} = adjustment for percentage of no-passing zones (see Exhibit 20-11), and
- v_p = passenger-car equivalent flow rate for peak 15-min period (pc/h).



Determinar la tasa de flujo de demanda

En este caso v_p se calcula con la misma expresión, pero con factores de otras tablas.

Determinar el porcentaje de tiempo en seguimiento

$$PTSF = BPTSF + f_{dhp} \quad (20-6)$$

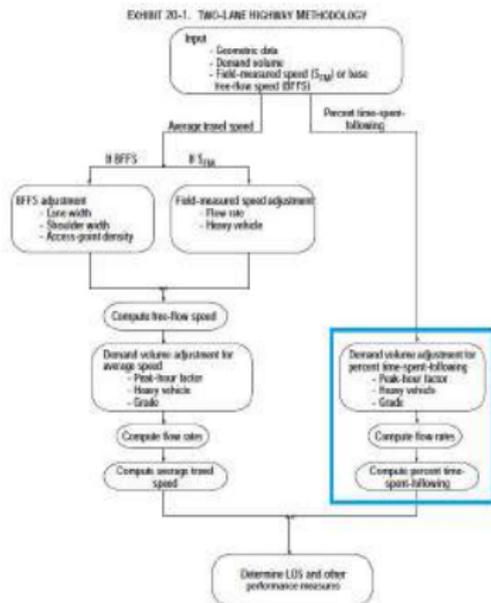
where

$PTSF$ = percent-time-spent following.

$BPTSF$ = base percent time-spent-following for both directions of travel combined (use Equation 20-7), and

f_{dhp} = adjustment for the combined effect of the directional distribution of traffic and of the percentage of no-passing zones on percent time-spent following.

$$BPTSF = 100 \left(1 - e^{-0.000879v_p} \right) \quad (20-7)$$



Determinar el nivel de servicio

EXHIBIT 20-3. LOS CRITERIA (GRAPHICAL) FOR TWO-LANE HIGHWAYS IN CLASS I

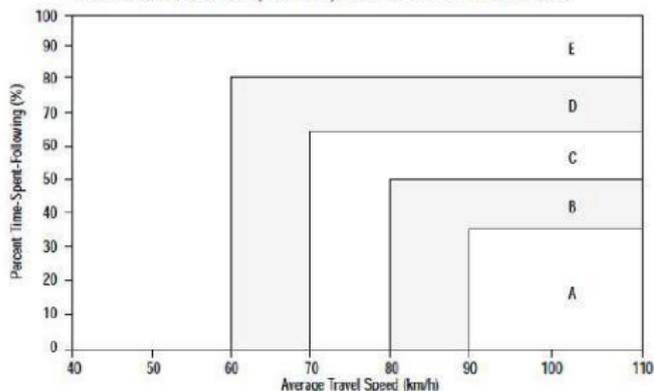
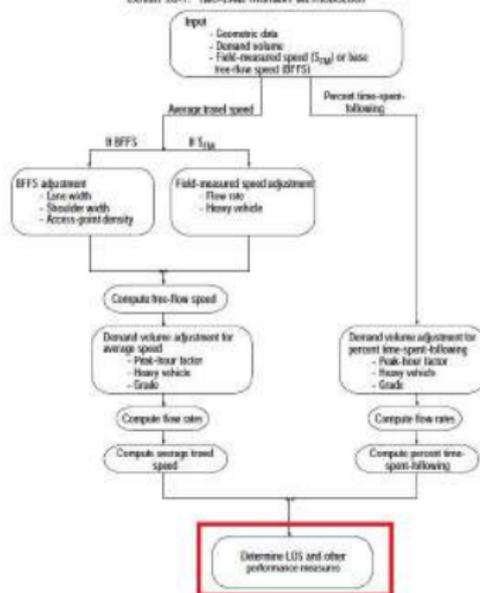


EXHIBIT 20-4. LOS CRITERIA FOR TWO-LANE HIGHWAYS IN CLASS II

LOS	Percent Time-Spent-Following
A	≤ 40
B	> 40–55
C	> 55–70
D	> 70–85
E	> 85

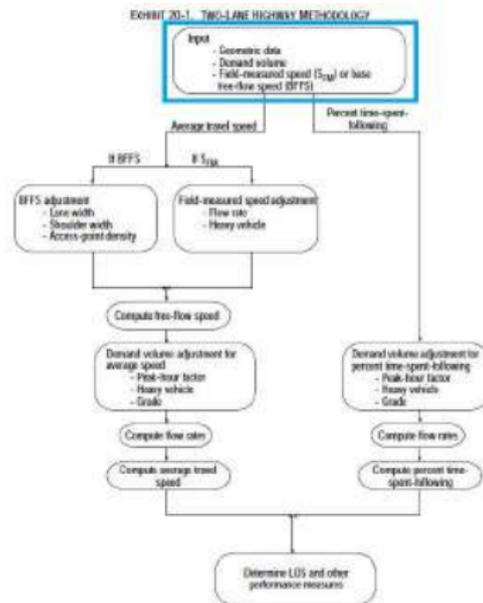
Note:
LOS F applies whenever the flow rate exceeds the segment capacity.

EXHIBIT 20-1. TWO-LANE HIGHWAY METHODOLOGY



Inputs

- 1.600 veh/h (suma de dos sentidos)
- 14 % de camiones y ómnibus
- 0,95 PHF
- Rolling terrain
- 1,2 m de ancho de banquina
- 50 % de zonas de no adelantamiento
- 50/50 de partición entre sentidos
- 4 % de RVs
- 100 km/h de FFS base
- 3,4 m ancho de carril
- 10 km de largo
- 12 puntos/km de accesos

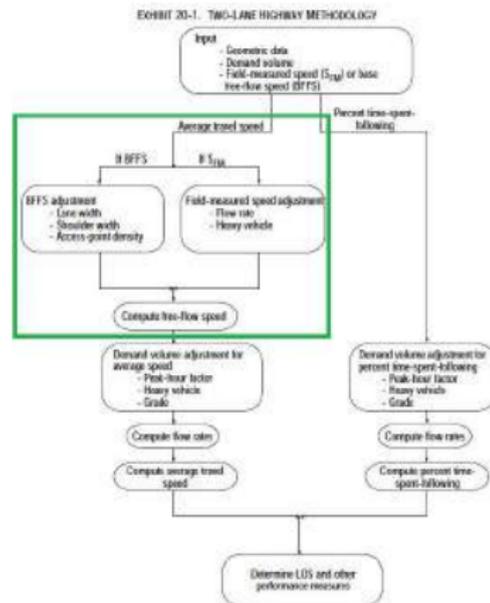


Determinar FFS - aproximación teórica

$$FFS = BFFS - f_{LS} - f_A$$

Donde:

- $BFFS = 100\text{km/h}$ (Input)
- f_{LS} (Exhibit 20-5)
- f_A (Exhibit 20-6)



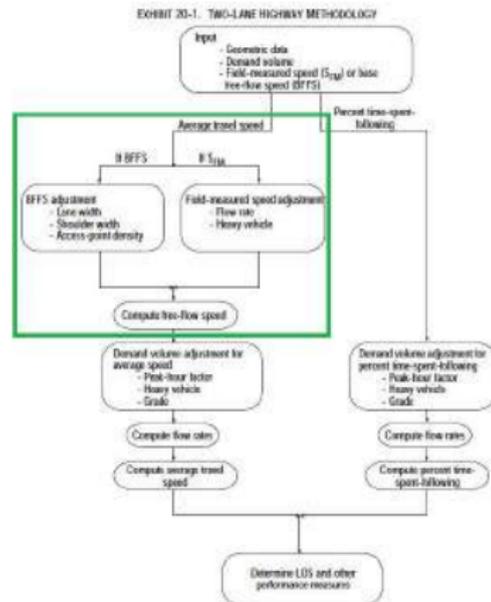
Determinar FFS - aproximación teórica

$$FFS = BFFS - f_{LS} - f_A$$

Donde:

- $BFFS = 100 \text{ km/h}$ (Input)
- $f_{LS} = 2,8 \text{ km/h}$ (Exhibit 20-5)
- $f_A = 8,0 \text{ km/h}$ (Exhibit 20-6)

$$FFS = 100 - 2,8 - 8,0 = 89,2 \text{ km/h}$$

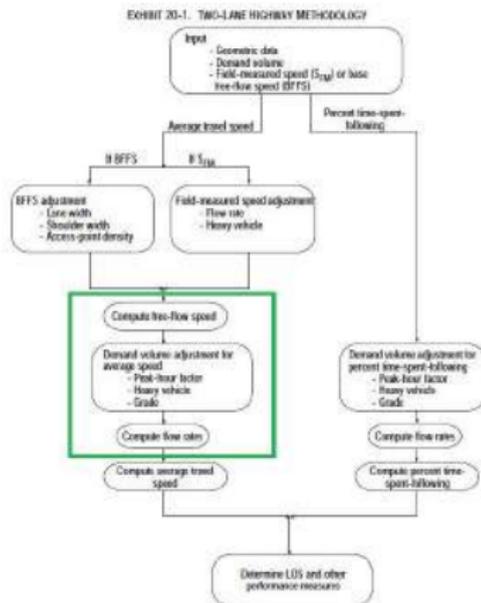


Determinar tasa de flujo de demanda

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

Donde:

- $V = 1,600 \text{ veh/h}$ (Input)
- $PHF = 0,95$ (Input)
- f_G (Exhibit 20-7)
- $f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1)}$
 - $P_T = 0,14$ (Input)
 - $P_R = 0,04$ (Input)
 - E_T (Exhibit 20-9)
 - E_R (Exhibit 20-9)



Determinar tasa de flujo de demanda

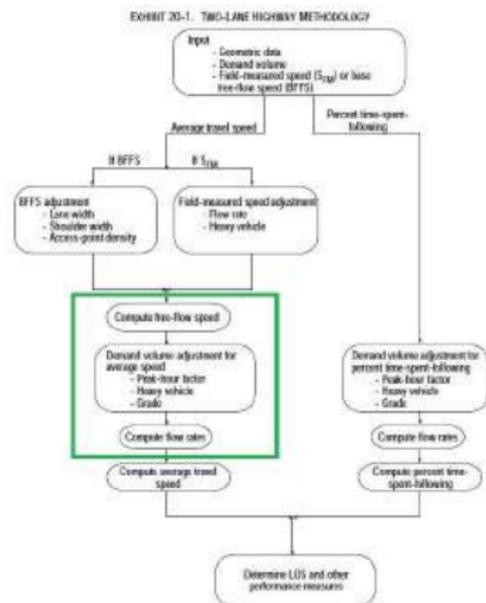
$$v_p = \frac{V}{PHF \times f_G \times f_{HV}}$$

Donde:

- $V = 1,600 \text{ veh/h}$ (Input)
- $PHF = 0,95$ (Exhibit 20-5)
- $f_G = 0,99$ (Exhibit 20-7)
- $f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1)} = 0,93$
 - $P_T = 0,14$ (Input)
 - $P_R = 0,04$ (Input)
 - $E_T = 1,5$ (Exhibit 20-9)
 - $E_R = 1,1$ (Exhibit 20-9)

$$v_p = \frac{1600}{0,95 \times 0,99 \times 0,93} = 1829 \text{ pc/h}$$

Se tiene que corroborar que $v_p < 3200$. Si no NS es F.

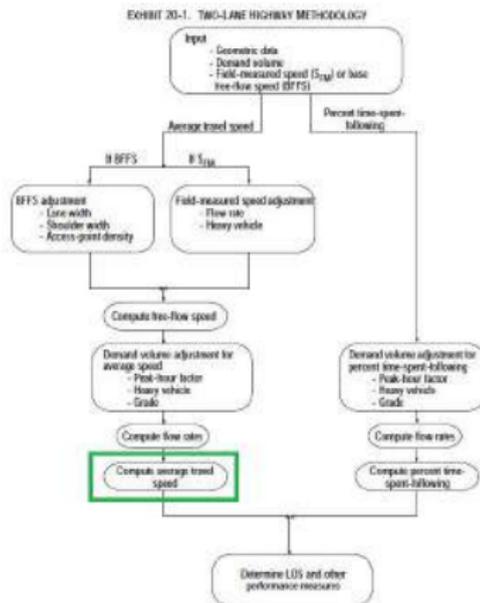


Determinar la velocidad media de recorrido

$$ATS = FFS - 0,0125v_p - f_{np}$$

Donde:

- $FFS = 89,2 \text{ km/h}$ (Calculado)
- $v_p = 1829 \text{ pc/h}$ (Calculado)
- f_{np} (Exhibit 20-11)



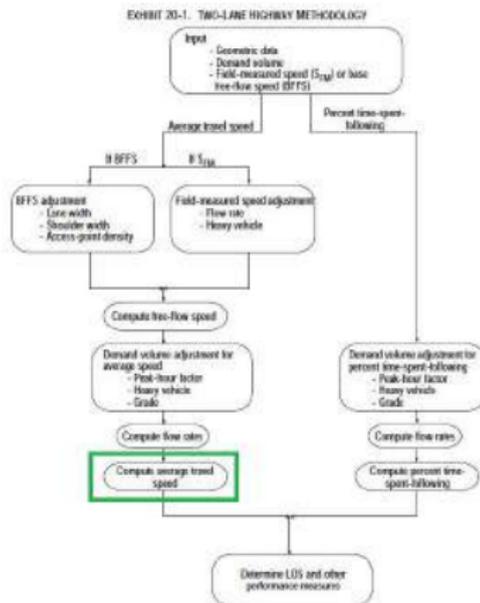
Determinar la velocidad media de recorrido

$$ATS = FFS - 0,0125v_p - f_{np}$$

Donde:

- $FFS = 89,2 km/h$ (Calculado)
- $v_p = 1829 pc/h$ (Calculado)
- $f_{np} = 1,3$ (Interpolado: Exhibit 20-11)

$$ATS = 89,2 - 0,0125 \times 1829 - 1,3 = 65 km/h$$



Determinar el porcentaje de tiempo en seguimiento

Hay que calcular v_p con los parámetros de PTSF.

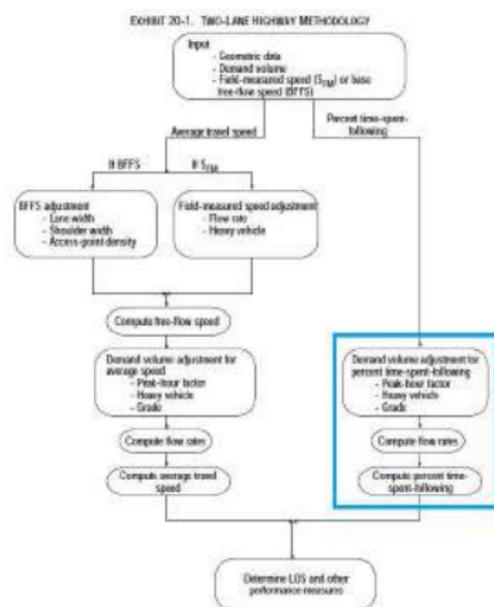
$$v_p = \frac{V}{PHF \times f_G \times f_{HV}}$$

Donde:

- $V = 1,600 \text{ veh/h}$ (Input)
- $PHF = 0,95$ (Input)
- $f_G = 1,0$ (Exhibit 20-8)
- $f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1)} = 1,0$
 - $P_T = 0,14$ (Input)
 - $P_R = 0,04$ (Input)
 - $E_T = 1,0$ (Exhibit 20-10)
 - $E_R = 1,0$ (Exhibit 20-10)

$$v_p = \frac{1600}{0,95 \times 1,0 \times 0,85} = 1684 \text{ pc/h}$$

Se debe chequear que $0,5v_p < 1700$ y $v_p < 3200$. Si no NS es F.

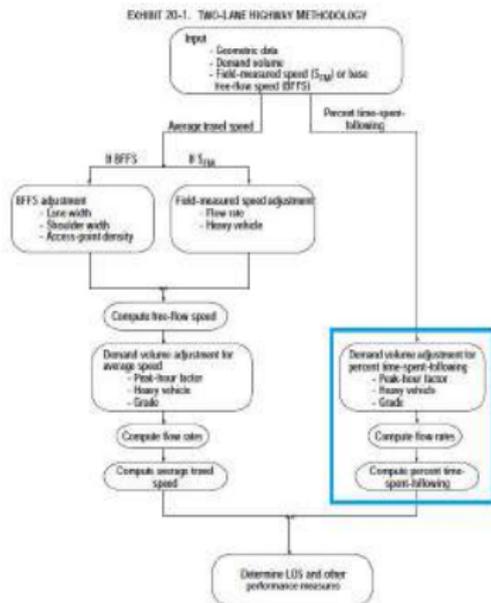


Determinar el porcentaje de tiempo en seguimiento

$$PTSF = BPTSF + f_{d/np}$$

Donde:

- $BPTSF = 100 (1 - e^{0,000879v_p})$
 - $v_p = 1684$ (Calculado)
- $f_{d/np}$ (Exhibit 20-12)



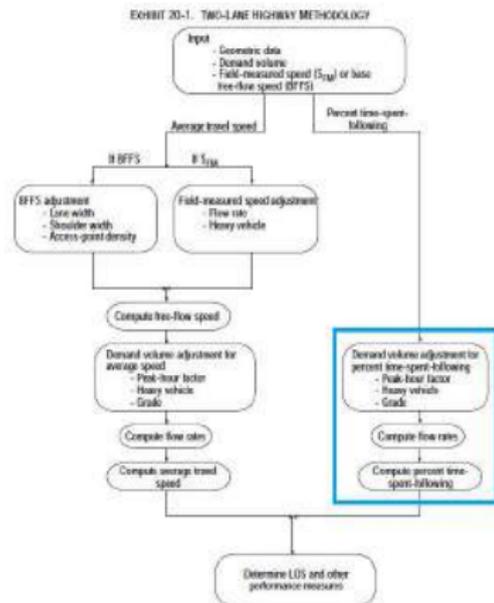
Determinar el porcentaje de tiempo en seguimiento

$$PTSF = BPTSF + f_{d/np}$$

Donde:

- $BPTSF = 100 (1 - e^{0,000879v_p}) = 77,2 \%$
 - $v_p = 1684$ (Calculado)
- $f_{d/np} = 4,8$ (Interpolado: Exhibit 20-12)

$$PTSF = 77,2 + 4,8 = 82 \%$$



Determinar el nivel de servicio

EXHIBIT 20-3. LOS CRITERIA (GRAPHICAL) FOR TWO-LANE HIGHWAYS IN CLASS I

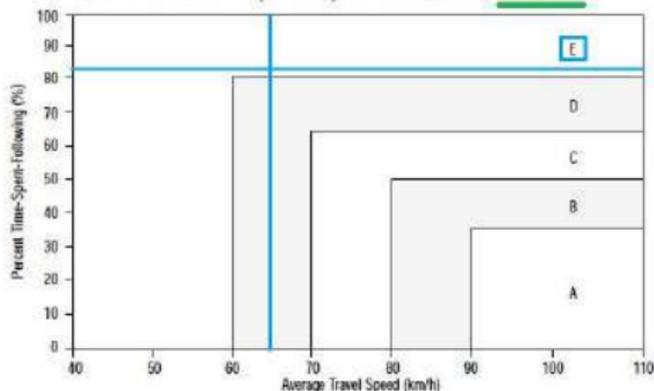
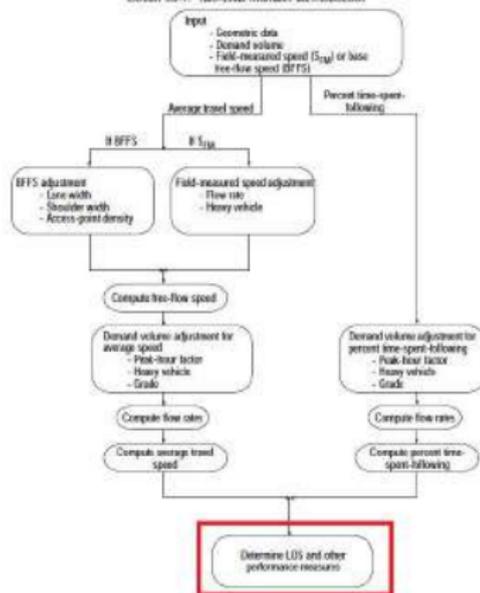


EXHIBIT 20-4. LOS CRITERIA FOR TWO-LANE HIGHWAYS IN CLASS II

LOS	Percent Time-Spent-Following
A	≤ 40
B	> 40–55
C	> 55–70
D	> 70–85
E	> 85

Note:
LOS E applies whenever the flow rate exceeds the segment capacity.

EXHIBIT 20-1. TWO-LANE HIGHWAY METHODOLOGY



Otros ejemplos

IV. EXAMPLE PROBLEMS

Problem No.	Description	Application
1	Find the two-way LOS of a Class I two-lane highway	Operational (LOS)
2	Find the two-way LOS of a Class II two-lane highway	Operational (LOS)
3	Find the directional LOS of a Class I two-lane highway	Operational (LOS)
4	Find the directional LOS of a Class I two-lane highway including a passing lane	Operational (LOS)

Generalidades

En el presente documento se desarrollan los conceptos para la estimación del Nivel de Servicio en Caminos de Dos Carriles según la metodología de cálculo del Highway Capacity Manual 2022.

Para el análisis, el tramo deberá segmentarse en tres grupos a los que se dará un tratamiento distinto:

Parámetros que se estiman con la metodología:

- Velocidad Promedio.
- Porcentaje de Vehículos en Pelotón.
- **Densidad de Vehículos en Pelotón.**

Pasos de la metodología

- 1 Límites de la ruta en el estudio y su segmentación
- 2 Determinación de la demanda, capacidad y relación v/c
- 3 Determinación de la clasificación del trazado vertical
- 4 Determinación de la velocidad en flujo libre
- 5 Estimación de la velocidad promedio
- 6 Estimar el porcentaje de vehículos en pelotón
- 7 Calcular la densidad de vehículos en pelotón en el segmento
- 8 Densidad de vehículos en pelotón en carriles de sobrepaso
- 9 Ajuste a la densidad de vehículos en pelotón en tramos después de carriles de sobrepaso y determinar la longitud efectiva de un carril de sobrepaso
- 10 Determinación del nivel de servicio
- 11 Análisis de la ruta

El material presentado en esta sección se basa en las notas del curso Análisis operacional de carreteras, por los ingenieros Jorge Felizia y Leonardo Felizia, de la Universidad de Rosario, Argentina.

- Zonas con Sobrepaso Restringido.



El nivel de servicio depende de:

- Flujo en la dirección estudiada.
- Porcentaje de vehículos pesados.
- Geometría horizontal y vertical.
- Longitud del segmento.

- Zonas con Sobrepaso Permitido.



El nivel de servicio depende de:

- Flujo en la dirección estudiada.
- Flujo en la dirección opuesta.
- Porcentaje de vehículos pesados.
- Geometría horizontal y vertical.
- Longitud de la Zona de Sobrepaso.

- Zonas con Sobrepaso Permitido.



El nivel de servicio depende de:

- Flujo en la dirección estudiada.
- Porcentaje de vehículos pesados.
- Geometría horizontal y vertical.
- Longitud del carril de sobrepaso.
- Longitud del carril de sobrepaso.

1. Límites de la ruta en el estudio y su segmentación

Para el análisis, el tramo deberá segmentarse en tres grupos a los que se dará un tratamiento distinto:

- Zonas con Sobrepaso Restringido.
- Zonas con Sobrepaso Permitido.
- Zonas con carriles de Sobrepaso.

Cada segmento deberá ser homogéneo en:

- Demanda.
- Pendiente.
- Ancho de carriles y banquetas.
- Velocidad límite señalizada.
- Trazado horizontal.

2. Determinación de la demanda, capacidad y relación v/c

Se ajustan los volúmenes del comienzo del segmento analizado en ambas direcciones (sentido en estudio y opuesto) para tener en cuenta los 15 minutos pico dentro de la hora en estudio.

$$V_{fi} = \frac{V_i}{FHP}$$

donde:

V_i = Flujo en la dirección i (veh/h).

i = "d" (dirección del análisis) u "o" (dirección opuesta).

V_i = Volumen en la dirección i .

FHP = Factor de Hora Pico.

La capacidad es de 1700 vehículos por hora por sentido de circulación en **Zonas con Sobrepaso Restringido** y **Zonas con Sobrepaso**. Para segmentos con **Carril de Sobrepaso** la capacidad es la que se muestra en la Tabla 02. Si el flujo de la Demanda supera la Capacidad, el Nivel de Servicio del tramo es F, y el análisis termina en este punto.

3. Determinación de la clasificación del trazado vertical

TABLA 01: CLASIFICACIÓN DE PENDIENTES (DESCENDENTES ENTRE PARÉNTESIS)

Longitud del tramo (km)	Porcentaje de la pendiente del tramo (%)									
	≤1	>1≤2	>2≤3	>3≤4	>4≤5	>5≤6	>6≤7	>7≤8	>8≤9	>9
≤ 0,19	1 (1)	1 (1)	1 (1)	1 (1)	1 (1)	1 (1)	1 (1)	2 (1)	2 (2)	2 (2)
>0,16≤ 0,32	1 (1)	1 (1)	1 (1)	1 (1)	2 (1)	2 (2)	2 (2)	3 (2)	3 (3)	3 (3)
>0,32 ≤ 0,48	1 (1)	1 (1)	1 (1)	2 (1)	2 (2)	3 (2)	3 (3)	4 (3)	4 (4)	5 (5)
>0,48 ≤ 0,64	1 (1)	1 (1)	2 (1)	2 (2)	3 (2)	3 (3)	4 (4)	5 (4)	5 (5)	5 (5)
>0,64 ≤ 0,80	1 (1)	1 (1)	2 (1)	2 (2)	3 (3)	4 (3)	5 (4)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
>0,80 ≤ 0,97	1 (1)	1 (1)	2 (1)	3 (2)	3 (3)	4 (4)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
>0,97 ≤ 1,13	1 (1)	1 (1)	2 (1)	3 (2)	4 (3)	4 (4)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
>1,13 ≤ 1,29	1 (1)	1 (1)	2 (1)	3 (3)	4 (4)	5 (4)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
>1,29 ≤ 1,45	1 (1)	1 (1)	2 (1)	3 (3)	4 (4)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
>1,45 ≤ 1,61	1 (1)	1 (1)	2 (2)	3 (3)	4 (4)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
>1,61 ≤ 1,77	1 (1)	1 (1)	2 (2)	3 (3)	4 (4)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
>1,77	1 (1)	1 (1)	2 (2)	4 (4)	4 (4)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)

Fuente: Highway Capacity Manual 2021

4. Determinación de la velocidad en flujo libre

Investigaciones realizadas para el desarrollo de esta metodología, indican que la Velocidad en Flujo Libre Base es aproximadamente un 14% superior a la Velocidad Límite Señalizada.

La v_{fb} se estima con la siguiente fórmula:

$$v_{fb} = 1,14 \times v_{ls}$$

donde:

v_{fb} = Velocidad en Flujo Libre Base (km/h).

v_{ls} = Velocidad Límite Señalizada (km/h).

Por otra parte, la Velocidad en Flujo Libre Base sirve de sustituto para identificar la Velocidad en Flujo Libre para las siguientes características geométricas básicas:

- ✓ Ancho de carril $\geq 3,65$ metros.
- ✓ Ancho de banquina $\geq 1,80$ metros.
- ✓ Sin puntos de acceso.
- ✓ Sin vehículos pesados en la corriente de tránsito

4. Determinación de la velocidad en flujo libre

En caso de no cumplirse alguna de estas características, la Velocidad en Flujo Libre se calcula con la ecuación que se muestra a continuación:

$$v_{fl} = v_{flb} - f_{cb} - f_{pa} - a \times (\%vp)$$

donde:

v_{fl} = Velocidad en Flujo Libre en la dirección analizada (km/h).

v_{flb} = Velocidad en Flujo Libre Base (km/h).

f_{cb} = Ajuste por anchos de carril y banquina (km/h).

f_{pa} = Ajuste por densidad de puntos de acceso (km/h).

a = Coeficiente en función al trazado vertical (según clase definida en Tabla 01).

$\%vp$ = Porcentaje de vehículos pesados en la dirección analizada (% - por ejemplo 5% se expresa como 5).

5. Estimación de la velocidad promedio

Si el flujo de la demanda es menor o igual a 100 vehículos/hora, la Velocidad Promedio es igual a la Velocidad en Flujo Libre y el Paso 5 se puede obviar. De lo contrario la Velocidad Promedio se calcula con la fórmula siguiente:

$$v = v_{fl} - 1,609 \times m \times \left(\frac{V_d}{1,000} - 0,1 \right)^p \quad (1)$$

donde:

v = Velocidad Promedio en el sentido analizado (km/h).

v_{fl} = Velocidad en Flujo Libre en la dirección analizada (km/h).

V_d = Flujo en la dirección analizada (veh/h).

m = Coeficiente que se determina en el Paso 5a.

p = Coeficiente que se determina en el Paso 5b.

m y p dependen de:

- Velocidad en Flujo Libre en la dirección analizada (km/h).
- Flujo de la demanda en la dirección opuesta (veh/h).
- Longitud del segmento (km)
- Porcentaje de vehículos pesados en la dirección analizada (%).
- Pendientes

Se puede realizar un ajuste por curvatura horizontal.

6. Estimar el porcentaje de vehículos en pelotón

El Porcentaje de Vehículos en Pelotón se calcula con la siguiente ecuación:

$$PVP = 100 \times \left[1 - e^{-\left(q \times \left(\frac{V_d}{1.000} \right)^r \right)} \right] \quad (7)$$

donde:

PVP = Porcentaje de Vehículos en Pelotón, en la dirección estudiada (%).

V_d = Flujo en la dirección estudiada (veh/h).

q y r = Coeficientes.

q y r dependen de:

- Velocidad en Flujo Libre en la dirección analizada (km/h).
- Flujo de la demanda en la dirección opuesta (veh/h).
- Longitud del segmento (km)
- Porcentaje de vehículos pesados en la dirección analizada (%).
- Pendientes

7. Calcular la densidad de vehículos en pelotón en el segmento

La Densidad de Vehículos en Pelotón se mide por kilómetro y por carril y se calcula con la siguiente expresión:

$$D_{Si} = \frac{PVP}{100} \times \frac{V_d}{v}$$

donde:

D_{Si} = Densidad de Vehículos en Pelotón en el segmento i en la dirección estudiada (vehículos en pelotón/kilómetro)

PVP = Porcentaje de Vehículos en Pelotón, en la dirección estudiada (%).

V_d = Flujo en la dirección estudiada (veh/h).

v = Velocidad Promedio en la dirección analizada (km/h).

No se abordarán los casos de carriles de sobrepaso.

8. Densidad de vehículos en pelotón en carriles de sobrepaso

9. Ajuste a la densidad de vehículos en pelotón en tramos después de carriles de sobrepaso y determinar la longitud efectiva de un carril de sobrepaso

10. Determinación del nivel de servicio

NdeS	Densidad de vehículos en pelotón (vehículos en pelotón/km/carril)	
	Rutas de alta velocidad Velocidad Límite señalizada ≥ 80 km/h	Rutas de baja velocidad Velocidad Límite señalizada < 80 km/h
A	$\leq 1,2$	$\leq 1,6$
B	$> 1,2 - 2,5$	$> 1,6 - 3,1$
C	$> 2,5 - 5,0$	$> 3,1 - 6,2$
D	$> 5,0 - 7,5$	$> 6,2 - 9,3$
E	$> 7,5$	$> 9,3$
F	La demanda excede la capacidad	

Fuente: Highway Capacity Manual 2021

11. Análisis de ruta

$$D_{SR} = \frac{\sum_{i=1}^n D_{Si} \times L_i}{\sum_{i=1}^n L_i}$$

donde:

D_{SR} = Densidad de Vehículos en Pelotón en la ruta en la dirección estudiada (vehículos en pelotón/kilómetro).

D_{Si} = densidad de Vehículos en Pelotón en el segmento i en la dirección estudiada (vehículos en pelotón/kilómetro).

L_i = Longitud del segmento i (Km).