

Universidad de Buenos Aires

**HIGHWAY CAPACITY
MANUAL 2016
AUTOPISTAS**

**Ing. Jorge Felizia
Ing. Leonardo Felizia**

2018



MAESTRIA EN PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN DE TRANSPORTE

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	2
1.1	Componentes de una autopista.....	2
1.2	Consideraciones generales.....	3
1.3	Definiciones y terminología.....	3
1.4	Características del flujo en autopistas.....	4
1.4.1	Flujo bajo condiciones básicas.....	5
1.4.2	Velocidad en flujo libre.....	5
1.4.3	Dispersión de cola y tránsito en congestión.....	7
1.4.4	Factores que afectan la velocidad en flujo libre.....	8
2	METODOLOGÍA	10
2.1	Límites de aplicación de la metodología.....	10
2.2	Niveles de servicio.....	10
2.2.1	Medida de la eficiencia.....	10
2.2.2	Criterio para definir el nivel de servicio.....	11
2.2.3	Descripción de los niveles de servicio.....	11
2.3	Relaciones básicas.....	13
2.3.1	Determinación del volumen equivalente.....	13
2.3.2	Determinación de la velocidad en flujo libre.....	21
2.3.3	Cálculo de la velocidad y densidad.....	23
2.3.4	Determinación del nivel de servicio.....	24
2.3.5	Sensibilidad de los resultados.....	24
3	PROCEDIMIENTOS DE APLICACIÓN	26
3.1	Análisis operacional.....	26
3.2	Diseño.....	26
3.3	Planeamiento.....	27
3.4	Volúmenes equivalentes y de servicio.....	28
3.5	Interpretación de los resultados.....	29
3.6	Determinación de tramos de estudio.....	29

AUTOPISTAS

1 INTRODUCCIÓN

Se define como autopista a toda facilidad que posea dos ó más carriles por sentido para uso exclusivo del tránsito y con control total de accesos y egresos. Los volúmenes que circulan en sentidos opuestos están permanentemente separados por barreras físicas. El flujo que se desarrolla es totalmente ininterrumpido ya que no existen interferencias externas tales como intersecciones semaforizadas. Los ingresos y egresos se realizan a través de ramas. Estas se diseñan generalmente para permitir maniobras de convergencia y divergencia a alta velocidad que minimizan las interferencias al tránsito directo.

Una autopista por peaje es similar a una autopista libre, excepto que los peajes se cobran en puntos designados a lo largo del tramo de la autopista. Aunque el cobro del peaje incluye interrupciones al tránsito, este tipo de autopistas se pueden tratar, en general, como el resto de las autopistas libres. Sin embargo, se debe prestar especial atención a las características propias de las estaciones de peaje, sus restricciones y demoras.

Las condiciones de operación dependen de la interacción entre los vehículos dentro de la corriente de tránsito, y entre los vehículos y las características geométricas de la autopista. También influyen las condiciones del medio tales como situaciones climáticas, estado del pavimento y/o incidentes en el tránsito.

Los procedimientos de este capítulo relacionan las condiciones de operación probables de una autopista con las características geométricas y del tránsito existentes durante un intervalo de tiempo definido y en un tramo específico.

1.1 Componentes de una autopista

En general, una autopista está compuesta por tres tipos de secciones diferentes:

Tramos básicos de autopista: secciones que no están afectadas por maniobras de divergencia o convergencia próximas a las ramas o por maniobras de entrecruzamiento.

Zonas de entrecruzamiento: secciones en las cuales se cruzan las trayectorias de 2 ó más flujos de tránsito. Estas áreas se forman cuando los lugares de convergencia están próximos a los de divergencia, ó cuando una rama de entrada es seguida por una rama de salida y ambas están conectadas por un carril auxiliar continuo.

Uniones de ramas: puntos de unión de las ramas de entrada y salida con la autopista. Son lugares de turbulencia debido a la concentración de vehículos que convergen o divergen.

Los tramos básicos de autopista se ubican fuera del área de influencia de una rama o zona de entrecruzamiento. Las áreas de influencia pueden definirse de la siguiente forma:

- a) Ramas de entrada: 450 m corriente abajo del punto de unión.
- b) Ramas de salida: 450 m corriente arriba del punto de unión.
- c) Zonas de entrecruzamiento: comienza 150 m corriente arriba del punto de convergencia y finaliza 150 m corriente abajo del punto de divergencia.

Estas definiciones corresponden a operaciones estables. En caso de congestionamientos o detenciones, pueden producirse colas de espera de distinta magnitud, pudiendo llegar a varios kilómetros de longitud.

1.2 Consideraciones generales

Los procedimientos que se describen en el presente capítulo consideran las características aisladas del tramo en estudio.

En ellos se asumen las siguientes condiciones:

- a) Buen estado de la calzada
- b) Ausencia de incidentes de tránsito
- c) Buenas condiciones climáticas

Cuando alguna de estas condiciones no se cumpla, se deberán alterar los resultados con criterio, o bien tener en cuenta esta situación al interpretar los resultados.

En la práctica, es esencial analizar los tramos de autopista de un modo integral para estimar la capacidad general de la facilidad e identificar los lugares con capacidad mínima que pueden convertirse en cuellos de botella.

1.3 Definiciones y terminología

Capacidad de la autopista: es el valor máximo sostenido de flujo (15') en un punto o segmento uniforme para las condiciones prevalecientes de tránsito y calzada. Se define por sentido de circulación y se expresa en automóviles por hora por carril.

Características del camino: son las características geométricas del segmento de autopista en estudio, tales como número y ancho de carriles, obstrucciones laterales en banquetas, distancia entre distribuidores, pendientes y configuraciones del perfil transversal.

Condiciones del tránsito: se refiere a cualquier característica de la corriente de tránsito que afecte la capacidad, la velocidad en flujo libre o la operación. Por ejemplo, composición del tránsito (porcentaje de cada tipo de vehículo),

distribución en los carriles y características de los conductores (usuales o conductores ocasionales).

Velocidad en flujo libre: es la velocidad media que los automóviles circulan cuando los volúmenes equivalentes son bajos o moderados, en un tramo uniforme de autopista, bajo las condiciones prevalecientes del camino y el tránsito.

El análisis de capacidad considera tramos con valores uniformes en las condiciones del tránsito y el camino. Si alguna de las características prevalecientes cambia significativamente, la capacidad de la sección y sus condiciones operativas cambian también.

1.4 Características del flujo en autopistas

Las condiciones del tránsito dentro de tramos básicos de autopista pueden variar fundamentalmente en función de la existencia de cuellos de botella ubicados corriente arriba o corriente abajo, que restringen el flujo que entra y sale del tramo de autopista. Los cuellos de botellas pueden crearse por ramas convergentes, áreas de entrecruzamientos, pérdida de un carril, actividades de mantenimiento y construcción, accidentes e incidentes sobre un carril. No necesariamente un incidente tiene que bloquear completamente el carril para generar un cuello de botella. Vehículos descompuestos cercanos al separador central o en la banquina, pueden influir sobre el tránsito que circula por los carriles de la autopista.

Estudios recientes sobre autopistas han permitido comprender mejor las características del flujo en autopistas con relación a la influencia de cuellos de botella existentes corriente arriba y corriente abajo. El flujo de tránsito dentro de un tramo básico de autopista se puede caracterizar generalmente en tres tipos de flujo: flujo libre, flujo de dispersión de cola y flujo en congestión. Cada tipo de flujo se puede definir dentro de rangos de relación velocidad-flujo-densidad y representa diferentes condiciones sobre la autopista.

- **Flujo libre** representa condiciones de tránsito que no están afectadas por cuellos de botella corriente arriba o corriente abajo. Este régimen de flujo generalmente se define dentro de rangos de velocidad que van de 90 a 120 km/hora cuando los volúmenes equivalentes son bajos a moderados y rangos que van de 70 a 100 km/hora cuando los volúmenes equivalentes son altos.
- **Volumen de dispersión de la cola** representa el tránsito que recién ha pasado por un cuello de botella y está acelerando para volver a alcanzar la velocidad en flujo libre de la autopista. La descarga de la cola se caracteriza por un flujo relativamente estable, siempre y cuando no exista el efecto de otro cuello de botella aguas abajo. Este tipo de tránsito generalmente se encuentra en volúmenes que oscilan entre 2000 y 2300 automóviles por hora y por carril, con velocidades que normalmente se mueven entre 55 km/hora hasta la velocidad en flujo libre del tramo de autopista. Las velocidades más bajas normalmente se observan ni bien se ha pasado el cuello de botella. Según el trazado horizontal y vertical, el tránsito de dispersión de la cola usualmente vuelve a retomar la velocidad

del flujo libre del tramo entre 1 a 2 kilómetros aguas abajo del cuello de botella. Recientes estudios sugieren que el volumen equivalente de dispersión de la cola desde el cuello de botella es menor que el flujo máximo que se observa antes del inconveniente. Como una estimación muy general se puede decir que esta disminución es de aproximadamente el 5 por ciento.

- **Tránsito en congestión** representa el flujo influenciado por los efectos de un cuello de botella aguas abajo. El volumen de tránsito en un régimen de congestión puede variar en un amplio rango y también lo hacen las velocidades dependiendo de la severidad del cuello de botella. Las colas se pueden extender muchos miles de metros corriente arriba del cuello de botella. Las colas en autopista difieren de las colas en intersecciones en el hecho que no son estáticas o quietas. En autopistas los vehículos se mueven lentamente en la cola, con períodos de detención y movimientos.

1.4.1 Flujo bajo condiciones básicas

Las características básicas empleadas en este capítulo corresponden al siguiente grupo de condiciones ideales.

- Ancho mínimo de carril: 3,6 m.
- Distancia lateral mínima sin obstáculos: 1,80 m medida entre el borde del carril de circulación y el objeto u obstáculo en el costado del camino. La distancia mínima al separador central debe ser de sesenta centímetros.
- Corriente vehicular compuesta únicamente por automóviles.
- En áreas urbanas conductores diarios; para otras áreas conductores regulares.
- Distribuidores espaciados por lo menos cada 3 km o más.
- Terreno llano con pendientes no superiores al 2 por ciento.

Estas condiciones ideales representan el más alto tipo de tramo básico de autopista, con velocidad en flujo libre de 110 km/hora o superiores. Se debe destacar que estas condiciones se consideran ideales solamente desde el punto de vista de la velocidad del flujo libre, la capacidad, y el nivel de servicio y que el término ideal no tiene ninguna connotación con respecto a la seguridad u otros factores.

1.4.2 Velocidad en flujo libre

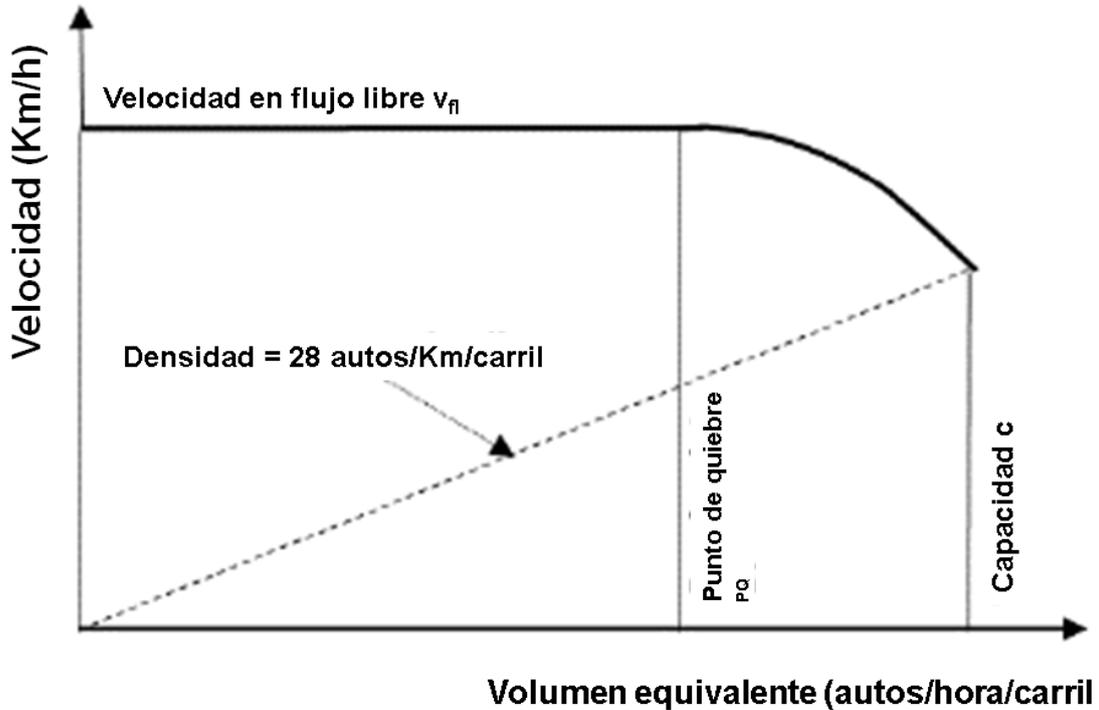
La Figura 1 muestra la forma general de la curva volumen velocidad.

En la Figura 2 se muestran las características de las relaciones de la velocidad con el flujo para las condiciones ideales. Hay 5 curvas, una para cada uno de los siguientes niveles de velocidad en flujo libre: 120 Km/h, 112 Km/h, 104 Km/h, 96 Km/h, 88 Km/h.

La capacidad varía con la velocidad en flujo libre. Las capacidades son:

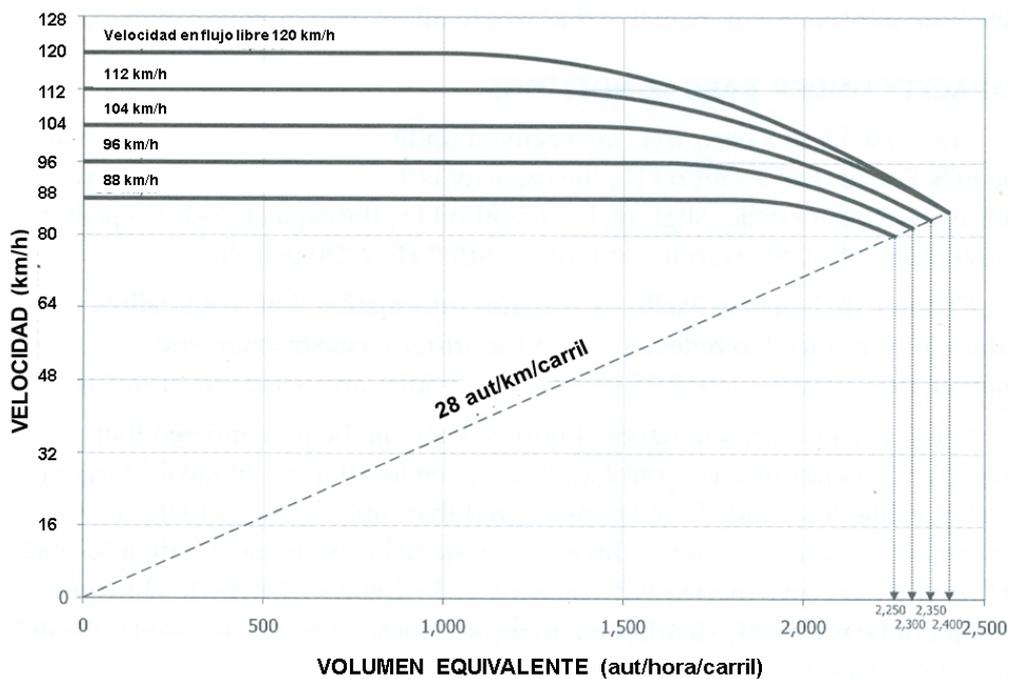
- 2400 automóviles/hora/carril para velocidades en flujo libre de 112 y 120 Km/h
- 2350 automóviles/hora/carril para velocidad en flujo libre de 104 Km/h
- 2300 automóviles/hora/carril para velocidad en flujo libre de 96 Km/h
- 2250 automóviles/hora/carril para velocidad en flujo libre de 88 Km/h.

Figura 1: Forma general de la curva volumen - velocidad



Fuente: Highway Capacity Manual 2016

FIGURA 2: CURVAS VELOCIDAD-VOLUMEN PARA TRAMOS DE AUTOPISTAS



Fuente: Highway Capacity Manual 2016

Bajo condiciones ideales de tránsito y geometría, las autopistas pueden operar con capacidades de hasta 2400 automóviles por hora y por carril. Esta capacidad normalmente se alcanza en autopistas con velocidad en flujo libre de 112 km/hora o más. A medida que la velocidad del flujo libre decrece, hay una pequeña disminución en la capacidad. Por ejemplo, la capacidad de un tramo básico de autopista con una velocidad en flujo libre de 88 km/hora puede ser aproximadamente de 2250 automóviles por hora y por carril.

La velocidad promedio de los automóviles en los volúmenes equivalentes que representan capacidad se estima que oscilan entre el 85 km/hora (para velocidades en flujo libre de 112 km/hora o más) a 80 km/hora para tramos con velocidad en flujo libre de 88 km/hora. Obsérvese que cuanto mayor es la velocidad en flujo libre, mayor es la caída de la velocidad cuando el volumen equivalente se acerca a la capacidad. Así, para una velocidad de flujo libre de 120 km/hora, la caída es de 35 km para condiciones cercanas a la capacidad. Esta caída es solamente de 8 km/hora para autopistas con una velocidad en flujo libre de 88 km/hora.

Todos los estudios recientes en autopistas indican que la velocidad en las mismas es insensible al volumen de tránsito cuando el mismo es entre bajo y moderado. Esto se refleja en la Figura 1, que muestra la velocidad constante hasta volúmenes de 1000 automóviles por hora y por carril para velocidad del flujo libre de 120 km/hora. Para autopista con velocidad en flujo libre menor, la restricción en la cual la velocidad es insensible al volumen equivalente se extiende incluso a flujos mayores. Así, la velocidad en flujo libre se puede medir fácilmente en campaña como la velocidad promedio de los automóviles cuando los volúmenes equivalentes son menores a 1000 automóviles por hora y por carril. Para cada curva existe un rango de volúmenes, desde el valor nulo hasta el punto de quiebre, en el cual la velocidad permanece constante. El rango varía para cada curva de la siguiente manera:

- $v_{fl} = 120$ Km/hora: 0 a 1.000 aut/hora.carril
- $v_{fl} = 112$ Km/hora: 0 a 1.200 aut/hora.carril
- $v_{fl} = 104$ Km/hora: 0 a 1.400 aut/hora.carril
- $v_{fl} = 96$ Km/hora: 0 a 1.600 aut/hora.carril
- $v_{fl} = 88$ Km/hora: 0 a 1.800 aut/hora.carril

A partir del punto de quiebre, a medida que aumenta el volumen la velocidad decrece hasta alcanzar la capacidad.

Las fórmulas que se utilizan para estimar la velocidad son las que se muestran en el Cuadro 1.

1.4.3 Dispersión de cola y tránsito en congestión

A diferencia del tránsito en flujo libre, la dispersión de cola y el tránsito en congestión no han sido tan extensivamente estudiados, y estos tipos de flujos pueden ser altamente variables. Sin embargo, estudios realizados sobre autopistas en los últimos años proveen una interesante idea de las posibles relaciones entre velocidad y volumen para describir estos dos aspectos de un

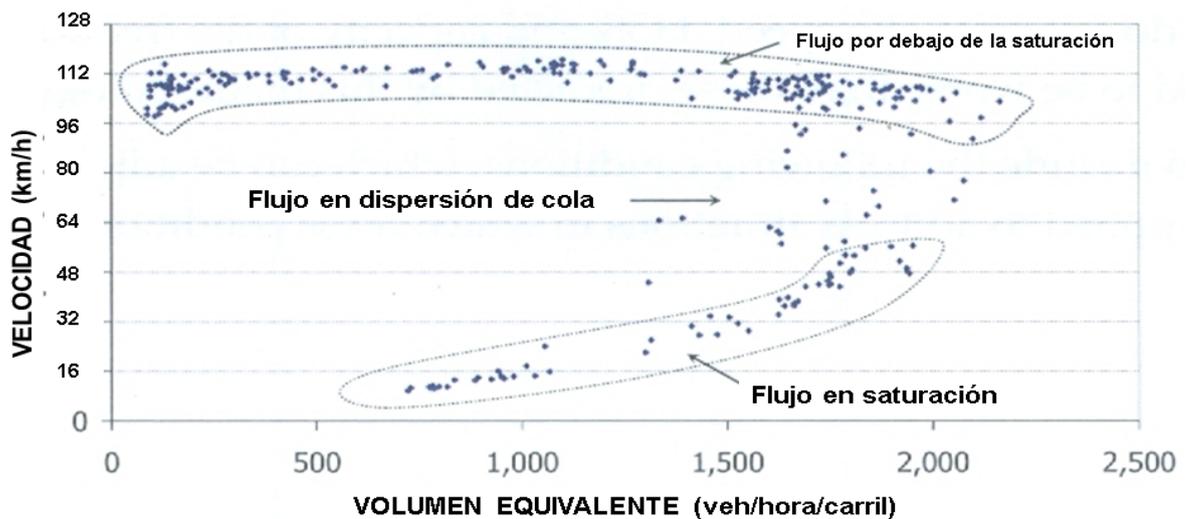
tránsito. La Figura 3 presenta una posible relación que debe ser tomada por el momento desde el punto de vista informativo solamente.

CUADRO 1: ECUACIONES DE LAS CURVAS VELOCIDAD VOLUMEN

Velocidad en flujo libre (km/h)	Punto de quiebre (aut/h/carri)	Velocidad (km/h)		
		<= al punto de quiebre	>punto de quiebre<=capacidad	Capacidad
120	1000	120	$120 - 0,000017712 \times (V_p - 1000)^2$	85
112	1200	112	$112 - 0,00001856 \times (V_p - 1200)^2$	85
104	1400	104	$104 - 0,000022688 \times (V_p - 1400)^2$	84
96	1600	96	$96 - 0,000029056 \times (V_p - 1600)^2$	82
88	1800	88	$88 - 0,000039504 \times (V_p - 1800)^2$	80

Fuente: Highway Capacity Manual 2016

FIGURA 3: TRES TIPOS DE FLUJO EN AUTOPISTAS



Nota: I-405, Los Ángeles, California

Fuente: Departamento de Transporte de California, 2008

Se advierte que aunque la Figura 3 puede proveer un modelo de predicción general de la velocidad en momentos de dispersión de cola y flujos en congestión, esto debe considerarse solamente desde el punto de vista conceptual. Son necesarias investigaciones más detalladas para definir con mayor precisión los volúmenes en estas dos situaciones.

1.4.4 Factores que afectan la velocidad en flujo libre

La velocidad en flujo libre de una autopista depende de las condiciones del tránsito y el camino. A continuación se describen dichas condiciones.

1.4.4.1 Ancho de carril y distancia a las obstrucciones laterales

Cuando los anchos de carril son menores de 3,6 m, los conductores se ven forzados a circular a distancias laterales de los otros vehículos menores de la que desearían y tienden a compensar este hecho manteniéndose más alejados de los vehículos en el mismo carril. El efecto de las obstrucciones laterales es similar cuando existen objetos muy cerca del pavimento a los costados del camino o en el separador central, los conductores tienden a alejarse de los mismos dejando mayor espacio desde el borde de la calzada que en condiciones normales o ideales. Esto tiene el mismo efecto que carriles angostos, obligando a los conductores a acercarse lateralmente. Nuevamente, los conductores en general compensan esta situación dejando mayor distancia entre vehículos del mismo carril.

Cuando los conductores dejan mayor distancia para una velocidad dada el volumen pasante decrece. El mismo efecto se puede visualizar a la inversa para una distancia dada los vehículos disminuirán la velocidad cuando existan obstrucciones laterales y/o restricciones de ancho resultando igualmente un menor volumen.

Los conductores en el carril contiguo al separador central parecen no percibir la obstrucción lateral cuando la misma no está a menos de 60 cm., mientras que los que circulan por el carril derecho (de la banquina), se ven afectados a distancias menores a 1,80 m.

1.4.4.2 Densidad de intercambiadores

Los ingresos y entrecruzamientos asociados con los intercambiadores afectan la velocidad del tránsito. Los tramos de autopista con intercambiadores próximos unos a otros, como ocurre en zonas densamente pobladas, operan a velocidades en flujo libre inferiores a aquellos tramos de autopistas suburbanas o rurales, donde los intercambiadores son menos frecuentes. Estudios recientes, que sirvieron de base para los procedimientos metodológicos que se proponen, encontraron que en general las velocidades bajan a medida que aumenta la frecuencia de los intercambiadores. La distancia promedio ideal entre intercambiadores, para un tramo de autopista razonablemente largo (ocho a diez kilómetros) es de tres kilómetros o más. La mínima distancia promedio entre intercambiadores que se considera posible, aunque altamente improbable mantener, es de 1 km.

1.4.4.3 Ómnibus y camiones

La presencia de otro tipo de vehículos además de los automóviles afecta la corriente vehicular en dos formas: (a) tales vehículos son de mayor dimensión que los automóviles y por lo tanto ocupan más espacio de camino que estos, y (b) la capacidad de operación de dichos vehículos (aceleración, deceleración, mantenimiento de la velocidad, etc.) es generalmente inferior a la de los automóviles; cuando se mezclan en el flujo de tránsito, esta diferencia de capacidades de rendimiento origina la formación de discontinuidades en la corriente vehicular que no pueden ser fácilmente cubiertas por maniobras de sobrepaso.

El segundo impacto es especialmente significativo en pendientes ascendentes prolongadas, en las que los camiones se pueden ver forzados a disminuir sensiblemente su velocidad produciendo en consecuencia discontinuidades significativas en el flujo de tránsito.

1.4.4.4 Población de conductores

Las condiciones ideales definidas para las relaciones típicas velocidad-flujo-densidad asumen una población de conductores compuesta principalmente por usuarios diarios. Los flujos de tránsito turístico, compuestos fundamentalmente por conductores ocasionales o de fin de semana, operan con bastante menor eficiencia que el tránsito de los días hábiles. Para dichas corrientes vehiculares se han observado reducciones de la capacidad de entre el 10 y el 15 %, aunque la velocidad en flujo libre no parece verse afectada en la misma medida.

2 METODOLOGÍA

2.1 Límites de aplicación de la metodología

La metodología no tiene en cuenta:

- Controles de carril (restricción a cambios de carril)
- Segmentos con puentes o túneles extensos
- Segmentos próximos a una estación de peaje
- Autopistas con velocidad en flujo libre de más de 120 kilómetros por hora.
- Autopistas con velocidad en flujo libre de menos de 88 kilómetros por hora.
- Velocidades límites señalizadas
- Presencia de sistemas ITS que encaucen al vehículo o al conductor
- Controles en las ramas que aumenten la capacidad
- Aspectos negativos de condiciones del clima, accidentes o incidentes de tránsito, cruces ferroviarios ni actividades de construcción o mantenimiento
- Influencia de colas corriente abajo
- Operación en condiciones de congestión

2.2 Niveles de servicio

2.2.1 Medida de la eficiencia

La velocidad sola no es adecuada para medir la eficiencia y definir los niveles de servicio ya que existe un amplio rango de volúmenes para los cuales la velocidad se mantiene relativamente constante. Aunque la velocidad es la mayor preocupación de los conductores con respecto a la calidad del servicio, la libertad para maniobrar y la proximidad con otros vehículos son parámetros igualmente importantes. Dado que estas características están relacionadas directamente con la densidad de la corriente de tránsito de la autopista, se

emplea la densidad como parámetro para definir los niveles de servicio. Las densidades límites son:

NIVEL DE SERVICIO	RANGO DE DENSIDAD (aut/km/carril)
A	0-7
B	> 7-11
C	>11-16
D	>16-22
E	>22-28
F	>28

Fuente: Highway Capacity Manual 2016

2.2.2 Criterio para definir el nivel de servicio

En la Tabla 1 se muestra el criterio para definir el nivel de servicio en tramos básicos de autopistas.

2.2.3 Descripción de los niveles de servicio

Los niveles de servicio se han definido de forma tal que representen rangos razonables de las tres variables: velocidad de marcha, densidad y volumen equivalente. La forma general de las curvas típicas de velocidad-densidad-volumen requiere que a medida que el nivel de servicio se desplaza de A hacia F, el rango de las densidades y velocidades abarcadas por cada nivel se haga mayor, mientras que los rangos correspondientes a los volúmenes se hacen menores.

A continuación se describen en forma general las condiciones de operación:

1. **NIVEL DE SERVICIO A**: describe operaciones con flujo libre.

Estas condiciones proporcionan al conductor un elevado nivel de confort físico y psíquico. En caso de pequeños incidentes o interrupciones, si bien se produce un deterioro local del nivel de servicio, no se forman colas y rápidamente se vuelve al nivel A una vez finalizada la alteración.

2. **NIVEL DE SERVICIO B**: representa condiciones razonables de flujo libre.

Las maniobras dentro de la corriente de tránsito se pueden realizar con pocas restricciones y aún es elevado el grado de confort del conductor. Los pequeños incidentes se absorben rápidamente si bien el deterioro local del nivel de servicio puede ser mayor que en el caso del nivel A.

3. **NIVEL DE SERVICIO C**: proporciona operaciones estables, pero el volumen se aproxima al rango en el cual pequeños incrementos de volumen producen una importante reducción en el nivel de servicio. Existen restricciones significativas en las maniobras, y el cambio de carril requiere un cuidado adicional por parte del conductor. Aún se absorben las pequeñas interferencias pero con un gran deterioro local del nivel de servicio. Si la

interrupción es mayor, pueden formarse colas. Se incrementa la tensión del conductor ya que debe aumentar su atención para operar con seguridad.

4. NIVEL DE SERVICIO D: este nivel limita con el flujo inestable.

En este rango, pequeños incrementos de volumen provocan importantes deterioros en el servicio. Existe una limitación severa en la posibilidad de maniobrar, y se reduce drásticamente el nivel de confort físico y psíquico del conductor. La corriente de tránsito posee poco espacio para absorber interrupciones y por este motivo aún los pequeños incidentes provocarán formaciones de colas.

5. NIVEL DE SERVICIO E: el límite entre el nivel E y F corresponde a la operación en capacidad.

Las operaciones son muy inestables ya que prácticamente no hay espacios libres en la corriente. Los vehículos están separados con la mínima distancia para la cual se puede desarrollar un flujo estable. Cuando se da lugar a cualquier vehículo que entra o cambia de carril, la interferencia se propaga corriente arriba. En la capacidad no se pueden disipar ni aún las más pequeñas interferencias. Cualquier incidente produce una detención importante y la formación de cola. La maniobrabilidad está limitada substancialmente, y el conductor posee un nivel de confort reducido.

6. NIVEL DE SERVICIO F: corresponde a flujo forzado o interrumpido.

Estas condiciones generalmente existen dentro de las colas formadas por interrupciones. Estas interrupciones se producen por diversas causas:

- a. Los incidentes de tránsito provocan una reducción temporaria de la capacidad en tramos cortos, de tal modo que la cantidad de vehículos que arriban al lugar es mayor que la cantidad de vehículos que lo atraviesan.
- b. Existen puntos reiterados de congestión, tales como áreas de convergencia, o entrecruzamiento, y carriles de salida, donde el número de vehículos que arriban es mayor que el número de vehículos que cruzan el lugar.
- c. Para el caso de estudios futuros representa un problema cualquier lugar en el cual el volumen equivalente de la hora pico proyectado (u otro), excede la capacidad estimada.

Es de hacer notar que en todos los casos la detención se produce cuando la relación del tránsito que realmente llega con relación a la capacidad existente o el tránsito proyectado con relación a la capacidad estimada es mayor que 1.00. Las operaciones en ese punto serán en o estarán muy cerca de la capacidad y la operación corriente abajo será mejor a medida que los vehículos pasan el cuello de botella (suponiendo que no existan problemas adicionales corriente abajo). Las operaciones en N de S F que se observan en una cola son el resultado de una detención o cuello de botella corriente abajo. Por lo tanto la designación "N de S F" se usa tanto para identificar el punto de

detención o cuello de botella como para operaciones en la cola que se forma detrás del mismo.

La extensión de la cola y las demoras causadas por la misma son de gran importancia para el análisis de tramos congestionados de autopista. Existe una metodología para estimar la longitud de la cola y las demoras detrás de un cuello de botella conociendo las relaciones entre la llegada y la partida del mismo. El procedimiento permite una cuantificación grosera de la extensión de la congestión originada por una situación de N de S F.

2.3 Relaciones básicas

La predicción del nivel de servicio para un tramo general de autopista generalmente involucra tres componentes:

1. Volumen equivalente
2. Velocidad en flujo libre
3. Nivel de servicio

La determinación de estos parámetros se describe en ese orden en los párrafos siguientes.

2.3.1 Determinación del volumen equivalente

Todos los aspectos del modelo y los criterios de nivel de servicio se expresan en volúmenes máximos equivalentes en automóviles por hora para el pico de 15 minutos de la hora de diseño, por lo tanto, antes de realizar cualquiera de estos procedimientos, todos los volúmenes de la autopista se deben convertir a automóviles equivalentes por hora en las condiciones ideales del pico de 15 minutos de la hora de diseño. La siguiente ecuación se usa para convertir cualquier volumen horario en vehículos equivalentes según el formato expresado.

$$V_e = \frac{V_{vph}}{FHP \cdot N \cdot f_{vp} \cdot f_p}$$

donde:

V_e = Volumen equivalente correspondiente a 15 minutos pico (aut/h/carril).

V_{vph} = Volumen horario en vehículos por hora en las condiciones existentes.

FHP = Factor de hora pico.

N = Número de carriles

f_{vp} = Factor de ajuste por presencia de vehículos pesados.

f_p = Factor de ajuste por población de conductores.

2.3.1.1 **Factor de Hora Pico**

El FHP representa la variación del tránsito dentro de la hora. Las máximas relaciones de flujo se consideran en los volúmenes horarios con el uso del **factor de hora pico**. Este factor se define como la relación entre el volumen horario total y la máxima relación de flujo durante la hora:

FHP = Volumen horario / Máxima relación de flujo durante la hora

Si se utilizan períodos de quince minutos, el FHP se puede calcular como:

$$\text{FHP} = V_h / (4 \times V_{15})$$

donde:

V_h = volumen horario (vehículos/hora)

V_{15} = volumen durante los máximos 15 minutos de la hora (vehículos / 15 minutos)

Donde existan conteos de tránsito disponibles y los intervalos del conteo permitan identificar el período de 15 minutos, el volumen pico se calculará directamente como 4 veces el volumen de los 15 minutos máximos.

2.3.1.2 **Ajuste por presencia de vehículos pesados**

Los valores ideales del volumen máximo de servicio y la capacidad se deben reducir para tener en cuenta la presencia de vehículos pesados en la corriente de tránsito.

Todos los vehículos pesados se clasifican como camión simple o camión pesado. Los ómnibus y los recreacionales se los considera como camión simple.

El factor de ajuste por vehículos pesados se calcula con la siguiente expresión:

$$f_{vp} = 1/[1+P_c (E_c-1)]$$

donde:

f_{vp} = factor de ajuste por efecto combinado de vehículos pesados sobre el flujo vehicular.

P_c = porcentaje de la suma de camiones simples y pesados (en decimales), en el flujo vehicular.

E_c = automóvil equivalente para un vehículo pesado.

Este ajuste se hace con el factor f_{vp} , que se obtiene del siguiente cálculo:

1. Se encuentra el equivalente en automóviles por vehículo pesado en función de las condiciones prevalecientes del tránsito y el camino. El E_c representa el número de automóviles que consumiría el mismo porcentaje de la capacidad de la autopista que el vehículo pesado.

2. Con el valor de E_c y con el porcentaje correspondiente (P_c), calcular el factor f_{vp} .

La influencia de los vehículos pesados depende de las pendientes y de la composición del tránsito. El equivalente en automóviles se puede definir para tres casos:

1. Tramos largos uniformes: cuando no se presenta ninguna pendiente que produzca un impacto importante en la operación dentro del tramo total. En general son tramos que no poseen pendientes mayores o iguales a 3% en longitudes superiores a 400 metros ó pendientes entre el 2% y 3% en longitudes superiores a 800 metros.
2. Pendientes específicas ascendentes: cualquier pendiente entre el 2% y el 3% con una longitud mayor a 800 metros o pendientes de 3% o más en longitudes superiores a 400 metros se analiza individualmente por la influencia significativa que ejerce sobre la corriente de tránsito.

A continuación se describe la metodología para hallar el valor adecuado de f_{vp} :

2.3.1.3 Automóviles equivalentes para tramos largos uniformes

El terreno de la autopista se clasifica en una de las siguientes categorías:

- a) Terreno llano: la combinación del trazado horizontal y vertical permite a los vehículos pesados mantener velocidades similares a las velocidades de los automóviles; pueden presentarse pendientes cortas de no más de 2 %.
- b) Terreno ondulado: la combinación del trazado horizontal y vertical provoca una reducción importante de la velocidad de los vehículos pesados con respecto a la mantenida por los automóviles, pero sin obligarlos a operar a marcha forzada durante períodos prolongados.

No se da equivalente para terreno montañoso (que es cuando la combinación del trazado horizontal y vertical obliga a los vehículos pesados a operar a marcha forzada en longitudes importantes o intervalos frecuentes). En ese caso hay una metodología especial que se desarrolla más adelante.

La clasificación exacta del tipo de terreno depende del terreno en sí mismo y de la composición de vehículos pesados existente.

Por ejemplo, pendientes que obligan a camiones grandes a circular a marcha forzada y pueden no producir el mismo efecto en ómnibus o en camiones más pequeños.

En la Tabla 2 se dan los automóviles equivalentes para vehículos pesados.

2.3.1.4 Automóviles equivalentes para pendientes específicas

Se deben analizar por separado si se trata de una pendiente aislada de valor constante, o si es parte de un tramo compuesto por varias pendientes.

TABLA 2: EQUIVALENTES PARA TRAMOS GENERALES		
Automóviles equivalentes	Tipo de terreno	
	Llano	Ondulado
E_c	2,0	3,0
Fuente: Highway Capacity Manual 2016		

La operación de los vehículos pesados a lo largo de pendientes importantes es diferente para las distintas clases de vehículos, y para los distintos tipos de vehículos dentro de una misma clase, especialmente en el caso de camiones por la diversidad de modelos existentes. Los ómnibus poseen características más uniformes.

Numerosos estudios indican que la relación peso-potencia promedio de los camiones en Estados Unidos es de 45 Kg/Hp en camiones simples y 70 Kg/Hp en camiones pesados.

La Tabla 3 da la equivalencia en automóviles para usar en el análisis de capacidad cuando la composición de los camiones es una mezcla de 30% camión simple y 70% camión pesado.

La Tabla 4 da la equivalencia en automóviles para usar en el análisis de capacidad cuando la composición de los camiones es una mezcla de 50% camión simple y 50% camión pesado.

La Tabla 5 da la equivalencia en automóviles para usar en el análisis de capacidad cuando la composición de los camiones es una mezcla de 70% camión simple y 30% camión pesado. Representan solamente condiciones ascendentes.

Cuando un vehículo pesado circula por una rampa, el impacto que produce es mayor a medida que reduce su velocidad. Por lo tanto, en la mayoría de los casos, se eligen los automóviles equivalentes para el extremo final de la rampa. Sin embargo, pueden existir puntos intermedios de interés. Por ejemplo, si se produce la unión de una rama en una pendiente prolongada, la longitud e inclinación de la pendiente en la intersección serán de interés para el análisis de los movimientos de convergencia o divergencia. Si una pendiente compuesta se inicia con un tramo ascendente prolongado de 5 %, seguido por un tramo de 2 %, los vehículos pesados estarán circulando más lentamente al final de la porción con pendiente del 5 %. Ese punto sería en consecuencia de fundamental interés.

La longitud de la pendiente se obtiene del perfil longitudinal correspondiente, y generalmente comprende el tramo de la pendiente más una parte de las curvas verticales ubicadas al comienzo y al final del mismo. Se sugiere incluir 1/4 de la longitud de cada una de las 2 curvas citadas. En el caso de 2 rampas consecutivas enlazadas con una curva vertical, se debe considerar 1/2 de la longitud de la curva con cada rampa.

TABLA 3: EQUIVALENTES PARA MEZCLA 30% CAMIÓN SIMPLE 70% PESADOS

PENDIENTE ASCENDENTE (%)	LONGITUD (m)	E _c								
		% DE CAMIONES Y OMNIBUS								
		2	4	5	6	8	10	15	20	>=25
-2	200	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	600	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	1000	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	1400	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	2000	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	2400	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
0	200	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	600	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	1000	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	1400	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	2000	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	2400	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
2	200	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	600	3,76	2,96	2,78	2,65	2,48	2,38	2,22	2,14	2,09
	1000	4,47	3,33	3,08	2,91	2,68	2,54	2,34	2,23	2,17
	1400	4,80	3,50	3,22	3,03	2,77	2,61	2,39	2,28	2,21
	2000	5,00	3,60	3,30	3,09	2,83	2,66	2,42	2,30	2,23
	2400	5,04	3,62	3,32	3,11	2,84	2,67	2,43	2,31	2,23
2,5	200	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	600	4,11	3,14	2,93	2,78	2,58	2,46	2,28	2,19	2,13
	1000	5,04	3,62	3,32	3,11	2,84	2,67	2,43	2,31	2,23
	1400	5,48	3,85	3,51	3,27	2,96	2,77	2,50	2,36	2,28
	2000	5,73	3,98	3,61	3,36	3,03	2,83	2,54	2,40	2,31
	2400	5,80	4,02	3,64	3,38	3,05	2,84	2,55	2,41	2,32
3,5	200	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	600	4,88	3,54	3,25	3,05	2,80	2,63	2,41	2,29	2,22
	1000	6,34	4,30	3,87	3,58	3,20	2,97	2,64	2,48	2,38
	1400	7,03	4,66	4,16	3,83	3,39	3,12	2,76	2,57	2,46
	2000	7,44	4,87	4,33	3,97	3,50	3,22	2,82	2,62	2,50
	2400	7,53	4,92	4,38	4,01	3,53	3,24	2,84	2,63	2,51
4,5	200	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	600	5,80	4,02	3,64	3,38	3,05	2,84	2,55	2,41	2,32
	1000	7,90	5,11	4,53	4,14	3,63	3,32	2,90	2,68	2,55
	1400	8,91	5,64	4,96	4,50	3,92	3,56	3,07	2,82	2,67
	1800	9,19	5,78	5,08	4,60	3,99	3,62	3,11	2,85	2,70
	2000	9,19	5,78	5,08	4,60	3,99	3,62	3,11	2,85	2,70
5,5	200	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	600	6,87	4,58	4,10	3,77	3,35	3,09	2,73	2,55	2,44
	1000	9,78	6,09	5,33	4,82	4,16	3,76	3,21	2,93	2,77
	1400	11,20	6,83	5,94	5,33	4,56	4,09	3,45	3,12	2,93
	1800	11,60	7,04	6,11	5,47	4,67	4,18	3,51	3,17	2,97
	2000	11,60	7,04	6,11	5,47	4,67	4,18	3,51	3,17	2,97
6	200	2,62	2,37	2,30	2,24	2,17	2,12	2,04	1,99	1,97
	600	7,48	4,90	4,36	3,99	3,52	3,23	2,83	2,63	2,51
	1000	10,87	6,66	5,79	5,21	4,46	4,01	3,39	3,08	2,89
	1400	12,54	7,54	6,51	5,81	4,94	4,40	3,67	3,30	3,08
	1800	13,02	7,78	6,71	5,99	5,07	4,51	3,75	3,37	3,14
	2000	13,02	7,78	6,71	5,99	5,07	4,51	3,75	3,37	3,14

Se recomienda interpolar

Fuente: Highway Capacity Manual 2016

TABLA 4: EQUIVALENTES PARA MEZCLA 50% CAMIÓN SIMPLE 50% PESADOS

PENDIENTE ASCENDENTE (%)	LONGITUD (m)	E _c								
		% DE CAMIONES Y OMNIBUS								
		2	4	5	6	8	10	15	20	>=25
-2	200	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	600	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	1000	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	1400	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	2000	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	2400	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
0	200	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	600	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	1000	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	1400	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	2000	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	2400	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
2	200	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	600	3,76	2,95	2,77	2,64	2,47	2,36	2,20	2,11	2,06
	1000	4,32	3,24	3,01	2,84	2,63	2,49	2,29	2,19	2,12
	1400	4,57	3,37	3,11	2,93	2,70	2,55	2,33	2,22	2,15
	2000	4,71	3,45	3,17	2,99	2,74	2,58	2,36	2,24	2,17
	2400	4,74	3,47	3,19	3,00	2,75	2,59	2,36	2,24	2,17
2,5	200	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	600	4,10	3,13	2,92	2,77	2,57	2,44	2,26	2,16	2,10
	1000	4,84	3,52	3,23	3,03	2,77	2,61	2,38	2,26	2,18
	1400	5,17	3,69	3,37	3,15	2,87	2,69	2,43	2,30	2,22
	2000	5,36	3,79	3,45	3,22	2,92	2,73	2,47	2,33	2,24
	2400	5,40	3,81	3,47	3,24	2,93	2,74	2,47	2,33	2,25
3,5	200	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	600	4,89	3,54	3,25	3,05	2,79	2,62	2,39	2,26	2,19
	1000	6,05	4,15	3,75	3,47	3,11	2,89	2,58	2,42	2,32
	1400	6,58	4,43	3,97	3,66	3,26	3,01	2,67	2,49	2,39
	2000	6,88	4,58	4,10	3,77	3,35	3,09	2,72	2,53	2,42
	2400	6,95	4,62	4,13	3,80	3,37	3,10	2,73	2,54	2,43
4,5	200	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97	1,93
	600	5,83	4,03	3,65	3,39	3,05	2,84	2,55	2,39	2,30
	1000	7,53	4,92	4,38	4,01	3,53	3,24	2,83	2,62	2,50
	1400	8,32	5,34	4,72	4,29	3,75	3,42	2,97	2,73	2,59
	1600	8,53	5,45	4,81	4,37	3,81	3,47	3,00	2,76	2,62
	5,5	200	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97
600		6,97	4,63	4,14	3,81	3,38	3,11	2,74	2,55	2,43
1000		9,37	5,89	5,16	4,68	4,05	3,67	3,14	2,88	2,72
1400		10,49	6,48	5,65	5,09	4,37	3,93	3,34	3,03	2,85
1600		10,80	6,64	5,78	5,20	4,46	4,01	3,39	3,08	2,89
6		200	2,67	2,38	2,31	2,25	2,16	2,11	2,02	1,97
	600	7,64	4,98	4,43	4,05	3,56	3,26	2,85	2,64	2,51
	1000	10,45	6,45	5,63	5,07	4,36	3,921	3,33	3,03	2,85
	1400	11,78	7,16	6,20	5,56	4,74	4,24	3,56	3,22	3,01
	1600	12,15	7,35	6,36	5,69	4,85	4,33	3,62	3,27	3,05

Se recomienda interpolar

Fuente: Highway Capacity Manual 2016

TABLA 5: EQUIVALENTES PARA MEZCLA 70% CAMIÓN SIMPLE 30% PESADOS

PENDIENTE ASCENDENTE (%)	LONGITUD (m)	E _c								
		% DE CAMIONES Y OMNIBUS								
		2	4	5	6	8	10	15	20	>=25
-2	200	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
	600	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
	1000	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
	1400	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
	2000	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
	2400	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
0	200	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
	600	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
	1000	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
	1400	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
	2000	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
	2400	2.39	2.18	2.12	2.07	2.01	1.96	1.89	1.85	1.83
2	200	2.67	2.32	2.23	2.17	2.08	2.03	1.94	1.89	1.86
	600	3.63	2.82	2.64	2.52	2.35	2.25	2.10	2.02	1.97
	1000	4.12	3.08	2.85	2.69	2.49	2.36	2.18	2.08	2.02
	1400	4.37	3.21	2.96	2.78	2.56	2.42	2.22	2.11	2.05
	2000	4.53	3.29	3.02	2.84	2.60	2.45	2.24	2.13	2.07
	2400	4.58	3.31	3.04	2.86	2.61	2.46	2.25	2.14	2.07
2,5	200	2.75	2.36	2.27	2.20	2.11	2.04	1.95	1.90	1.87
	600	4.01	3.02	2.80	2.65	2.46	2.33	2.16	2.06	2.01
	1000	4.66	3.35	3.08	2.88	2.64	2.48	2.26	2.15	2.08
	1400	4.99	3.52	3.21	3.00	2.73	2.56	2.32	2.19	2.12
	2000	5.20	3.64	3.30	3.08	2.79	2.60	2.35	2.22	2.14
	2400	5.26	3.67	3.33	3.10	2.80	2.62	2.36	2.23	2.15
3,5	200	2.93	2.45	2.34	2.26	2.16	2.09	1.98	1.92	1.89
	600	4.86	3.46	3.16	2.96	2.69	2.53	2.30	2.18	2.10
	1000	5.88	3.99	3.59	3.32	2.98	2.76	2.46	2.31	2.22
	1400	6.40	4.26	3.81	3.51	3.12	2.88	2.55	2.38	2.28
	2000	6.74	4.43	3.96	3.63	3.21	2.96	2.60	2.42	2.32
	2400	6.83	4.48	3.99	3.66	3.24	2.98	2.62	2.44	2.33
4,5	200	3.13	2.56	2.43	2.34	2.21	2.13	2.01	1.95	1.91
	600	5.88	3.99	3.59	3.32	2.98	2.76	2.46	2.31	2.22
	1000	7.35	4.75	4.22	3.85	3.39	3.10	2.71	2.51	2.39
	1400	8.11	5.15	4.54	4.13	3.60	3.27	2.83	2.61	2.47
	1600	8.33	5.27	4.63	4.21	3.66	3.33	2.87	2.64	2.50
	5,5	200	3.37	2.69	2.53	2.42	2.28	2.19	2.05	1.98
600		7.09	4.62	4.11	3.76	3.31	3.04	2.66	2.47	2.36
1000		9.13	5.68	4.97	4.49	3.88	3.51	3.00	2.74	2.59
1400		10.21	6.24	5.43	4.88	4.18	3.76	3.18	2.89	2.71
1600		10.52	6.41	5.57	5.00	4.27	3.83	3.24	2.93	2.75
6		200	3.51	2.76	2.59	2.47	2.32	2.22	2.08	2.00
	600	7.78	4.98	4.40	4.01	3.51	3.20	2.78	2.56	2.44
	1000	10.17	6.23	5.42	4.87	4.17	3.75	3.18	2.88	2.71
	1400	11.43	6.88	5.95	5.32	4.53	4.04	3.39	3.06	2.86
	1600	11.81	7.08	6.11	5.46	4.64	4.13	3.45	3.11	2.90

Se recomienda interpolar

Fuente: Highway Capacity Manual 2016

2.3.1.5 *Pendientes compuestas*

Se define la "pendiente promedio" hasta el punto crítico de interés que es la relación entre el desnivel total desde el comienzo de la pendiente compuesta hasta el punto en estudio y la longitud total (el valor obtenido se redondea a porcentajes enteros). Este método es aplicable cuando cada una de las pendientes es inferior al 4 % o la longitud total del conjunto es igual o menor de 1200 m. Si las condiciones de las pendientes son más severas, se debe calcular la "pendiente equivalente", utilizando la Figura 3 de operación de camiones medianos en pendientes.

Los pasos a seguir son:

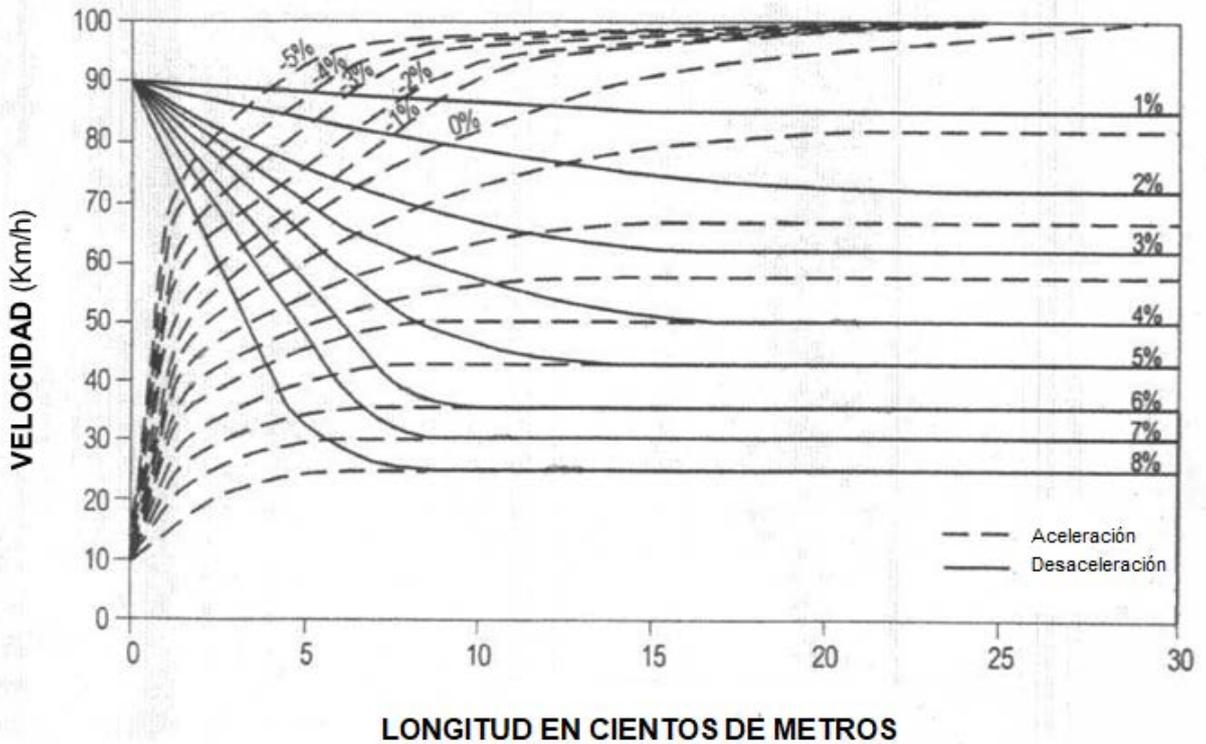
- i) Entrar al gráfico aceleración-desaceleración (Figura 4) con el valor de la pendiente inicial y su longitud. Hallar la velocidad de los camiones al final de esta rampa, que coincidirá con la velocidad de entrada a la segunda rampa.
- ii) Hallar la longitud sobre la segunda pendiente, que posea la misma velocidad del paso i). Esta longitud se usa como punto de partida de la segunda pendiente.
- iii) A partir de la longitud hallada en ii), adicionar la longitud de la segunda pendiente, y encontrar la velocidad al final de la misma.
- iv) Si existen pendientes adicionales, repetir los pasos i) a iii) para cada pendiente hasta encontrar la velocidad final.
- v) Determinar el punto crítico, que será aquel donde se desarrolla la menor velocidad.
- vi) Entrar en las curvas con la velocidad del punto crítico y la longitud total de la pendiente compuesta para hallar la pendiente equivalente con inclinación uniforme, la cual se empleará para el cálculo de E_c .

2.3.1.6 *Ajuste por población de conductores*

Las características de la corriente de tránsito en las que se basa la metodología descrita corresponden a corrientes de tránsito con conductores diarios o usuarios regulares de la autopista. Es de aceptación general que las corrientes de tránsito con distintas características (fin de semana, turístico) emplean las autopistas con menor eficiencia. Se han detectado capacidades tan bajas como 1500 ó 1600 a/h/c. durante fines de semana, en particular en áreas recreacionales. Se puede asumir que esta reducción en la capacidad se extiende también a los volúmenes de servicio de otros niveles de servicio.

El factor de ajuste f_p , se utiliza para reflejar este efecto. Los valores de f_p oscilan entre 1,00 y 0,85. En general el analista deberá utilizar 1,00, que representa al usuario habitual, a menos que a su juicio, exista evidencia suficiente que se debe utilizar un factor que represente características de tránsito más recreacional. Cuando sea necesaria una precisión muy grande, se recomienda realizar estudios comparativos en campaña, de relaciones volumen velocidad para usuarios habituales y turísticos. Se sugiere usar por defecto los valores de la Tabla 6.

FIGURA 4 : CURVAS DE RENDIMIENTO PARA CAMIONES (120 Kg/HP)



Fuente: Highway Capacity Manual 2016

TABLA 6: FACTOR POR IMPACTO DE LA POBLACIÓN DE CONDUCTORES	
Nivel de conocimiento	Factor f_p
Todos conductores habituales, regulares diarios	1,000
La mayoría conductores habituales	0,968
Mezcla equilibrada entre conductores habituales y no habituales	0,939
La mayoría conductores no habituales	0,898
Todos o una enorme proporción de conductores no habituales	0,852

Fuente: Highway Capacity Manual 2016

2.3.2 Determinación de la velocidad en flujo libre

La velocidad en flujo libre adecuada depende de una combinación factores tales como el trazado horizontal y vertical, hábitos de conducción locales, y otros. Cuando se disponga de datos locales, se los debe emplear para determinar el valor apropiado de la velocidad en flujo libre.

La velocidad en flujo libre se mide utilizando la velocidad promedio de los automóviles con volúmenes de tránsito de bajos a moderados (hasta 1000 automóviles por hora y por carril). La velocidad promedio es virtualmente constante cuando se está en estos rangos de volúmenes equivalentes.

Para la determinación de la velocidad en flujo libre del camino se pueden aplicar dos metodologías:

1. Medir la velocidad en campaña
2. Estimarla con la fórmula que se indica más adelante

2.3.2.1 Medición en campaña

En los casos en que se usan datos de campaña, no es necesario realizar ajustes posteriores a la velocidad en flujo libre. El estudio de velocidad debe realizarse en una ubicación representativa dentro del tramo que está siendo evaluado; por ejemplo no debe seleccionarse un segmento con una pendiente dentro de un tramo que es llano en su mayoría. Se recomienda que los estudios de campaña se realicen con volúmenes de tránsito de bajos a moderados (hasta 1000 automóviles por hora y por carril). Generalmente, las horas que no son picos son buenos momentos para obtener bajos volúmenes de tránsito. Durante el estudio de velocidad, se deben medir todos los automóviles o una muestra sistemática de los mismos (por ejemplo uno cada 10 automóviles). No solamente hay que incluir aquellos vehículos que van a una velocidad muy inferior al resto, sino que debería haber un número representativo de los mismos dentro del estudio.

La velocidad promedio de todos los automóviles, medida en un estudio de campaña realizado en condiciones de volúmenes equivalentes bajos a moderados, se puede usar directamente como la velocidad en flujo libre. Esta velocidad refleja los efectos de todos los elementos que pueden influir sobre la velocidad, incluyendo aquellos que se consideran en esta metodología (ancho de carril, obstrucciones laterales, número de carriles y densidad de intercambiadores), así como otros tales como límites de velocidad y trazado vertical y horizontal.

Cuando existan datos de estudios de velocidad disponibles, los mismos se pueden utilizar directamente, si fueron recogidos de acuerdo con los procedimientos anteriormente descritos. En caso que los resultados provengan de considerar tanto automóviles como vehículos pesados, los mismos son aplicables si el terreno es llano o con pendientes moderadas, pero no deben usarse en terrenos ondulados o montañosos.

2.3.2.2 Velocidad estimada en flujo libre

La velocidad en flujo libre se puede estimar indirectamente cuando no existen datos de campaña disponibles. La velocidad en flujo libre estimada es:

$$v_{fl} = 120 - f_{ac} - f_{ol} - 5,18 \times (DR \times 1,6)^{0,84}$$

Donde:

- v_{fl} = velocidad estimada en flujo libre (km/h)
- f_{ac} = ajuste por ancho de carril (de Tabla 7)
- f_{ol} = ajuste por obstrucción lateral en la banquina derecha (de Tabla 8)
- DR = densidad de ramas (ramas/km)

TABLA 7: AJUSTE POR ANCHO PROMEDIO DE CARRIL (KM/H)

ANCHO PROMEDIO DE CARRIL (m)	REDUCCIÓN DE LA VELOCIDAD EN FLUJO LIBRE f_{ac} (km/h)
$\geq 3,6$	0,0
$\geq 3,3-3,6$	3,1
$\geq 3,0-3,3$	10,6

Fuente: Highway Capacity Manual 2016

TABLA 8: AJUSTE POR OBSTRUCCIONES EN LADO DERECHO (KM/H)

OBSTRUCCIÓN LATERAL EN BANQUINA DERECHA (m)	REDUCCIÓN DE LA VELOCIDAD EN FLUJO LIBRE f_{ol} (km/h)			
	CARRILES EN UN SENTIDO			
	2	3	4	≥ 5
$\geq 1,8$	0,0	0,0	0,0	0,0
1,5	1,0	0,7	0,3	0,2
1,2	1,9	1,3	0,7	0,3
0,9	2,9	1,9	1,0	0,5
0,6	3,9	2,6	1,3	0,6
0,3	4,8	3,2	1,6	0,8
0,0	5,8	3,9	1,9	1,0

Fuente: Highway Capacity Manual 2016

La ecuación incluye un término que tiene en cuenta el impacto del total de ramas sobre la velocidad en flujo libre. La densidad total de ramas se define como el número de ramas (tanto de ingreso como de egreso en la dirección estudiada), ubicadas 5 kilómetros corriente arriba y 5 kilómetros corriente abajo del punto medio del tramo en estudio, dividido por 10 kilómetros.

Las investigaciones que llevaron a determinar estas curvas de velocidad en flujo libre encontraron un número de factores que afectan a dicha velocidad, como ser anchos de carriles, obstrucción lateral y densidad o distancia entre distribuidores se cree que otros factores influyen la velocidad en flujo libre como ser trazado horizontal y vertical, límites de velocidad, niveles de vigilancia, condiciones de iluminación y tiempo pero se conoce aún muy poco respecto a todos ellos.

2.3.3 Cálculo de la velocidad y densidad

En este punto de la metodología, se ha determinado:

- la curva de velocidad en flujo libre que corresponde utilizar.
- la demanda equivalente expresada en automóviles por carril y por hora bajo las condiciones base.

Con esta información se pueden estimar la velocidad y densidad en el tramo en estudio.

Para calcular la velocidad de circulación se puede:

- Utilizar las fórmulas del Cuadro 1 antes mencionado.
- Estimar gráficamente utilizando la Figura 2. El procedimiento es el siguiente:
 1. Encontrar sobre el eje horizontal el valor correspondiente al volumen equivalente (V_e) en automóviles por hora y por carril.
 2. Leer en la curva correspondiente a la velocidad en flujo libre seleccionada, la velocidad correspondiente a automóviles en ese punto.

Una vez determinada la velocidad de circulación, la densidad se calcula como:

$$D = V_e/v$$

donde:

D = densidad (automóviles/km/carril)

V_e = volumen equivalente (automóviles/hora/carril)

v = velocidad promedio de marcha de los automóviles (km/hora)

2.3.4 Determinación del nivel de servicio

El nivel de servicio se obtiene directamente de la Tabla 1 entrando con la densidad.

2.3.5 Sensibilidad de los resultados

La velocidad en flujo libre es muy sensible a la densidad de ramas. La Figura 5 muestra como varía la velocidad en flujo libre desde una densidad de 0 ramas/km a 4 ramas por km. Este último caso, si bien no es común, puede ocurrir en zonas urbanas, mientras que el otro extremo se da en tramos rurales.

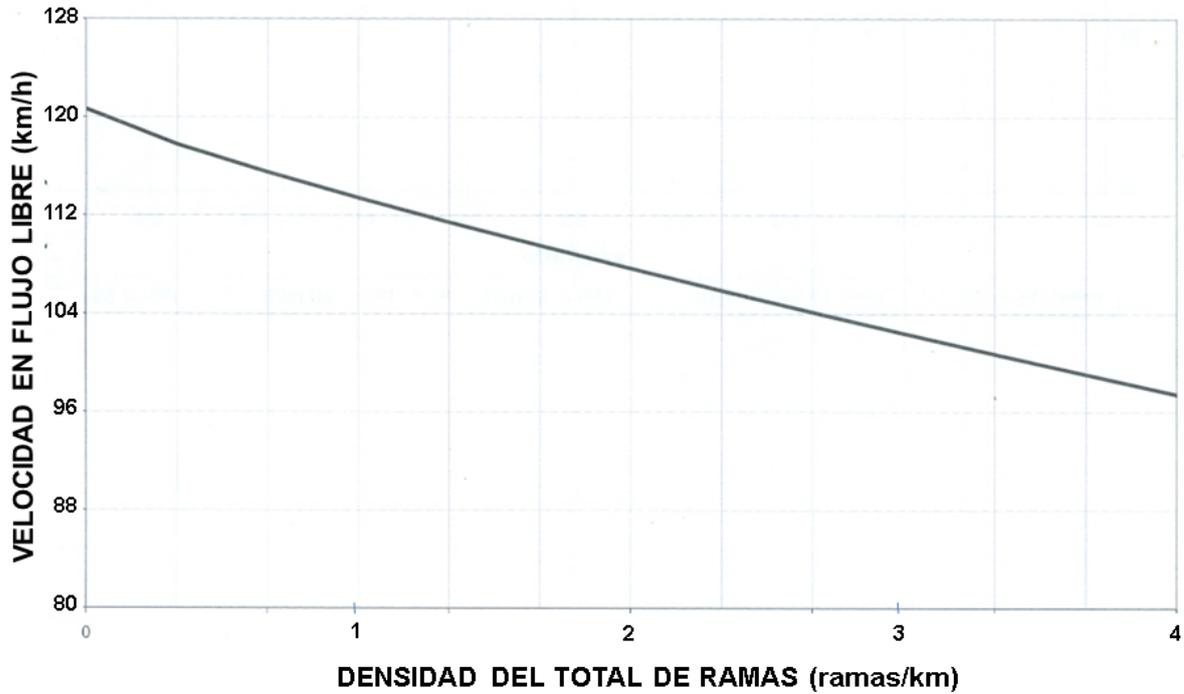
Un trébol completo tiene 4 ramas en cada sentido; dos de entrada y dos de salida. Un diamante tiene dos ramas en cada sentido; una de entrada y una de salida. Si dentro de un kilómetro de autopista se tienen dos distribuidores tipo trébol, significa 8 ramas en un kilómetro, contra 4 ramas si fueran diamantes. Esto indica claramente que en situaciones de tránsito y geometría comparables, los distribuidores tipo trébol tienen un efecto negativo superior al diseño diamante.

Aunque la de la Figura 5 no es una línea recta, se observa que la pendiente es casi constante, y que en promedio una rama por kilómetro causa una caída de 6 kilómetros en la velocidad en flujo libre. No hay base de datos para estimar una extrapolación de la curva, pero si se diera una densidad superior de ramas a la de la Figura (caso muy poco probable), con precaución se podría asumir esta reducción.

En la Figura 6 se observa que la relación V/c tiene relativamente poco efecto sobre la velocidad hasta que excede entre el 42 al 80 por ciento, según la velocidad en flujo libre. La velocidad en flujo libre (que es sensible al ancho de

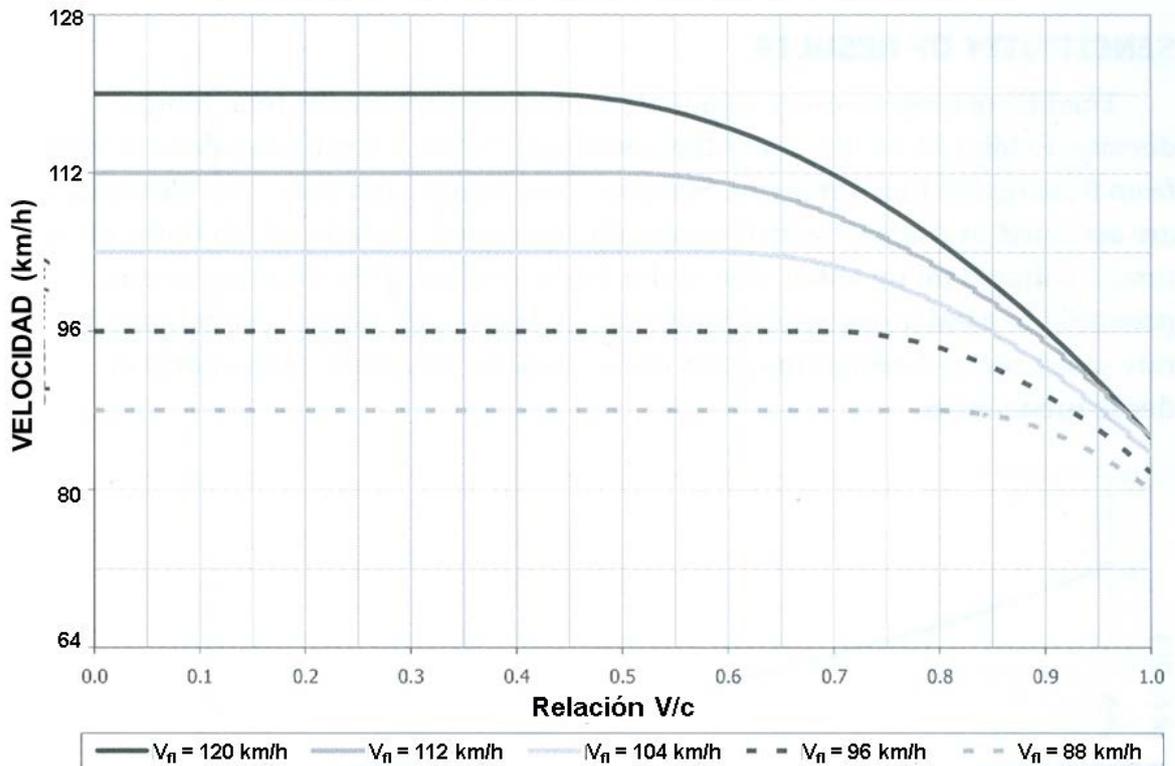
carril, el ancho de banquina, y la distancia entre distribuidores), tiene más efecto sobre la velocidad media para relaciones V/c bajas, que la misma relación V/c .

FIGURA 5: SENSIBILIDAD DE LA v_n A LA DENSIDAD DE RAMAS



Fuente: Highway Capacity Manual 2016

FIGURA 6: VELOCIDAD VERSUS RELACIÓN V/c



Fuente: Highway Capacity Manual 2016

3 PROCEDIMIENTOS DE APLICACIÓN

La metodología hasta aquí desarrollada se utiliza en general en alguna de las cuatro aplicaciones siguientes:

3.1 Análisis operacional

El análisis operacional implica la consideración de una autopista determinada, existente o proyectada. Dadas las características geométricas existentes o proyectadas del camino y las condiciones existentes o proyectadas del tránsito, el análisis produce una estimación del nivel de servicio, de la velocidad y densidad de la corriente vehicular. Esta es la más detallada de las cuatro aplicaciones y requiere datos de entrada precisos en lo que hace a condiciones de tránsito y del camino. El análisis operacional es también el que provee el uso más versátil de la metodología. Es extremadamente útil para evaluar los impactos esperados en mejoras propuestas de lugares o tramos y se puede utilizar para evaluar propuestas alternativas de proyecto.

3.2 Diseño

En diseño se utiliza un volumen de la demanda estimado en conjunción con normas de diseño conocidas para las características geométricas y el nivel de servicio deseado, para calcular el número de carriles requeridos para el tramo de autopista en cuestión. El diseño aplicado es el correspondiente para cada uso, pero se pueden requerir análisis operacionales de tanteo para evaluar diseños alternativos. El diseño requiere una estimación de tránsito detallada, incluyendo volúmenes, características de pico, composición del tránsito y detalles del trazado horizontal y vertical para los tramos en estudio. El procedimiento es el siguiente:

1. Dado que no está determinado el número de carriles, la fórmula, con la que se calcula la demanda equivalente en automóviles por hora es:

$$V_{aph} = \frac{V_{vph}}{FHP \cdot f_{vp} \cdot f_p}$$

2. De la Tabla 9 se selecciona la máxima demanda equivalente que corresponda al nivel de servicio deseado. Esta Tabla ha sido elaborada de las curvas de la Figura 1.

TABLA 9: MÁXIMOS VOLÚMENES EN AUT/H/CARRIL					
Velocidad en flujo libre (km/h)	Nivel de servicio deseado				
	A	B	C	D	E
120	820	1.310	1.750	2.110	2.400
112	770	1.250	1.690	2.080	2.400
104	710	1.170	1.630	2.030	2.350
96	660	1.080	1.560	2.010	2.300
88	600	990	1.430	1.900	2.250

Todos los valores están redondeados a 10 aut/h/carril
 Fuente: Highway Capacity Manual 2016

3. Se calcula el número de carriles para el nivel de servicio requerido:

$$N = V_{aph} / MVE$$

donde:

MVE = Máximo Volumen Equivalente

4. Combinando ambas ecuaciones se tiene:

$$N = \frac{V_{vph}}{MVE \cdot FHP \cdot f_{vp} \cdot f_p}$$

Es probable que el resultado sea un número fraccional. Dado que el valor resultante es un límite, se debe redondear hacia arriba.

Puede suceder que redondeando hacia arriba se tenga un nivel de servicio mejor que el requerido, y redondeando hacia abajo, uno peor. En este caso se deberá aplicar el criterio profesional para optar el número de carriles a utilizar.

3.3 Planeamiento

El análisis de planeamiento se concentra en determinaciones rápidas y aproximadas antes que se dispongan los detalles de las estimaciones completas del tránsito y del trazado vertical y horizontal de la autopista.

La diferencia principal entre el análisis de diseño y el de planeamiento es la cantidad y grado de detalle de la información disponible como datos del análisis.

En la etapa de planeamiento, no existen detalles sobre pendientes específicas y otras características geométricas. Por otra parte, las predicciones de tránsito no son exactas. Por lo tanto, en la etapa de planeamiento, el análisis de capacidad es aproximado, y sirve para dar una idea general de los requerimientos geométricos de la autopista. Este cálculo, sin embargo, debe ser sometido a un análisis de diseño completo tramo a tramo cuando se disponga de la información.

El TMDA es un dato necesario para cualquier planeamiento vial, y generalmente estará disponible para el análisis de capacidad. El trazado vertical y la presencia de camiones deberán ser estimados por el proyectista, sobre la base de las condiciones generales del terreno de la zona por donde pasará la autopista y las características del tránsito que se supone va a utilizarla.

Se debe convertir el TMDA en VHDD:

$$V_{vph} = VHDD = TMDA \times K \times D$$

donde:

TMDA = volumen diario anual estimado, en vpd

VHDD = volumen horario direccional de diseño en vph

K = % del TMDA que pasa durante la hora pico

D = % del tránsito circulando en el sentido predominante durante la hora pico

Los valores de K y D se basan en las características locales o regionales. En autopistas urbanas los valores típicos de K oscilan entre 0,08 y 0,10. Para casos de autopistas rurales el rango es de 0,09 a 0,13.

En general, al aumentar la intensidad del uso de suelo, K decrece ya que la demanda de tránsito se distribuye más uniformemente a lo largo del día.

El valor usual de D es 0,55 en ambos casos.

3.4 Volúmenes equivalentes y de servicio

En este análisis se estima el volumen equivalente, el volumen de servicio o el volumen diario o los tres, para cada nivel de servicio en una infraestructura existente o futura. En este caso se deben especificar todas las condiciones de geometría y tránsito.

La Tabla 9 da los máximos volúmenes equivalentes MVE, en términos de automóviles por hora y por carril para cada nivel de servicio. El volumen de servicio VE_i , es el máximo volumen que puede existir para el nivel de servicio i en el período de análisis de 15 minutos bajo las condiciones prevalecientes de tránsito y geometría. Por lo tanto:

$$VE_i = MVE \times N \times f_{vp} \times f_p$$

Este volumen equivalente se puede convertir en volumen de servicio VS_i , que es el máximo volumen horario que puede existir mientras que se mantiene el nivel de servicio i en los peores 15 minutos de esa hora:

$$VS = VE_i \times FHP$$

El volumen de servicio diario VSD_i , es el máximo TMDA que se puede acomodar bajo las condiciones prevalecientes de tránsito y geometría, manteniendo el nivel de servicio i en los peores 15 minutos del día analizado.

$$VSD_i = VS_i / (K \times D)$$

3.5 Interpretación de los resultados

Es de hacer notar que estos procedimientos sólo intentan ser una guía y no reemplazar la responsabilidad de la toma de decisiones o selección entre alternativas viales. Los procedimientos aquí descritos darán al analista información adicional sobre las probables condiciones de operación y/o el número de carriles requeridos para proveer las condiciones operativas deseadas. Esta información es un dato de entrada importante para la toma de decisiones en proyectos de autopistas. No obstante hay otros criterios, incluidos la evaluación económica y los impactos en el medio ambiente. Ningún resultado de estos procedimientos debe considerarse como mandatario de una solución dada para un problema específico. Los procedimientos no elaboran decisiones, sino más bien proveen importante información a los ingenieros y planificadores que deben tomarlas.

3.6 Determinación de tramos de estudio

En el análisis se consideran tramos de características uniformes. Cualquier variación en los datos indicados anteriormente requiere la definición de un tramo adicional de estudio.

A lo largo de una autopista existen localizaciones o puntos que generalmente son límites de tramos de estudio, como por ejemplo, las intersecciones con ramas ya que en ellas varía el volumen de la demanda.

Las áreas de entrecruzamiento y muy a menudo los tramos de autopista adyacentes a las mismas se estudian en forma separada. Igual criterio se sigue con pendientes aisladas que producen un impacto en las operaciones.