



La movilidad
es de todos

Mintransporte

Manual de Capacidad y Niveles de Servicio para vías multicarril

Primera versión

2022



INVIAS
INSTITUTO NACIONAL DE VIAS



Manual de Capacidad y Niveles de Servicio para vías multicarril

Primera versión

2022



El futuro
es de todos

Presidencia
de la República

Iván Duque Márquez
Presidente de la República



La movilidad
es de todos

Mintransporte

Ángela María Orozco Gómez
Ministra de Transporte

Olga Lucía Ramírez Duarte
Viceministra de Infraestructura

Alejandra Quintero Lopera
Directora de Infraestructura

Rodolfo Castiblanco Bedoya - Asesor
Asesor Dirección de Infraestructura



INVIA
INSTITUTO NACIONAL DE VIAS

Juan Esteban Gil Chavarría
Director General

Paola Constanza Romero Martínez
Subdirectora General

Guillermo Toro Acuña
Director Técnico y de estructuración

Juan Esteban Romero Toro
Director de ejecución y operación

Juliana Sánchez Acuña
Directora Jurídica

Catalina Téllez Posada
Secretaria General

Gladys Gutierrez Buitrago
Subdirectora de Reglamentación
Técnica e Innovación

Neyla Teresa Moreno Vega
Coordinadora Normatividad Técnica



Universidad
del Cauca®
Vigada Mineducación

Decano Facultad de Ingeniería Civil

Aldemar José González Fernández

Coordinadora general del convenio

† Margarita Polanco de Hurtado

Coordinador técnico

Nelson Rivas Muñoz

Profesores participantes:

Carlos Alberto Arboleda Velez

Efraín de Jesús Solano Fajardo

Alexandra Rosas Palomino

Asesor técnico internacional

Jorge José Galarraaga

Profesionales de apoyo

Reina Luz Zambrano Pareja

Ciro Alberto Pabón García

Nancy Paola Gonzáles Idrobo

Andrés Fernando Benavides Ruiz

Juan Daniel Rivas Torijano

Diseño y diagramación

Uriel Ordoñez Hurtado

Cristian David Ordoñez Ordoñez

Contenido

Presentación	13
1. Definiciones y aspectos básicos	15
1.1 Definiciones.....	15
1.1.1 Carretera multicarril.....	15
1.1.2 Aplicación del manual.....	15
1.1.3 Características de la vía.....	15
1.1.4 Tramo	16
1.1.5 Sector homogéneo.....	16
1.1.6 Nivel de Servicio	16
1.1.7 Capacidad y flujo máximo para cada Nivel de Servicio	16
1.1.8 Condiciones base	16
1.2 Principios básicos del manual colombiano	16
1.2.1 Metodología adoptada.....	16
1.2.2 Resumen del método HCM para carreteras multicarril en Estados Unidos	17
1.2.3 Adaptación a las condiciones colombianas.....	18
1.3 Descripción básica de la operación de una carretera multicarril.....	18
1.3.1 Características fundamentales de operación.....	18
1.3.2 Factores geométricos que influyen en la circulación.....	21
1.3.3 Factores de tránsito que influyen en la circulación	24
1.3.4 Tiempos de viaje en carreteras multicarril	25
1.4 Consideraciones sobre el Nivel de Servicio.....	26
1.4.1. Enfoque 1. Método clásico del HCM.....	26
1.4.2 Enfoques alternativos para establecer la calidad de operación de una carretera multicarril	30
1.5. Tasas de flujo máximas por Nivel de Servicio	33

1.6 Investigaciones realizadas	33
1.6.1 Investigaciones de soporte	33
1.6.2 Datos de campo	35
2. Procedimiento de aplicación	37
2.1 Tipos de análisis y pasos requeridos en la aplicación	37
2.2.1 Pasos a seguir para un análisis de operación	38
2.2.2 Pasos a seguir para un análisis	38
de planeación.....	38
2.2 Paso 1: proceso de sectorización, definición del tipo de aplicación y preparación de la información para usar el manual.....	40
2.2.1 Proceso de sectorización	40
2.2.2 Definición del tipo de aplicación	40
2.3 Información necesaria para usar el manual.....	41
2.3.1 Variables relacionadas con la geometría.....	41
2.3.2 Variables relacionadas con el tránsito	42
2.4. Paso 2: determinación de la curva flujo-velocidad característica del sector de análisis	43
2.4.1 Determinación de la velocidad a flujo libre del sector de análisis (VL)	43
2.5 Paso 3: cálculo del flujo vehicular.....	46
2.5.1 Corrección del volumen de tránsito mixto.....	46
2.5.2 Equivalente de camiones	47
2.5.3. Consideraciones para análisis de planeación	53
2.6. Paso 4: determinación de la velocidad de operación en el sector de análisis (V)	53
2.7. Paso 5: cálculo de la densidad	53
2.8 Paso 6: Determinación del Nivel de Servicio	53
2.9. Paso 7: cálculo del número de carriles (planeación)	54
3. Ejemplos de aplicación.....	55
3.1 Ejemplo de aplicación N° 1 – análisis de operación	55
3.1.1 Paso 1: proceso de sectorización, definición del tipo de aplicación y preparación de información necesaria para aplicar el manual.....	55
3.1.2 Paso 2: determinación de la curva flujo-velocidad característica del sector de análisis	56
3.1.3. Paso 3: Cálculo del flujo vehicular.....	57

3.1.4. Paso 4: determinación de la velocidad de operación en el sector de análisis.....	57
3.1.5. Paso 5: cálculo de la densidad	58
3.1.6. Paso 6: determinación del Nivel de Servicio	59
3.2 Ejemplo de aplicación No. 2: Análisis de planeación	59
3.2.1 Paso 1: proceso de sectorización, definición del tipo de aplicación y preparación de información necesaria para aplicar el manual.....	59
3.2.2 Paso 2: determinación de la curva flujo–velocidad característica del sector de análisis	60
3.2.3. Paso 3: cálculo del flujo vehicular.	61
3.2.4 Paso 7: determinación del número de carriles	62
4. Manual de uso del programa de computador.....	63
4.1 Presentacion general	63
4.2 Configuración de aplicaciones.....	65
4.2.1 Configuración tipo de análisis	65
4.2.2 Configuración velocidad a flujo libre (VL).....	65
4.2.3. Configuración de la información de tránsito y tipo de terreno (aplicación)	66
4.2.4 Resultados de las aplicaciones	67
4.3 Ejemplos	67
4.3.1 Ejemplo 1: análisis de operación.....	67
4.3.2 Ejemplo 2: análisis de planeación	67
Bibliografía	71
Anexo 1	75
1. Enfoque espacio-tiempo. Diagramas de evolución del tránsito.....	77
1.1 Aspectos generales	77
1.2 Descripción del procedimiento para obtener los diagramas de evolución del tránsito.....	77
1.2.1 Información proporcionada por el modelo de simulación	77
1.2.2 Proceso de triangulación.....	77
1.2.3. Elaboración de las curvas isovelocidades.....	78
1.2.4 Diagrama de evolución del tránsito	79

2. Enfoque indicadores de calidad 81

2.1 Aspectos generales81

2.2 Componentes del modelo81

2.2.1 Estructura del modelo de gestión81

2.2.2 Concepto de calidad82

2.2.3 Estructura del modelo de indicadores de calidad82

2.3. Identificación de factores globales83

2.4 Identificación de indicadores de calidad.....83

2.5 Proceso de ponderación de indicadores85

2.6 Proceso de calificación88

2.7 Redefinición de la escala de los Niveles de Servicio89

Lista de Tablas

Tabla 1. Definición de Niveles de Servicio en carreteras multicarril.	27
Tabla 2. Definición de Niveles de Servicio propuesta-carreteras multicarril de Colombia.....	28
Tabla 3. Factores globales-Indicadores de calidad.	31
Tabla 4. Formato de calificación de la calidad de una carretera.....	32
Tabla 5. Escala de calificación de la calidad de la carretera.	33
Tabla 6. Tasas de flujo máximas por Nivel de Servicio	33
Tabla 7. Investigaciones de soporte del manual.....	34
Tabla 8. Tipos de análisis incluidos en el manual.	37
Tabla 9. Descripción detallada de los pasos requeridos para cada tipo de análisis.....	39
Tabla 10. Clasificación de las carreteras multicarril según sus características geométricas.....	43
Tabla 11. Velocidad genérica por tipo de carretera.....	44
Tabla 12. Ajuste de la velocidad genérica por efecto del ancho de carril (f_c).	44
Tabla 13. Ajuste de la velocidad genérica por efecto del ancho del separador (f_s).	44
Tabla 14. Ajuste de la velocidad genérica por efecto del ancho promedio de bermas (f_b).	45
Tabla 15. Ajuste de la velocidad genérica por efecto del ancho promedio de bermas (f_A).	45
Tabla 16. Coeficientes de las ecuaciones flujo - velocidad. Carreteras multicarril Colombia.....	45
Tabla 17. Equivalente de camiones para tipo de terreno genérico.....	47
Tabla 18. Equivalentes de camión en pendientes ascendentes.	48
Tabla 19. Equivalentes de camión en pendientes descendentes.	51
Tabla 20. Niveles de Servicio para carreteras multicarril en Colombia.....	54
Tabla 21. Tasas de flujo máximas por Nivel de Servicio (TFM).	54
Tabla 22. Información de geometría: Ejemplo de aplicación No 1.	56
Tabla 23. Información de tránsito: ejemplo de aplicación No. 1.	56
Tabla 24. Cálculo del flujo vehicular: Ejemplo de aplicación No. 1.....	57
Tabla 25. Cálculo de la velocidad de operación: Ejemplo de aplicación No. 1.....	58
Tabla 26. Cálculo de la densidad: Ejemplo de aplicación No.1.....	58
Tabla 27. Determinación del Nivel de Servicio ofrecido: Ejemplo de aplicación No. 1.....	59

Tabla 28. Información de geometría: Ejemplo de aplicación No. 2.	60
Tabla 29. Información de tránsito: ejemplo de aplicación No. 2.	60
Tabla 30. Cálculo del flujo vehicular: Ejemplo de aplicación No. 2.....	61
Tabla 31. Cálculo del número de carriles. Ejemplo de aplicación No. 2.	62
Tabla 32. Chequeo final Nivel de Servicio ofrecido: Ejemplo de aplicación No. 2.	62
Tabla 33. Partes principales del programa que desarrolla el método del manual.....	63

Anexo 1

2. Enfoque indicadores de calidad	81
Tabla 1. Factores globales: indicadores de calidad.	83
Tabla 2. Identificación y descripción de indicadores.....	84
Tabla 3. Matriz de ponderación.....	86
Tabla 4. Resultados ponderación de indicadores.....	87
Tabla 5 Formato de calificación de la calidad de una carretera.....	88
Tabla 6. Escala de calificación de la calidad de la carretera.	89

Lista de figuras

Figura 1. Curvas características de una carretera multicarril en Colombia	19
Figura 2. Curvas flujo-velocidad para las carreteras multicarril en Colombia.	21
Figura 3. Tiempos de viaje característicos en carretera multicarril.....	25
Figura 4. Niveles de Servicio en carreteras multicarril de Colombia, Vías multicarril Tipo 1 (96 km/h) y Tipo 2 (90 km/h).....	28
Figura 5. Niveles de Servicio en carreteras multicarril de Colombia, Tipo 3 (80 km/h).....	29
Figura 6. Niveles de Servicio en carreteras multicarril de Colombia, Tipo 4 (70 km/h).....	29
Figura 7. Diagrama típico de evolución del tránsito de una carretera	30
Figura 8. Hoja de trabajo No. 1.....	42
Figura 9. Curvas flujo-velocidad maestras para Colombia.	46
Figura 10. Apariencia general del formulario del programa.....	64
Figura 11. Configuración tipo de análisis.	65
Figura 12. Configuración velocidad a flujo libre (VL) medida en el campo.	65
Figura 13. Configuración velocidad a flujo libre (VL).....	66
Figura 14. Configuración información de tránsito y tipo de terreno.	67
Figura 15. Resultados de las aplicaciones.....	67
Figura 16. Ejemplo de Aplicación No. 1 - operación.....	68
Figura 17. Ejemplo de Aplicación No. 2 - Planeación.	69

Anexo 1

1. Enfoque espacio-tiempo. Diagramas de evolución del tránsito	77
Figura 1. Disposición del proceso de triangulación.	78
Figura 2. Trazado de las curvas isovelocidades.	78
Figura 3. Diagrama típico de evolución de tránsito.	79
2. Enfoque indicadores de calidad.....	81
Figura 1. Esquema piramidal del sistema de gestión vial.....	82

PRESENTACIÓN

Desde la última década del siglo pasado, el antiguo Ministerio de Obras Públicas y Transporte, junto con el Instituto Nacional de Vías - INVIAS y la Universidad del Cauca, en un esfuerzo conjunto al lado de expertos, instituciones educativas y gremios del sector, emprendieron un trabajo de investigación y generación de nuevo conocimiento en temas de capacidad y niveles de servicio para carreteras de dos carriles, generando a la fecha tres versiones del Manual que han sido referentes técnicos a lo largo de los últimos treinta años.

En el marco del programa No. CO – L -1090 de apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo al Gobierno de Colombia, en la implantación de la Política Nacional de Logística (documento CONPES 3547 de 2008), se presenta el Plan Maestro de Transporte 2010-2032, el cual incluye dentro de las necesidades del plan de inversiones (numeral 4.6), validar y actualizar la metodología para calcular la capacidad y niveles de servicio en las carreteras; entre tanto, Colombia avanza en la construcción de nueva infraestructura vial y se hace más común la similitud entre las vías multicarril y las autopistas en cuanto al diseño geométrico y comportamiento de los conductores, haciendo evidente la preparación y elaboración de un manual que permita planear y ejecutar los proyectos que propone el referido Plan Maestro de Transporte. Por lo anterior, el Instituto Nacional de Vías, en convenio suscrito con la Universidad del Cauca, adelantó un trabajo investigativo desde la academia, con el objetivo de elaborar la primera versión del Manual de Capacidad y Niveles de Servicio para vías multicarril.

En Colombia, el Manual de Capacidad y Niveles de Servicio para vías multicarril, en desarrollo de los proyectos del Instituto Nacional de Vías - INVIAS, de los proyectos de concesión a cargo de la Agencia Nacional de Infraestructura - ANI y con el concurso de algunas entidades regionales y departamentales, permitirá la construcción de infraestructura vial con mejores especificaciones, con el propósito de brindar competitividad, confort y seguridad a los usuarios de las principales carreteras del país, diseñando y construyendo vías multicarril en los corredores logísticos que cuentan con dos o más carriles por sentido de circulación y con operación bajo régimen de tránsito ininterrumpido, proporcionando así, una mayor capacidad y un óptimo nivel de servicio.

En tal sentido, el Manual de Capacidad y Niveles de Servicio para vías multicarril, propone una nueva metodología y coeficientes de cálculo, acorde con los adelantos y nuevos conceptos técnicos en este sentido. Dicha metodología para calcular los Niveles de Servicio en un sector homogéneo de una vía multicarril, determinado por la uniformidad de sus características tanto geométricas como operacionales, surge de la aplicación del Manual de Capacidad y Niveles de Servicio de Estados Unidos de América, denominado por sus siglas en inglés HCM, con amplio soporte investigativo y rigor académico, pero teniendo en cuenta el programa de investigaciones de campo implementado por la Universidad del Cauca, que realizó una serie de mediciones para adaptar el Manual HCM a las condiciones de operación de las vías multicarril en el país y obtener así, una metodología transferible a las condiciones de operación propias de determinada región o zona del territorio colombiano, a través de un programa computacional cifrado en lenguaje Visual Basic para aplicaciones desarrollado en el entorno de Excel, que se constituye en un instrumento técnico importante dentro de la modernización de la red vial nacional, impulsada por los referidos programas de desarrollo y crecimiento de la infraestructura de carreteras, que se espera, llegará a contar con cerca de cuatro mil kilómetros de vías multicarril en los próximos cinco años, de ahí la importancia del presente manual.

1. Definiciones y aspectos básicos

1.1 Definiciones

Se explican a continuación términos y aspectos de importancia para la comprensión del tema.

1.1.1 Carretera multicarril

Una carretera o vía multicarril es aquella que tiene dos o más carriles por sentido de circulación y su operación se da bajo régimen de tránsito ininterrumpido, que presupone separación entre intersecciones superior a 2.5 kilómetros. Puede tener separador central, en cuyo caso se denomina dividida, o carecer de él, llamándose entonces no dividida.

El país cuenta en la actualidad con cerca de 2000 kilómetros de vía multicarril, y se aspira a que en los próximos cinco años se tengan cerca de 4000 kilómetros.

Las carreteras multicarril conectan los principales centros de producción y consumo con los puertos marítimos y se identifican como corredores de comercio exterior.

1.1.2 Aplicación del manual

El presente manual contiene la metodología para calcular el Nivel de Servicio en un sector homogéneo de una carretera multicarril, determinado por la uniformidad de sus características tanto geométricas como operacionales. El manual contiene dos tipos de aplicaciones:

- Análisis de operación, con el que se determina el Nivel de Servicio ofrecido por la vía, y opcionalmente la tasa de flujo máxima, que corresponde a la Capacidad, la cual se relaciona con un Nivel de Servicio E.
- Análisis de planeación, con el que se determina el número de carriles necesarios para operar a un Nivel de Servicio deseado.

Los dos análisis se realizan a cada uno de los sentidos de circulación.

1.1.3 Características de la vía

Debido al proceso de modernización de la infraestructura vial colombiana, en el que las carreteras de dos carriles se mejoran llevándolas a multicarril. Muchas de ellas comparten las especificaciones geométricas de las carreteras de dos carriles y en especial lo relacionado con el tipo de terreno donde se desarrollan, sus pendientes y su curvatura.

Las características de la vía corresponden a las de todos los elementos físicos propios del diseño geométrico, que tienen influencia directa o indirecta en la Capacidad y en el Nivel de Servicio, tales como las siguientes:

Alineamiento horizontal y vertical: en el diseño en planta o alineamiento horizontal, la velocidad de diseño es norma de control para los radios de curvatura, los peraltes y las distancias de visibilidad que determinan la seguridad en el tránsito. Esa velocidad, por razones de consistencia geométrica y de economía en la explotación, debe ser la más uniforme y alta que permitan las condiciones topográficas y el tipo de carretera.

En el diseño en perfil o alineamiento vertical, la influencia de las pendientes es notable en la restricción de las velocidades que puedan desarrollar los vehículos, particularmente los de mayor peso.

El criterio general básico es buscar la mayor armonía posible entre los dos alineamientos, para lograr un proyecto debidamente equilibrado, con características tales que los conductores puedan sin ninguna dificultad mantener una velocidad de operación que siendo próxima a la velocidad de diseño, les ofrezca condiciones de seguridad y comodidad.

Calzada: es la zona de la carretera destinada a la circulación normal de los vehículos. Su sección transversal comprende las calzadas de circulación, con dos o más carriles de circulación por sentido, y puede incluir el separador central.

En el país existen especificaciones sobre el ancho de carril dependiendo del tipo de carretera; los anchos más usuales son: 3.65 m, 3.50 m, 3.30 m y 3.00 m.

Berma: es la parte exterior del camino, destinada a la parada eventual de vehículos, al tránsito de peatones, de bicicletas, etc., de manera que estos no interfieran con la circulación normal de los demás vehículos. También proporciona soporte lateral al pavimento. Los anchos de berma más utilizados en el país son: 1.80 m, 1.50 m y 1.20 m.

Obstáculos laterales: todo obstáculo lateral como muros, árboles, postes, señales, etc., debe situarse a una distancia superior a 1.80 m del borde de la calzada, para disminuir el riesgo de choques contra ellos y para que no constituyan una obstrucción psicológica a la circulación normal de los vehículos, lo que puede reducir el Nivel de Servicio y la Capacidad de la vía. Se deben examinar en cada sentido de circulación las zonas libres a la derecha y a la izquierda. Es conveniente aclarar que para los próximos años cuando en Colombia se aplique el concepto de zona libre de obstáculos al lado y lado de la vía, por seguridad deben alejarse mínimo a 4 m de la calzada.

1.1.4 Tramo

Se define como tramo la subdivisión de una ruta con longitud no mayor de 150 km. Los puntos de inicio y fin de cada tramo deben corresponder en lo posible a sitios o poblaciones de importancia. Se identifica con cuatro dígitos, de los cuales los dos primeros son los de la ruta a la que pertenece.

1.1.5 Sector homogéneo

Es la parte de un tramo definida para realizar un estudio de Capacidad y Niveles de Servicio. Se identifica con el número del tramo y las abscisas inicial y final. El sector homogéneo se determina por sus características geométricas y de tránsito. Un tramo de estudio se debe dividir en sectores homogéneos de análisis.

1.1.6 Nivel de Servicio

El Nivel de Servicio califica la calidad de la operación en una carretera multicarril. La variable seleccionada

como indicativa de esta situación es la 'densidad vial'. La densidad vial representa la cantidad de vehículos por unidad de longitud.

1.1.7 Capacidad y flujo máximo para cada Nivel de Servicio

La Capacidad se define como el máximo número de vehículos que pueden circular por una carretera multicarril, dadas unas condiciones de operación. La capacidad de la vía se alcanza cuando se llega a un Nivel de Servicio E. Para los otros Niveles de Servicio se establecen flujos máximos, asociados a las densidades máximas aceptadas en cada nivel definido.

1.1.8 Condiciones base

Las condiciones base se refieren a condiciones de operación propicia o ideal en una carretera multicarril. Estas condiciones son:

- Carreteras con rasante horizontal.
- Carreteras multicarril con separador central.
- Ancho de carril de 3.60 metros.
- Zonas laterales libres de más de 3.60 metros.
- Densidad de accesos inferior a cinco por kilómetro.
- Sin curvas horizontales.
- Circulación exclusiva de automóviles.

1.2 Principios básicos del manual colombiano

Se plantean los principios básicos que rigen el manual.

1.2.1 Metodología adoptada

La metodología adoptada para elaborar el Manual colombiano de carreteras multicarril es la planteada

en el Capítulo 14 del *Manual de Capacidad y Niveles de Servicio de Estados Unidos de América*, adaptada a las condiciones de operación de Colombia.

Las razones de esta selección son, entre otras:

- La operación de una infraestructura vial de alta jerarquía, como una autopista o una carretera multicarril, es similar en cualquier parte del mundo, a diferencia de la operación de las carreteras de dos carriles o de las arterias urbanas, donde las características geométricas y de operación difieren bastante entre países.
- El *Manual de Capacidad y Niveles de Servicio de Estados Unidos de América*, denominado por sus siglas en Inglés HCM, tiene aceptación mundial, ganada por el soporte investigativo y rigor académico en más de cincuenta años de labores ininterrumpidas. Por el contrario, la experiencia en Colombia en este tipo de infraestructura es escasa. Al respecto, se tienen algunas investigaciones aisladas desarrolladas en la Universidad Nacional de Colombia, en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y en la Universidad del Cauca.
- La metodología desarrollada en el HCM es transferible a las condiciones de operación propias de una región o país. En México, Argentina y Brasil se han realizado ajustes de algunos de los factores de corrección incluidos en el HCM.
- Se pueden adicionar o suprimir factores de corrección a la velocidad a flujo libre dependiendo de las condiciones reales en cada país. Para el caso de Colombia, la curvatura horizontal.

1.2.2 Resumen del método HCM para carreteras multicarril en Estados Unidos

El capítulo 14 del HCM 2010 contiene el método para determinar el análisis operacional del Nivel de Servicio en carretera multicarril, y proporciona los flujos de servicio para el análisis de planeación.

El método se basa en la velocidad a flujo libre básica, conocida como BFFS. Para el caso colombiano, se sugiere que la velocidad a flujo libre base se asimile a la velocidad de diseño del tramo.

La velocidad BFFS se debe corregir por el tipo de separador, ancho de carril, espacio libre lateral y densidad de accesos. Las correcciones por el alejamiento de la condición base se hacen restando valores de corrección a la velocidad a flujo libre.

Adicionalmente, con información del tránsito como volumen, composición vehicular, factor de hora pico y tipo de conductor, se determina el flujo vehicular, (v_p).

Un aspecto a tener en cuenta en la aplicación del método HCM 2010 es lo relacionado con el tipo de terreno y con los factores de equivalencia para camiones y vehículos recreacionales.

Para aplicar el método HCM 2010 se deben atender diferentes criterios, definir el tipo de terreno y el efecto de los camiones en la operación de la carretera. Para ello se consideran las siguientes definiciones:

Terreno plano: es la combinación de alineamientos horizontal y vertical que permite a los camiones mantener igual velocidad que los autos.

Terreno ondulado: es la combinación de alineamientos que obliga a los camiones a reducir velocidad durante un lapso significativo de tiempo o por intervalos frecuentes.

Terreno montañoso: es la combinación de alineamientos que obliga a los camiones a circular cerca o a la velocidad específica.

Pendiente en ascenso: pendiente entre el 2 % y 3 % con longitud mayor de 0.5 millas (800 metros). Asimismo, es cualquier tramo con pendiente mayor o igual al 3 % y longitud mayor de 0.25 millas (400 metros).

Pendiente compuesta: es aquella en la que se pueden combinar pendientes inferiores a 4 % y longitud inferior a 1220 metros (4000 pies).

Si se selecciona el terreno con pendientes en ascenso o en descenso, y se introduce la información de pendientes o rampas compuestas, se efectuará el análisis solicitado.

Para pendientes compuestas fuertes, se recomienda utilizar el procedimiento del Anexo A del capítulo 11 “Autopistas” del HCM.

Con la definición de la curva flujo–velocidad del tramo y el flujo v_p se obtiene la velocidad y la densidad. El Nivel de Servicio se obtiene utilizando la tabla de rangos establecida por el método.

1.2.3 Adaptación a las condiciones colombianas

El programa de investigaciones de campo realizado comprendió una serie de mediciones para adaptar el *Manual HCM* a las condiciones de operación de las carreteras multicarril en el país.

Los aspectos relacionados con esta adaptación son:

- Curvas flujo-velocidad de las vías multicarril.
- Factor de corrección a la velocidad por efecto del ancho de carril.
- Factor de corrección a la velocidad por efecto del tipo de separador.
- Factor de corrección a la velocidad por efecto del ancho promedio de bermas.
- Factor de corrección a la velocidad por efecto de la densidad de accesos laterales.
- Factor de corrección a la velocidad por efecto de la tortuosidad de la vía.
- Factores de equivalencia de camiones en pendientes.

1.3 Descripción básica de la operación de una carretera multicarril

Se describen las bases del funcionamiento de una infraestructura de este tipo.

1.3.1 Características fundamentales de operación

Una carretera multicarril se clasifica dentro de la infraestructura vial como una vía con régimen de tránsito continuo, con control total o parcial de accesos.

Las características de operación bajo este régimen de flujo quedan reflejadas en las relaciones entre la velocidad, el flujo y la densidad.

En la Figura 1 se presenta las tres curvas características:

- Flujo-velocidad.
- Flujo-densidad.
- Densidad-velocidad.

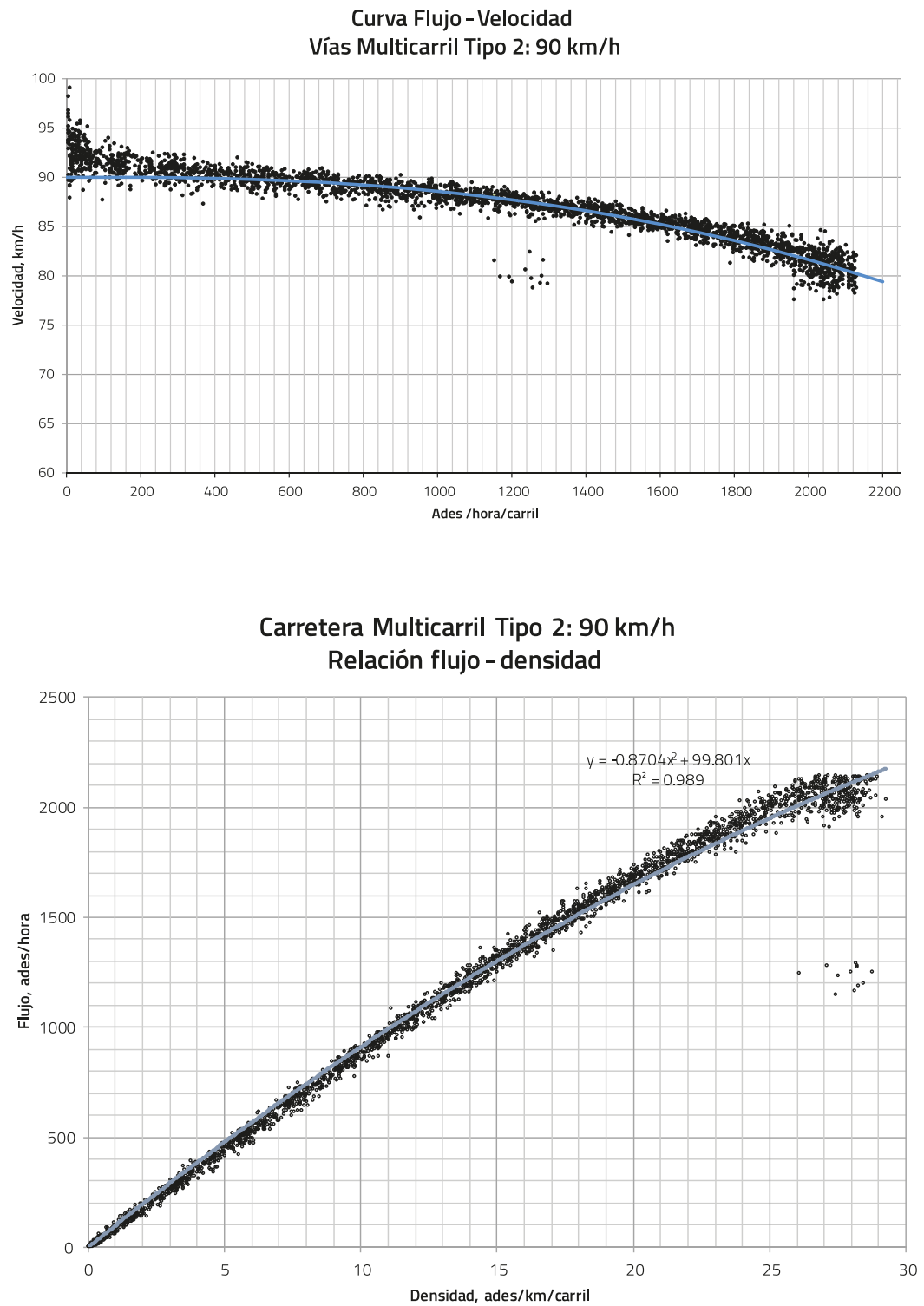
Una primera diferencia de la operación de una vía multicarril en Colombia, por lo demás notable, con el comportamiento típico de una carretera multicarril de los Estados Unidos de América está en la forma de la curva flujo-velocidad.

En Estados Unidos dicha curva presenta un primer tramo horizontal que indica que la velocidad permanece constante hasta flujos de tránsito cercanos a los 1400 pc/hora/carril¹ y después decrece en forma suave. En el caso colombiano, la velocidad decrece con el flujo de tránsito a lo largo de toda la curva.

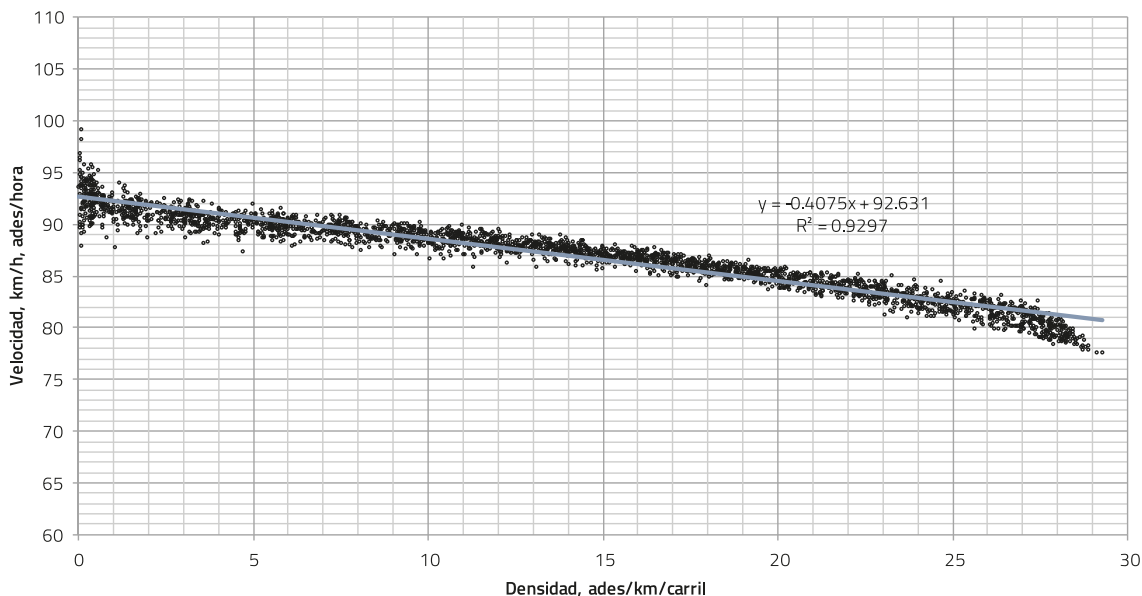
Las otras dos curvas tienen comportamiento similar en los dos países. La relación flujo-densidad muestra forma parabólica y la relación densidad-velocidad forma lineal.

1. pc: unidades de carros de pasajeros; utilizada para tránsito equivalente.

Figura 1. Curvas características de una carretera multicarril en Colombia.



Carretera Multicarril Tipo 2: 90 km/h Relación densidad - velocidad



Fuente: elaboración propia.

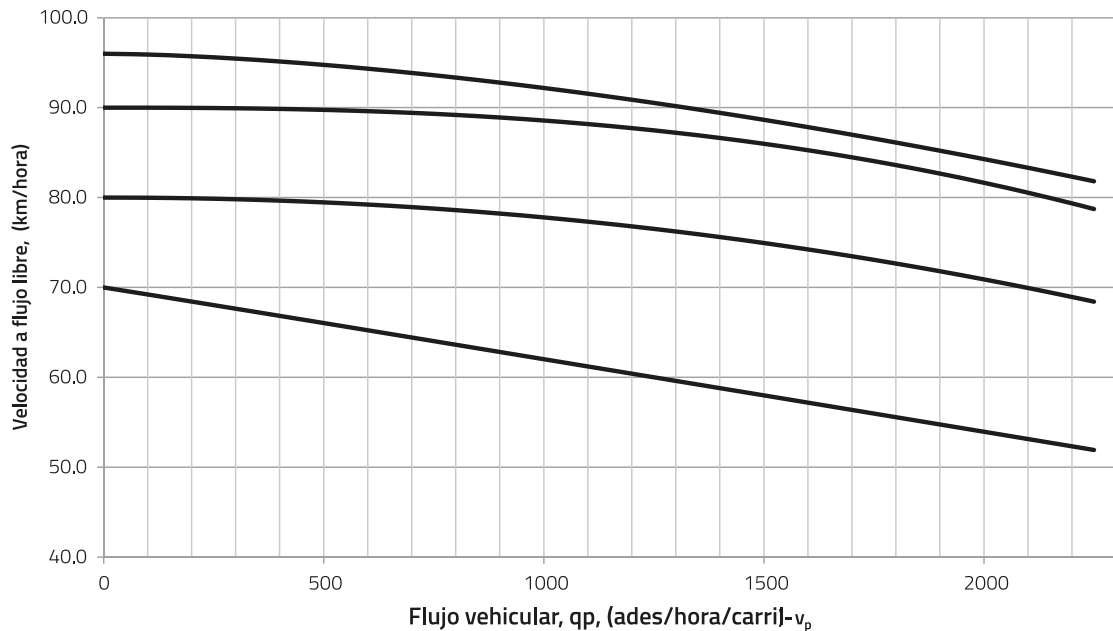
La fundamentación teórica de la capacidad y el Nivel de Servicio se centra en la teoría del flujo vehicular y en la elaboración de las curvas flujo-densidad-velocidad, en las que se han centrado las investigaciones de los últimos cincuenta años.

El punto de partida del presente manual lo constituye la obtención de las curvas flujo-velocidad para las carreteras multicarril del país. Para la toma de información se utilizaron equipos de grabación de videos y fotografías, y videos tomados desde un dron. En la Figura 2 se presentan las curvas flujo-velocidad para las cuatro tipologías de multicarril definidas en Colombia:

- Multicarril tipo 4: velocidad a flujo libre de 70 km/h.

En la Figura 1, para todas las curvas, el flujo vehicular se expresa en automoviles directos equivalentes ADES, unidad equivalente a vehiculos de pasajeros.

- Multicarril tipo 1: velocidad a flujo libre de 96 km/h.
- Multicarril tipo 2: velocidad a flujo libre de 90 km/h.
- Multicarril tipo 3: velocidad a flujo libre de 80 km/h.

Figura 2. Curvas flujo-velocidad para las carreteras multicarril en Colombia.

Fuente: elaboración propia.

1.3.2 Factores geométricos que influyen en la circulación

Si se dan variaciones en las condiciones básicas o ideales de la carretera multicarril se deben efectuar ajustes a la velocidad a flujo libre. Los factores de ajuste son reducciones a la velocidad a flujo libre característica de la vía multicarril.

Las variables geométricas consideradas para ajustar la velocidad a flujo libre característica son: ancho de carril, tipo de separador, distancia lateral libre (a derecha y a izquierda), y densidad de accesos laterales. El efecto de la pendiente se tiene en cuenta en los factores de equivalencia de camiones.

La aplicación en conjunto de todos los ajustes permite obtener un valor esperado de velocidad a flujo libre y con ella seleccionar el tipo de vía multicarril característico para establecer condiciones de operación tales como velocidad, densidad, Nivel de Servicio, etc.

1.3.2.1. Efecto del ancho de carril

Uno de los aspectos de mayor impacto en la velocidad de los vehículos, en todos los tipos de vías, es el ancho de los carriles de circulación. La literatura especializada reporta reducciones de velocidad importantes cuando el ancho del carril es de aproximadamente diez pies (tres metros).

Uno de los grandes misterios de la ingeniería vial es considerar el ancho de carril ideal de 3.65 metros, valor que hace su aparición en los primeros escritos de ingeniería vial hacia el año 1930, y fue ratificado en el HCM de 1950.

Estudios de esos años hasta fechas recientes confirman que el ancho de carril ideal es de 3.65 metros y que el ancho de carril no debe ser inferior a 3.00 metros.

Si los carriles son muy amplios no cumplen una de sus funciones, lograr la canalización de los flujos, ya que

estos se vuelven erráticos y se puede generar invasión del carril por vehículos que circulan por otros carriles.

Si el carril es estrecho induce un comportamiento temeroso en el conductor y la amenaza de accidente por choque lateral se incrementa; además, es notable el aumento de la resistencia al aire, principalmente en carreteras con alta presencia de camiones.

1.3.2.2 Efecto del tipo y ancho del separador

Las carreteras multicarril pueden ser divididas o no divididas. Desde el punto de vista de seguridad vial las bondades de las vías divididas por un separador central son evidentes y su efecto es la disminución de los choques frontales y el encandilamiento.

En pocas oportunidades se han estudiado otros efectos originados por la existencia del separador y su ancho en la operación de los vehículos. Filmaciones detalladas en tramos de multicarril con diferentes anchos de separador muestran que los vehículos afectados por este aspecto son los que circulan por los carriles adyacentes al mismo. El efecto se mide a través de un incremento en la resistencia al aire y a la disminución de la energía cinética.

1.3.2.3 Efecto del ancho promedio de bermas

El ancho de las bermas y, en forma más general, la distancia libre lateral constituyen elementos que controlan la operación en carreteras multicarril. La existencia de bermas estrechas lleva a los conductores a adoptar un comportamiento defensivo, disminuye la velocidad de circulación e incrementa los tiempos de reacción.

Esta situación se presenta para los conductores cercanos a la berma, carril externo o interno, pero su efecto en los carriles centrales puede llegar a ser nulo.

De nuevo y en forma similar a lo descrito para carriles, el ancho de berma ideal es de 1.8 y constituye todo un misterio dentro de la ingeniería vial y su valor está

avalado desde las primeras décadas del siglo XX y confirmado desde el *Manual HCM* de 1950.

La existencia de zonas libres a derecha a izquierda constituye zonas de operación perdonantes, que a la vez mejoran la seguridad de la carretera y brindan al conductor un margen u holgura para realizar maniobras de ajuste en la conducción. Si se sale de la vía, tiene la oportunidad de recuperar su trayectoria o detenerse sin sufrir un accidente.

Si estas distancias son reducidas el conductor puede sufrir el denominado efecto túnel, que le obliga a reducir la velocidad y ajustar su trayectoria con mucha frecuencia.

1.3.2.4 Efecto de la densidad de accesos laterales

Las carreteras multicarril constituyen una infraestructura intermedia entre las autopistas y las carreteras de dos carriles, siendo uno de los aspectos más influyentes para la clasificación de las mismas el control de accesos.

Para una infraestructura a régimen de flujo ininterrumpido, la presencia de accesos laterales o de retornos en el separador central altera el comportamiento de los conductores y puede incidir psicológicamente sobre los mismos, generando reducción en la velocidad de operación.

Las vías multicarril pueden clasificarse en tres categorías según el entorno donde se localizan: desarrollo en entorno rural, en entorno semiurbano y en entorno urbano. Este último caso puede llevar a clasificar la vía como arteria urbana, si se presentan intersecciones semaforizadas muy frecuentes. El presente manual aplica para las vías en los dos primeros entornos: rural y semiurbano.

En las carreteras multicarril el control de accesos es parcial: algunos accesos se realizan en los intercambiadores a desnivel, mientras que otros carecen de control total. En las vías multicarril se da servicio a las propiedades ubicadas al lado derecho de

la calzada de análisis, es importante que estos accesos cuenten con carriles de aceleración y deceleración.

El número, frecuencia y tipo de accesos al lado derecho de la vía influyen notablemente en su funcionamiento, generando reducción de velocidad como si se tratara de una sucesión de curvas horizontales.

En cada kilómetro se contabilizan las siguientes situaciones:

- Un acceso por cada entrada y/o salida a estaciones de servicio, centros comerciales, colegios, universidades.
- Acceso a haciendas, fincas, fábricas, etc.
- Accesos en intersecciones aisladas.

1.3.2.5 Efecto de la tortuosidad de la vía

Un principio rector de los estudios en carreteras multicarril colombianas es la hipótesis que a mayor jerarquía de la carretera su operación es más parecida, independientemente de su ubicación geográfica o del país en que se encuentre.

Sin embargo, se pueden identificar por lo menos tres aspectos en los cuales las carreteras colombianas difieren de las estadounidenses:

- Las pendientes son más altas y las longitudes de cuesta más largas.
- El porcentaje de camiones circulantes, en relación con el volumen total, es más alto en las vías colombianas.
- La curvatura o tortuosidad de nuestra red es alta, debido a que generalmente al llevar una vía de dos carriles a una vía multicarril no se cambia sustancialmente su tortuosidad.

El efecto de la tortuosidad de la vía no se contempla en la metodología del *HCM* 2010, pero se ha considerado conveniente incluirlo en carreteras multicarril en Colombia. El radio de una curva, su peralte y el coeficiente de fricción entre las llantas y la superficie de

rodadura limitan la velocidad segura a la que la curva se puede recorrer. Una sucesión de curvas horizontales puede tener efectos acumulados a lo largo del recorrido.

Para considerar la curvatura de la vía se estableció un indicador de tortuosidad del tramo, expresado como el valor promedio de grados de deflexión por kilómetro ($^{\circ}/\text{km}$). Este indicador, utilizado en el programa *HDM 4*, explica en buena medida los cambios de dirección que realiza un vehículo a lo largo del tramo.

Cuando los vehículos circulan por una curva horizontal ofrecen una oposición al cambio de dirección del avance del vehículo y se origina una fuerza entre las ruedas delanteras y el pavimento. Esta resistencia es llamada resistencia debida a la curvatura.

Esta resistencia depende principalmente de la velocidad de circulación y se puede estimar mediante la siguiente expresión:

$$R_c = 0.5 \frac{0.0185 v^2 P}{gR}$$

Donde: R_c = Resistencia debida a la curvatura (kg)

v = Velocidad del vehículo (km/h)

P = Peso bruto del vehículo (kg)

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

R = Radio de curvatura (m)

Esta resistencia se suma a las otras: inercia, rodamiento, aire y pendiente, que deben ser vencidas por la potencia o fuerza motriz y su excedente utilizarlo para acelerar el vehículo.

Se debe tener especial cuidado que el índice de tortuosidad ($^{\circ}/\text{km}$) y la pendiente de la vía están altamente relacionados. La investigación realizada sobre el efecto de la tortuosidad en la velocidad a flujo libre concluyó que no es significativo incluir un factor por tortuosidad, debido a que las correcciones son muy bajas.

1.3.3 Factores de tránsito que influyen en la circulación

Se detallan los siguientes factores:

1.3.3.1 Factor de hora pico

El factor de hora pico (FHP) trata de medir las variaciones del tránsito en períodos inferiores a la hora. El cálculo de la demanda de tránsito considerando el FHP incorpora un factor de seguridad.

1.3.3.2 Equivalencia de camiones

Se tienen en cuenta las pendientes y tipo de camiones.

a. Efectos de las pendientes

Las pendientes pueden afectar la velocidad de los vehículos de diversas formas.

■ Pendientes ascendentes

Para hacer avanzar a un vehículo en rasantes horizontales, la potencia de su motor debe vencer la resistencia del aire, la que opone el pavimento a la rodadura y las internas del propio vehículo. Estas resistencias varían en distinta proporción según aumenta la velocidad, por tanto la limitan.

En pendientes ascendentes el vehículo tiene otra resistencia que vencer: la componente de su peso, paralela a la superficie, que limita aún más su velocidad. Por consiguiente, la capacidad para desarrollar velocidad en ascenso es menor que en el plano horizontal y disminuye a medida que aumenta la pendiente.

Cuando un vehículo inicia un ascenso después de un plano horizontal, de una pendiente descendente o de una ascendente menos inclinada, en virtud de las leyes de la inercia puede empezar a subir a una velocidad mayor de la que permite la cuesta. Cuando ha recorrido cierta distancia en la pendiente, la energía cinética adicional que llevaba se consume, y no podrá avanzar a mayor velocidad de la que le permiten la pendiente, su

potencia y las otras resistencias, y entonces circula con la que se llama “velocidad de régimen”.

Si suponemos constantes los demás factores, la velocidad máxima de un vehículo en ascenso está determinada principalmente por:

- La relación peso/potencia del vehículo.
- La inclinación de la pendiente.
- La longitud de la pendiente.
- La velocidad con que inicia el ascenso.

■ Pendientes descendentes

En estas pendientes, la componente del peso, paralela a la superficie, es una fuerza que favorece su movimiento y el vehículo puede desarrollar mayores velocidades que en rasantes horizontales o en pendientes ascendentes. Sin embargo, muchas veces los conductores de vehículos no desean llegar a las velocidades máximas que les permiten estas pendientes, por razones de seguridad.

Se debe considerar en primer lugar, que las curvas y otros elementos de la vía obligan a limitar la velocidad.

En segundo lugar, en pendientes descendentes se tiene menos control del vehículo que en sectores planos. Esto se debe a que la componente del peso paralela a la superficie se suma a la inercia del vehículo, mientras que disminuye la componente normal y por lo tanto la fuerza de fricción disponible para frenar; esto hace que muchas veces el conductor modere su velocidad en descenso más de lo que obligan las propias restricciones de la vía.

En tercer lugar, si la inclinación y la longitud de la pendiente descendente pueden impulsar el vehículo y hacerle alcanzar velocidades tan altas que se pierda el control del mismo, el conductor preferirá efectuar el descenso a velocidades algo menores a la máxima posible, para tener un margen de seguridad.

Esto rige principalmente en camiones, debido a que en pendientes descendentes muy largas e inclinadas deben circular con relaciones de cambio bajas, para que la compresión de su motor limite su velocidad, sin que haya que aplicar continuamente los frenos. Si estos

se aplican en exceso pueden recalentarse y perder eficiencia, lo que es una condición muy peligrosa y que se trata de evitar. Por lo tanto, en pendientes muy fuertes (generalmente de más del ocho por ciento), los camiones descienden cautelosamente, a una velocidad casi igual a la que ascienden.

b. Efectos de los camiones

El *HCM* 2010 ha sido formulado para las condiciones de Estados Unidos de América. No obstante que la apariencia y operación de las carreteras multicarril en Colombia es más semejante a las condiciones de Estados Unidos que en las de dos carriles, la acción de los vehículos pesados constituye el factor de divergencia más notable para la adaptación y aplicación del *HCM* en Colombia.

Para tener en cuenta el mayor efecto que ejercen los vehículos pesados se utilizan las equivalencias en automóviles, que expresan el número de automóviles que causaría el mismo efecto que un vehículo pesado sobre cierta característica del tránsito. Por esta razón, un esfuerzo notable para adaptar el *HCM* a las condiciones colombianas tiene que ver con medir el efecto de la presencia de los vehículos pesados.

En términos más precisos, los factores de equivalencia de camiones deben ser calculados para las carreteras

multicarril en Colombia. Para ello, se ha decidido adelantar varias acciones al respecto, tales como:

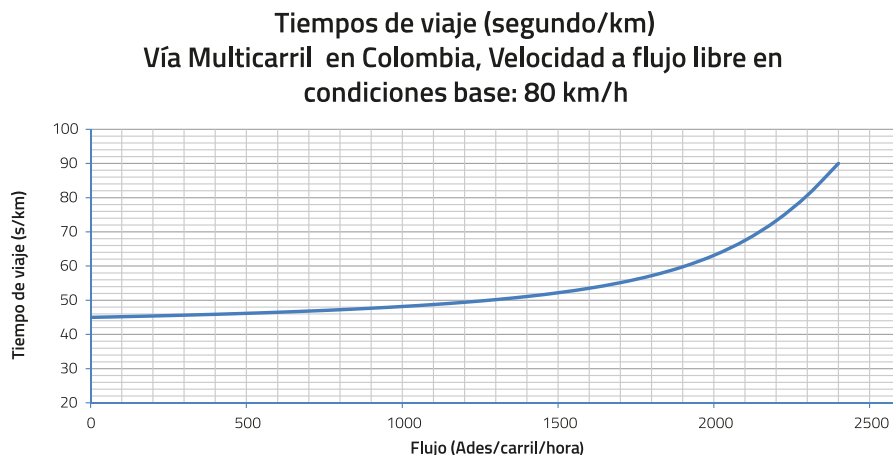
- Medición de tiempos de paso y velocidades en tramos con pendiente.
- Modelación con el programa CORSIM, teniendo en cuenta las relaciones peso/potencia de los camiones colombianos y otros factores.
- Modelación con el programa SIMCAR, desarrollado por la Universidad del Cauca.

Los factores de equivalencia de camiones se deben obtener en relación con su efecto sobre la densidad vial, ya que esta es la variable utilizada para determinar el Nivel de Servicio.

1.3.4 Tiempos de viaje en carreteras multicarril

El tiempo de viaje es una de las variables que miden la calidad de operación de una infraestructura. En la Figura 3 se presentan los tiempos de viaje en función del flujo vehicular. Es notable el incremento de los tiempos de viaje cuando el flujo de tránsito es superior a 1500 Ades/h/carril.

Figura 3. Tiempos de viaje característicos en carretera multicarril



Fuente: elaboración propia.

1.4 Consideraciones sobre el Nivel de Servicio

La medición del Nivel de Servicio se realiza a través de una calificación cualitativa que va de la A a la F. Por definición el nivel E corresponde a la capacidad de la vía.

Para las carreteras multicarril se ha establecido como variable de efectividad la densidad en veh/km/carril. Se trata de medir el grado de fricción y/o interacción entre vehículos. Además, al aumentar la densidad los cambios de carril disminuyen, así como las velocidades de operación.

La determinación de los Niveles de Servicio a través del procedimiento señalado anteriormente ha sido materia de análisis y ha sido cuestionada por algunos investigadores y administradores de redes viales, por las siguientes razones:

- La dificultad de relacionar el Nivel de Servicio obtenido con la apreciación de los usuarios de las vías.
- La baja sensibilidad de las escalas de los Niveles de Servicio ante mejoras propuestas a las vías. Es posible que algunas mejoras en las vías no lleven a un incremento en el Nivel de Servicio.
- No considera aspectos relacionados con la calidad de la operación, tales como señalización inteligente, atención de accidentes, buenas prácticas de gestión vial, etc.

Una consideración de mucha importancia en las vías multicarril es la estrecha vinculación que debe tener el Nivel de Servicio con la relación Volumen/Capacidad asociada a cada escala de calificación.

En el presente manual se proponen tres técnicas o enfoques para determinar el Nivel de Servicio:

- Enfoque 1. Método clásico del *HCM*. Se selecciona una variable de efectividad y se determinan las densidades máximas que establecen los límites entre un nivel y otro.
- Enfoque 2. Diagramas espacio-tiempo. Diagramas de evolución del tránsito. Se trata de establecer el

impacto espacial y temporal de perturbaciones en la operación de la vía.

- Enfoque 3. Indicadores de calidad. Se centra en la adopción de indicadores de calidad, su ponderación y posterior calificación en un tramo de carretera específico.

A continuación se detallan estos enfoques.

1.4.1. Enfoque 1. Método clásico del *HCM*

Contempla seis Niveles de Servicio.

1.4.1.1 Descripción de los Niveles de Servicio

- El Nivel de Servicio "A" describe unas condiciones de completa libertad. La circulación de los vehículos queda virtualmente libre de los efectos de la presencia de otros vehículos, y las operaciones únicamente quedan restringidas por la geometría de la carretera y por las preferencias del conductor. La maniobrabilidad dentro de la corriente circulatoria es buena. En este nivel se absorberán con facilidad las pequeñas alteraciones del flujo sin ningún cambio en la velocidad de recorrido.
- El Nivel de Servicio "B" es también indicativo de flujo libre, aunque empieza a ser perceptible la presencia de otros vehículos. Las velocidades medias de recorrido son las mismas que en el NS "A", pero los conductores tienen una libertad de maniobra ligeramente inferior. En este nivel las alteraciones pequeñas todavía se absorben fácilmente, aunque se hacen más patentes ciertos deterioros locales.
- El Nivel de Servicio "C" representa un rango en el cual queda marcada la influencia de la densidad del tráfico sobre las operaciones. Ahora la presencia de otros vehículos claramente afecta la maniobrabilidad de la corriente circulatoria. Las velocidades medias de recorrido comienzan a mostrar alguna reducción en aquellas carreteras multicarril con velocidades libres por encima de 80 km/h. Es de esperar que las pequeñas alteraciones en el flujo provoquen serios deterioros localizados del servicio, y que se formen colas detrás de cualquier alteración del tráfico.

- El Nivel de Servicio “D” representa un rango en el cual la capacidad de maniobra se ve seriamente restringida debido a la congestión de la circulación. Al incrementarse los volúmenes la velocidad de recorrido comienza a reducirse. Solo es posible absorber las alteraciones pequeñas sin que se formen largas colas y sin que el Nivel de Servicio disminuya.
- El Nivel de Servicio “E” representa una explotación en, o cerca de, la capacidad, y es bastante inestable. Las densidades varían en función de la velocidad libre. En el NS E los vehículos ruedan con el mínimo espaciamiento para el que se puede mantener un flujo uniforme. Al aproximarse al límite inferior del Nivel de Servicio no pueden absorberse o disiparse rápidamente la mayoría de las alteraciones, y estas ocasionan la formación de colas y la caída al NS F. En la mayoría de las carreteras multicarril con velocidades libres entre 70 y 100 km/h, la velocidad de los vehículos ligeros oscila entre 68 y 88 km/h, pero son muy variables e impredecibles.
- El Nivel de Servicio “F” representa un flujo forzado o en colapso. Esto se produce bien en un punto al que los vehículos llegan a una tasa mayor que la tasa de descarga o en un punto de una carretera en planeamiento donde la demanda prevista excede la capacidad calculada. Aunque la operación en estos puntos (y en los tramos inmediatamente corriente abajo) parecen estar a capacidad, se formarán colas detrás de estos puntos. La circulación en las colas es altamente inestable, presentándose breves períodos de movimiento seguidos por paradas.

1.4.1.2 Niveles de Servicio en carreteras multicarril en Colombia

Para establecer las densidades límite entre los diferentes Niveles de Servicio se han formulado dos principios:

- Establecer una escala de Niveles de Servicio uniforme para los diferentes tipos de multicarril en Colombia.
- Establecer la relación Volumen/Capacidad que define cada Nivel de Servicio a través de la densidad máxima y procurar que ella se mantenga en un rango predeterminado.

1.4.1.3 Relaciones Volumen/Capacidad, densidades máximas y Niveles de Servicio en carreteras multicarril

Uno de los pilares del método es establecer una relación directa entre Volumen/Capacidad y el Nivel de Servicio a través de la densidad.

En la Tabla 1 se presentan los Niveles de Servicio correspondientes a la relación volumen/capacidad para diferentes tipos de vías multicarril. En cada una de ellas se determina la densidad máxima que define el Nivel de Servicio.

Tabla 1. Definición de Niveles de Servicio en carreteras multicarril.

Tipo de multicarril															
Multicarril Tipo 1, 96 km/h				Multicarril Tipo 2, 90 km/h				Multicarril Tipo 3, 80 km/h				Multicarril Tipo 4, 70 km/h			
Nivel	q/C	Densidad	Densidad asumida	Nivel	q/C	Densidad	Densidad asumida	Nivel	q/C	Densidad	Densidad asumida	Nivel	q/C	Densidad	Densidad asumida
A	0.25	6.0	6	A	0.25	6.1	6	A	0.25	6.8	7	A	0.25	8.0	8
B	0.45	11.0	11	B	0.45	11.2	11	B	0.45	12.4	12	B	0.45	15.1	15
C	0.65	16.4	16	C	0.65	16.5	17	C	0.65	18.5	18	C	0.65	23.1	23
D	0.85	22.5	22	D	0.85	22.5	23	D	0.85	25.2	25	D	0.85	32.1	32
E	1.00	27.5	28	E	1.00	27.7	28	E	1.00	31.0	31	E	1.00	39.5	40

Fuente: elaboración propia.

La escala de los Niveles de Servicio se ha realizado en tres grupos a saber:

Grupo 1: Vías multicarril Tipo 1 (96 km/h) y Tipo 2 (90 km/h).

Grupo 2: Vías multicarril Tipo 3 (80 km/h).

Grupo 3: Vías multicarril Tipo 4 (70 km/h).

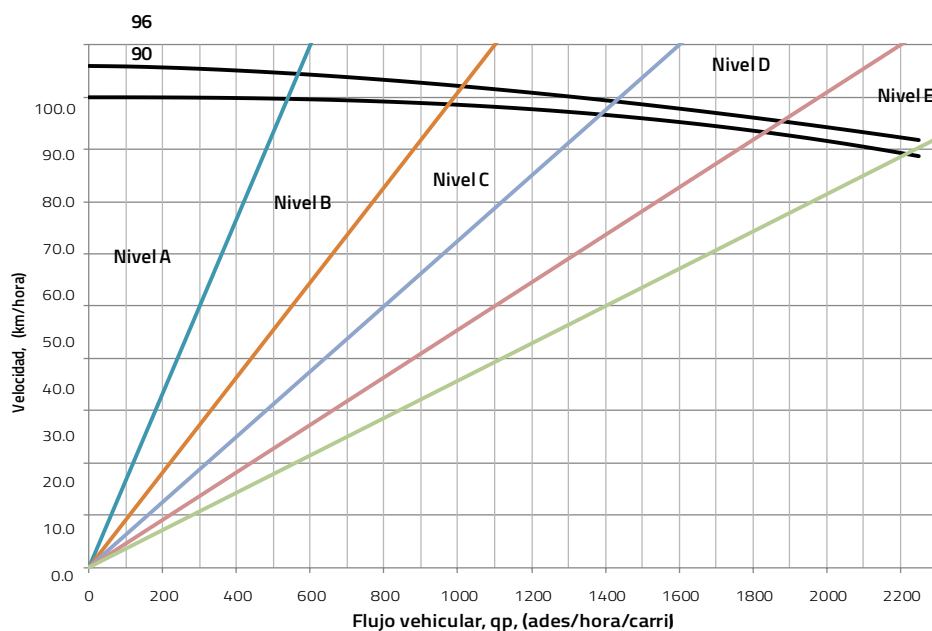
En la Tabla 2 se presenta la definición de Niveles de Servicio obtenida para las carreteras multicarril de Colombia. En las Figura 4 a 6 se presentan las regiones que definen cada Nivel de Servicio para cada tipo de multicarril.

Tabla 2. Definición de Niveles de Servicio propuesta-carreteras multicarril de Colombia.

Nivel de Servicio	Multicarril Tipo 1 (96 km/h) y Tipo 2 (90km/h)	Multicarril Tipo 3 (80 km/h)	Multicarril Tipo 4 (70 km/h)
A	≤ 6	≤ 7	≤ 8
B	$> 6 - 11$	$> 7 - 12$	$> 8 - 15$
C	$> 11 - 16$	$> 12 - 18$	$> 15 - 23$
D	$> 16 - 22$	$> 18 - 25$	$> 23 - 32$
E	$> 22 - 28$	$> 25 - 31$	$> 32 - 40$
F	> 28	> 31	> 40

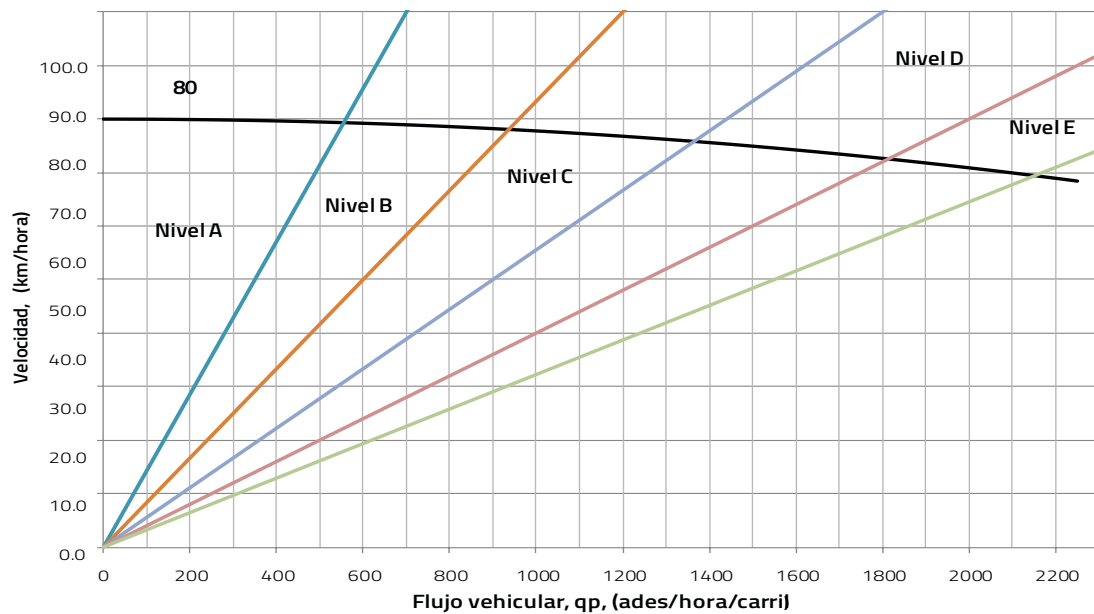
Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Niveles de Servicio en carreteras multicarril de Colombia, Vías multicarril Tipo 1 (96 km/h) y Tipo 2 (90 km/h).



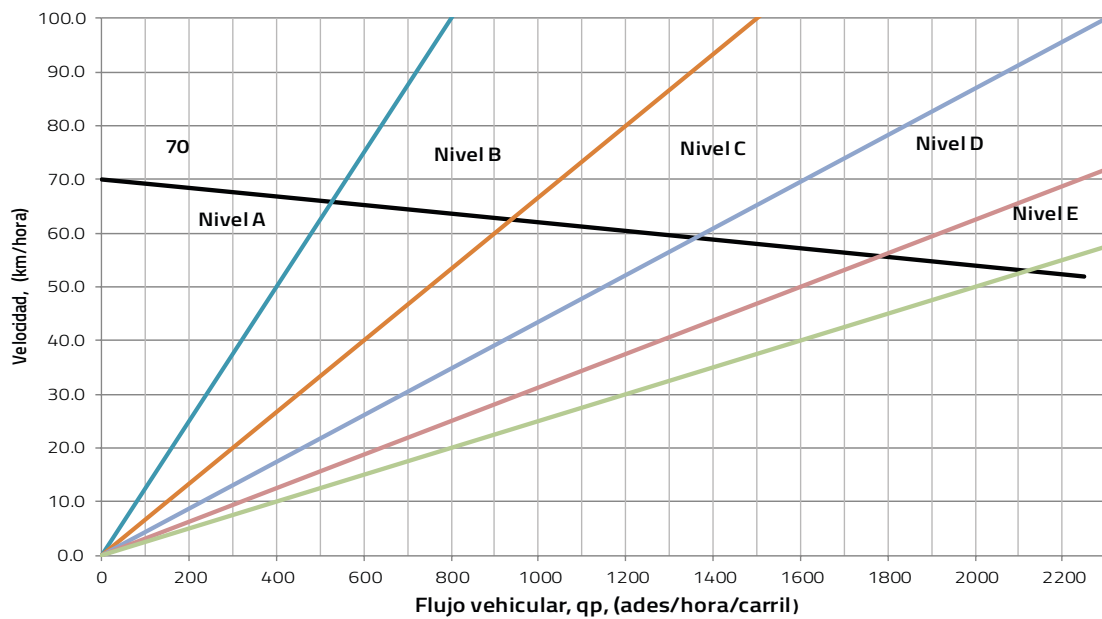
Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Niveles de Servicio en carreteras multicarril de Colombia, Tipo 3 (80 km/h).



Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Niveles de Servicio en carreteras multicarril de Colombia, Tipo 4 (70 km/h).



Fuente: elaboración propia.

1.4.2 Enfoques alternativos para establecer la calidad de operación de una carretera multicarril

Complementario al enfoque tradicional para determinar el Nivel de Servicio en una carretera multicarril se proporcionan dos procedimientos alternativos para estudiar la calidad de la operación en una vía:

- Procedimiento 1: Diagramas de evolución del tránsito.
- Procedimiento 2: Indicadores de calidad.

A continuación se presenta un resumen de estos procedimientos; el detalle se presenta en el Anexo 1.

1.4.2.1 Diagramas de evolución del tránsito

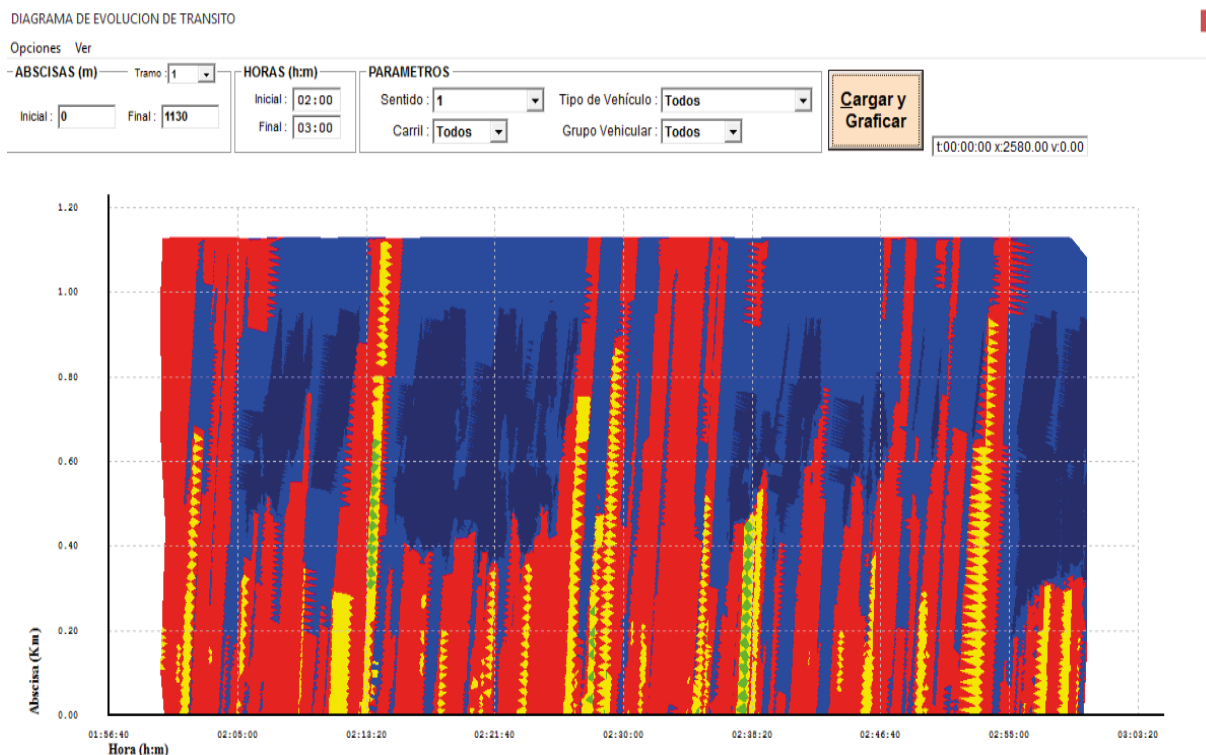
La calidad de la operación en una infraestructura vial tiene variaciones espaciales y temporales. La

determinación de estas variaciones en campo es supremamente difícil, ya que es necesario instrumentar todos los vehículos de la vía. Pero si se dispone de información a nivel de cada vehículo se pueden obtener los denominados gráficos o diagramas de evolución del tránsito de las condiciones del flujo vehicular. En la Figura 7 se muestra un diagrama de evolución del tránsito.

La disposición del diagrama de evolución del tránsito es similar a la de un diagrama espacio-tiempo, en el que se registran los cambios espaciales y temporales de la variable de interés.

Una sección de carretera con problemas operacionales afecta el flujo vehicular, fenómeno que muchos investigadores asimilan a las ondas de perturbación, que generan impactos en dos sentidos:

Figura 7. Diagrama típico de evolución del tránsito de una carretera



Fuente: elaboración propia.

- En el sentido espacial, en secciones aguas abajo donde inicia la perturbación. Este efecto se disipa en una distancia que depende de las condiciones de la carretera.
- Por otra parte, la perturbación tendrá una duración y un mecanismo de disipación en el tiempo.

1.4.2.2 Indicadores de calidad

En los últimos años, la importancia que se concede a la calidad de los productos y servicios que están al alcance de los ciudadanos ha crecido considerablemente. Hoy en día no es suficiente disfrutar de ese producto o servicio, sino que se exige, tanto por parte de las administraciones como por parte de la opinión pública, que se cumplan ciertos requerimientos relacionados con la calidad. De esta manera, los procesos para garantizar la calidad se han incorporado casi a todas las actividades que se desarrollan en la sociedad, y los servicios que se prestan por medio de la carretera no son una excepción.

Una vez se tiene una concepción general del modelo de gestión, se centra la atención en el diseño del modelo de evaluación y calificación. El procedimiento adoptado en este caso contempla los siguientes aspectos:

- Identificación de componentes o factores globales, que permiten desglosar el sistema en partes más o menos funcionales.
- Para cada factor se seleccionan un grupo de indicadores.
- Se lleva a cabo una valoración del grado de importancia de los factores y de sus indicadores.
- Se establecen instrumentos para llevar a cabo el proceso de calificación.

Los factores de evaluación de la calidad están íntimamente relacionados con los denominados elementos del tránsito. En la Tabla 3 se presenta una breve descripción de cada uno de los factores globales de evaluación.

Tabla 3. Factores globales-Indicadores de calidad.

Código	Nombre del factor	Descripción
1	La vía	Cubre todos los aspectos geométricos y operacionales de la vía
2	El usuario	Los usuarios de la vía se dividen en conductores, pasajeros y peatones. La diversidad de características de estas personas afecta la operación de una vía
3	El vehículo	Cada día crece el número de vehículos que circulan por las carreteras, y se han diversificado los tipos de vehículos. El control sobre los mismos y las características existentes en cuanto a protección de los usuarios, hace que mejoren las condiciones de seguridad en las vías
4	El medio ambiente	Es importante analizar los servicios adicionales que proporciona una vía tales como paraderos de autobuses, sitios de descanso y servicios para los viajeros. También es importante analizar los antecedentes de la vía en cuanto a accidentalidad.
5	Institucional	Se reúnen aquí los aspectos relacionados con la gestión de la seguridad vial por parte de los administradores de las carreteras, por ejemplo la realización de auditorías de seguridad vial, puntos críticos, velocidad, mantenimiento, control policivo y atención de heridos en caso de accidentes (atención del trauma).

Fuente: Corporación Fondo de Prevención Vial.

El marco general de calificación para cualquier carretera está dado por los indicadores y pesos relativos consignados en la Tabla 4, que contiene el formato para hacer la calificación de una carretera. El procedimiento es el siguiente:

1. Calificar cada indicador en la escala de 1 a 10. La calificación 1 es deficiente y la calificación de 10 es excelente.
2. Obtener la calificación ponderada, calculada como el producto de la calificación asignada por el ponderado del indicador.
3. La calificación final está dada por la suma de los resultados de las calificaciones ponderadas.

Tabla 4. Formato de calificación de la calidad de una carretera

Indicador	Ponderación, %	Calificación	Calificación ponderada
1 - Capacidad y Nivel de Servicio	23.80		
2- Carriles Auxiliares	2.93		
3 - Peligrosidad del separador	0.97		
4 - Cicloruta	4.90		
5 - Motoruta	1.46		
6 - Estado de las bermas	3.61		
7 - Ancho del andén	1.27		
8 - Estado de señales	1.18		
9 - Estado de la demarcación	1.75		
10 - Estado de la superficie de Rodadura	5.92		
11 - Tipo de Intersecciones	4.21		
12 - Tipo de pasos peatonales	1.42		
13 - Facilidades para personas especiales	1.31		
14 - Información a conductores	5.12		
15 - Zona perdonante	4.85		
16 - Estado de las barreras de seguridad	2.55		
17 - Paraderos de autobuses	2.50		
18 - Iluminación	1.49		
19 - Historia de la accidentalidad	6.04		
20 - Auditorias de Seguridad Vial	1.50		
21 - Estudios de Puntos críticos	2.02		
22 - Planes de mejoramiento	1.78		
23 - Operativos de control	2.78		
24 - Campañas de prevención	2.25		
25 - Mantenimiento vial	7.32		
26 - Atención de emergencias	2.64		
27 - Manejo de cierres de la vía	2.42		
Calificación de calidad			

Fuente: Elaboración propia.

En aras de mantener la escala del Nivel de Servicio del *HCM*, en la Tabla 5 se establece la escala de la calidad ofrecida por la vía.

Tabla 5. Escala de calificación de la calidad de la carretera.

Escala de calificación de la calidad	Intervalo de calificación
A	$>90 \leq 100$
B	$>80 \leq 90$
C	$>70 \leq 60$
D	$>60 \leq 50$
E	$>30 \leq 50$
F	<30

Fuente: elaboración propia.

1.5. Tasas de flujo máximas por Nivel de Servicio

La capacidad de una vía multicarril se da para el Nivel de Servicio E. Para los otros Niveles de Servicio, a partir de las densidades máximas se pueden determinar las tasas de flujo máximas. Estos valores son necesarios para llevar a cabo el análisis de planeación. En la Tabla 6 se presentan las tasas de flujo máximas para cada Nivel de Servicio y tipo de multicarril.

Tabla 6. Tasas de flujo máximas por Nivel de Servicio

Nivel de Servicio	Tipo de multicarril			
	1. Vel 70 km/h	2. Vel 80 km/h	3. Vel 90 km/h	4. Vel 96 km/h
A	525	540	550	560
B	945	970	990	1010
C	1365	1400	1430	1460
D	1785	1830	1870	1910
E	2100	2150	2200	2250

Fuente: elaboración propia.

1.6 Investigaciones realizadas

Para la elaboración del Manual fue necesario realizar varias investigaciones.

1.6.1 Investigaciones de soporte

La Tabla 7 muestra una descripción general de las investigaciones realizadas.

Tabla 7. Investigaciones de soporte del manual.

Investigación de soporte	Descripción general
Investigación 4 - curvas flujo - densidad - velocidad vías multicarril	La investigación se centra en obtener las curvas flujo - velocidad para cuatro (4) tipos de carreteras multicarril en Colombia. Estas curvas se obtienen para las condiciones base: terreno plano, ancho de carril de 3.60 m, con separador, distancia libre lateral de 3.60 m, pocos accesos laterales y poca tortuosidad. Estas curvas maestras constituyen la principal adaptación del modelo del <i>HCM 2010</i> a las condiciones colombianas.
Investigación 5 - Efecto del ancho del separador en la velocidad de vías multicarril	Esta investigación trata de medir el efecto de la existencia o no de separador en la carretera en la velocidad a flujo libre. Para ello, se lleva a cabo un programa de muestreo de sectores de multicarril con condiciones con y sin separador.
Investigación 6 - Efecto del ancho de carril en la velocidad de vías multicarril	Al reducir el ancho de un carril el conductor experimenta una sensación de peligro para realizar maniobras de cambio de carril e incluso ajustar la velocidad de circulación con cierta frecuencia. En esta investigación se trata de medir su efecto para las carreteras multicarril en Colombia.
Investigación 7 - Efecto del ancho de bermas en la velocidad de vías multicarril	Las zonas libres en las carreteras se constituyen en zonas perdonantes de errores de los conductores. Si se dispone de ellas el conductor acomoda su conducción a una velocidad más alta. El despeje lateral se considera tanto del lado derecho de circulación como del lado del separador. Esta investigación trata de medir el efecto de distancias libres en la velocidad.
Investigación 8 - Efecto de la densidad de accesos en la velocidad de vías multicarril	Los puntos de servicio o acceso lateral por el lado derecho de circulación constituyen interferencias en la operación de una carretera multicarril. Al aumentatr el número de accesos por kilómetro se podría incluso cambiar de régimen de tránsito. El efecto se estudia con analogía al de curvas horizontales a lo largo del recorrido.
Investigación 9 - Efecto de la presencia de vehículos pesados en la velocidad de vías multicarril	Esta investigación trata de establecer las equivalencias de camiones en sectores de pendiente y con longitudes de cuesta variables. Esta investigación es de mucha importancia porque uno de las razones expuestas para justificar una adaptación del <i>Manual HCM</i> tiene que ver con este fenómeno.
Investigación 10 - Efecto de la curvatura y la pendiente en la velocidad de vías multicarril	El factor de curvatura del sector es un nuevo factor de ajuste, no incluido en el <i>HCM 2010</i> . Se trata de explicar las variaciones de velocidad en sectores con tortuosidad variable. La investigación recomienda no adicionar un nuevo factor por tortuosidad pues su efecto es pequeño.
Investigación 11: Determinación del Nivel de Servicio en vías multicarril	La variable de efectividad asumida para determinar el Nivel de Servicio es la densidad. Esta investigación trata de encontrar un procedimiento para establecer los límites de densidad que definen un Nivel de Servicio. Además, formula dos enfoques alternativos para determinar o estimar la calidad en una carretera.
Investigación 12: Calibración del Modelo SIMCAR y CORSIM	En muchas de las investigaciones planteadas se requiere hacer validaciones por simulación. Esta investigación trata de ajustar el Modelo de simulación SIMCAR.

Fuente: elaboración propia.

1.6.2 Datos de campo

Las investigaciones realizadas requirieron de una toma exhaustiva de datos de campo. A continuación se indica brevemente cuáles fueron los datos tomados, y el procedimiento que se siguió para hacerlo.

- Densidades vehiculares

Se obtuvieron haciendo filmaciones con equipos aéreos tipo dron, que permiten determinar la densidad vehicular (veh/km/carril) para períodos representativos de cinco minutos.

- Tiempo de paso

Para cada carril de muestreo se registró la información del tiempo de paso de cada vehículo, en dos secciones de control por sentido de circulación.

- Conteo de vehículos clasificados en períodos de quince minutos

En cada uno de los carriles de muestreo se realizó el conteo de vehículos, clasificados para cada uno de los períodos analizados. El método utilizado fue la filmación, y se elaboró un programa computacional para extraer la información.

- Medición de velocidades espaciales

En cada sector se midieron las velocidades espaciales a una muestra representativa de vehículos. El procedimiento utilizado fue con cámaras de filmación ubicadas al inicio y al final del sector. Para agilizar la extracción de datos de los videos se elaboró un programa computacional.

- Medición de velocidades en otras secciones de muestreo

Se midieron velocidades puntuales con radar en curvas, puntos de acceso lateral, pendientes en ascenso y descenso, etc.

Los detalles del programa de investigaciones de campo se pueden consultar en el Documento 2.

2. Procedimiento de aplicación

2.1 Tipos de análisis y pasos requeridos en la aplicación

Los tipos de análisis que se pueden realizar son:

- Análisis de operación.
- Análisis de planeación.

El análisis de operación se aplica a tramos existentes, en cuyo caso se obtiene el Nivel de Servicio ofrecido por la vía.

El análisis de planeación se aplica a tramos nuevos para los cuales se define un Nivel de Servicio deseado y se obtiene el número de carriles necesarios para ofrecer dicho nivel.

La Tabla 8 presenta un resumen de los tipos de análisis incluidos en el manual y las características básicas de cada uno de ellos.

A manera de referencia se menciona un tercer tipo de análisis, el análisis detallado, que se puede realizar utilizando el Modelo de simulación SIMCAR. A los usuarios interesados en este procedimiento se les recomienda consultar la documentación del modelo y la guía de uso, proporcionadas en el Documento 10, del informe de investigación.

La interpretación de los resultados obtenidos con la aplicación del manual debe corresponder a las características del proyecto estudiado y estar acompañada del buen juicio del analista.

Tabla 8. Tipos de análisis incluidos en el manual.

Tipo de análisis	Aplicación	Características básicas
I. Análisis operacional	Tramo genérico	Sectores en los cuales se alternan rampas de ascenso y descenso con longitudes menores a 500 m. Los trazados se clasifican en tipo 1, tipo 2 y tipo 3.
	Rampa de ascenso	Sectores de análisis conformados por una rampa con pendiente ascendente sostenida.
	Rampa de descenso	Sectores de análisis conformados por una rampa con pendiente descendente sostenida.
II. Análisis de planeación	Tramo genérico	Sectores de análisis en los cuales se alternan rampas de ascenso y descenso con longitudes menores a 500 m. Los trazados se clasifican en tipo 1, tipo 2 y tipo 3.
	Rampa de ascenso	Sectores de análisis conformados por una rampa con pendiente ascendente sostenida.
	Rampa de descenso	Sectores de análisis conformados por una rampa con pendiente descendente sostenida.
III. Análisis detallado (simulación)	Procedimiento único	Sector de análisis con información detallada del alineamiento horizontal y vertical, vehículos, tránsito.

Fuente: elaboración propia.

2.2.1 Pasos a seguir para un análisis de operación

Los pasos para un análisis de operación son:

- Paso 1: sectorización, definición del tipo de aplicación y preparación de la información necesaria para usar el manual.
- Paso 2: determinación de la curva flujo-velocidad característica del sector de análisis.
- Paso 3: cálculo del flujo vehicular.
- Paso 4: determinación de la velocidad de operación en el sector de análisis.
- Paso 5: cálculo de la densidad.
- Paso 6: determinación del Nivel de Servicio.

2.2.2 Pasos a seguir para un análisis de planeación

Los pasos para un análisis de planeación son:

- Paso 1: sectorización, definición del tipo de aplicación y preparación de la información necesaria para usar el manual.
- Paso 2: determinación de la curva flujo-velocidad característica del sector de análisis.
- Paso 3: cálculo del flujo vehicular.
- Paso 7: determinación del número de carriles.

A manera de guía general para la selección del tipo de análisis y los pasos a seguir se ha preparado el esquema general presentado en la Tabla 9.

Tabla 9. Descripción detallada de los pasos requeridos para cada tipo de análisis.

Tipo de análisis	Aplicación	Procedimiento de aplicación						
		Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4	Paso 5	Paso 6	Paso 7
I. Análisis operacional	1. Tramo genérico Secuencia de pasos: 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6	Aplica para todos los tipos de análisis. La sectorización se lleva a cabo teniendo en cuenta las características geométricas y de tránsito. Para tramos genéricos se debe considerar la clasificación del tipo de terreno. En todas las categorías de terreno la longitud de las tangentes verticales debe ser inferior a 500 m. Si la longitud de la pendiente es inferior a 500 m se debe seleccionar la aplicación de rampa en ascenso o descenso. La información de entrada y los cálculos básicos se pueden consignar en la hoja de trabajo No.1.	Aplica para todos los tipos de análisis. Existen dos opciones: Opción 1: Mediciones de velocidad en campo. Opción 2: Estimación de la velocidad a flujo libre a partir de la velocidad genérica y correcciones. En caso de carreteras con pavimento en mal estado se debe optar por la opción 1.	Usar los equivalentes de camión de la Tabla 17.	Aplica para los tipos de análisis I y II. La velocidad de operación se calcula a partir de la ecuación flujo-velocidad correspondiente a la curva característica del sector de análisis.	Aplica para el tipo de análisis I. El cálculo se realiza mediante el cociente entre el flujo vehicular y la velocidad.	Aplica para el tipo de análisis I. Se utiliza la Tabla 2.	No aplica
	2. Rampa de ascenso. Secuencia de pasos: 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6			Usar el equivalente de camión de la Tabla 18				
	3. Rampa de descenso. Secuencia de pasos: 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6			Usar el equivalente de camión de la Tabla 19.				
II. Análisis de planeación	1. Tramo genérico. Secuencia de pasos: 1 - 2 - 3 - 7			Usar el equivalente de camión de la Tabla 17.		No aplica	No aplica	Se obtiene el número de carriles a través de un proceso iterativo. La tasa de flujo máxima correspondiente al Nivel de Servicio deseado se obtiene de la Tabla 6.
	2. Rampa de ascenso. Secuencia de pasos: 1 - 2 - 3 - 7			Usar el equivalente de camión de la Tabla 18.				
	3. Rampa de descenso. Secuencia de pasos: 1 - 2 - 3 - 7			Usar el equivalente de camión de la Tabla 19.				
III. Análisis detallado (simulación)	1. Procedimiento único. Ver manual de aplicación del modelo SIMCAR.			Los equivalentes están implícitos en el modelo.	La modelación permite obtener velocidades.	El proceso de modelación permite obtener densidades.	El proceso de modelación permite obtener Niveles de Servicio.	Se puede simular variando la cantidad de carriles.

Paso 1: Proceso de sectorización, definición del tipo de aplicación y preparación de información necesaria para usar el manual.
 Paso 2: Determinación de la curva flujo-velocidad característica del sector de análisis.
 Paso 3: Cálculo del flujo vehicular.

Paso 4: Determinación de la velocidad de operación en el sector de análisis.
 Paso 5: Cálculo de la densidad.
 Paso 6: Determinación del Nivel de Servicio.
 Paso 7: Determinación del número de carriles.

2.2 Paso 1: proceso de sectorización, definición del tipo de aplicación y preparación de la información para usar el manual

Se detallan las actividades a realizar en el primer paso del procedimiento.

2.2.1 Proceso de sectorización

La aplicación de la metodología se debe realizar a sectores homogéneos del tramo en estudio, por lo que es necesario realizar un proceso de sectorización. El tramo de análisis lo constituye la cadena de sectores homogéneos, cada uno de la mayor longitud posible, que presentan regularidad en los siguientes aspectos:

- Patrón de velocidad de los camiones
- Tortuosidad de la vía
- Magnitud de la pendiente de las tangentes verticales
- Ancho de carril
- Existencia o no de separador
- Distancias libres laterales
- Tránsito

El procedimiento para identificar los sectores de análisis donde las características de la vía son uniformes se puede realizar de dos formas no excluyentes:

- En la oficina, consultando planos topográficos de la carretera en estudio.
- En la vía, mediante consultas, inspección ocular y toma de datos.

Para llevar a cabo la sectorización se debe obtener la información de las características físicas de la carretera con mediciones sencillas y evaluaciones de campo. En algunos casos puede ser necesario efectuar posproceso en oficina, con la ayuda de programas de computador.

Si no es posible realizar mediciones y evaluaciones de campo, por sencillas que estas sean, el analista puede recurrir al análisis de imágenes satelitales existentes, y con ellas establecer los parámetros necesarios.

Si el análisis corresponde a la toma de decisiones para la planificación de una carretera por construir, la información se puede obtener de los prediseños elaborados en la fase uno del proyecto (Prefactibilidad).

2.2.2 Definición del tipo de aplicación

El tipo de aplicación a usar depende fundamentalmente del tipo de terreno.

2.2.2.1 Tramos genéricos

Una aplicación de tramo genérico se da cuando el sector presenta rampas combinadas de ascenso y descenso; los vehículos incrementan su energía potencial en los descensos y la aprovechan para emprender el ascenso. Se dan tres tipologías genéricas:

■ Tipo 1. Plano

Es un sector en el que los camiones, tanto en un sentido como en el otro, pueden viajar a velocidades similares a las de los automóviles. Su alineamiento en perfil lo constituyen tangentes verticales con pendientes combinadas o sostenidas menores o iguales a 3.0 %.

■ Tipo 2. Ondulado

Es un sector con tangentes verticales cortas alternadas de ascenso y descenso en el que los camiones, tanto en un sentido como en el otro, pueden viajar a velocidades mayores que su velocidad de régimen, ya que ganan velocidad en las tangentes descendentes y la pierden parcialmente en las ascendentes. El alineamiento en perfil presenta las siguientes características:

- Sucesión de tangentes verticales alternando el signo (+/- o -/+).
- Tangentes verticales con longitud menor o igual a quinientos metros.

- Pendiente media (P_m) entre el 3 % y el 5 %. Este parámetro representa el promedio ponderado con respecto a la longitud de cada tangente vertical del sector, en valor absoluto.

- Tipo 3. Montañoso

Es un sector con tangentes verticales cortas alternadas de ascenso y descenso en el que los camiones, tanto en un sentido como en el otro, pueden viajar a velocidades mayores que su velocidad de régimen, ya que ganan velocidad en las tangentes descendentes y la pierden parcialmente en las ascendentes. Su alineamiento en perfil presenta las siguientes características:

- Sucesión de tangentes verticales alternando el signo (+/- ó -/+).
- Tangentes verticales con longitud menor o igual a quinientos metros.
- Pendiente media (P_m) mayor al 5 %. Este parámetro representa el promedio ponderado con respecto a la longitud de cada tangente vertical del sector, en valor absoluto.

2.2.2.2 Rampas de ascenso y descenso

Una aplicación de rampa de ascenso o de descenso se presenta cuando el alineamiento vertical incluye tangentes verticales con pendientes sostenidas y con longitudes superiores a 500 metros.

2.3 Información necesaria para usar el manual

Para la aplicación del manual se requiere información de campo y/o de oficina, que se agrupa en dos categorías:

- Categoría 1. Información relacionada con la geometría.
- Categoría 2. Información relacionada con la demanda de tránsito.

2.3.1 Variables relacionadas con la geometría

Para realizar los ajustes a la velocidad a flujo libre característica del sector en estudio, y para cada sentido de circulación, se debe determinar:

- Ancho de carril.
- Tipo y ancho del separador.
- Ancho de bermas.
- Densidad de accesos.

a. Ancho de carril

Se debe medir el ancho de los carriles en diferentes secciones del sector, verificando la homogeneidad de esta dimensión.

b. Tipo y ancho del separador

Se determina la existencia o no del separador en la carretera y su ancho. Las características del separador deben ser homogéneas a lo largo del sector de análisis.

c. Ancho de bermas

Se debe medir el ancho de las bermas en cada sentido de análisis, verificando su homogeneidad.

d. Densidad de accesos

Se deben contar el número de puntos de acceso del lado derecho de la vía. Para ello, se recomienda hacer un recorrido del sector y elaborar un esquema con el inventario de puntos de acceso. Con esta información se calcula la densidad como la relación entre el total de puntos de acceso y la longitud del sector de análisis, en kilómetros.

Se recomienda incluir únicamente los accesos con movimientos importantes a lo largo del día. Una residencia con servicio esporádico no se considera punto de acceso.

2.3.2 Variables relacionadas con el tránsito

Se consideran dos variables.

2.3.2.1 Volumen de tránsito mixto y factor de hora pico (FHP)

Se debe realizar un conteo vehicular en horas de máxima demanda, en períodos de 15 minutos, para obtener el volumen de dicha hora en veh/h (tránsito mixto).

Determinar el factor de hora pico para cada sentido de circulación. Este factor se calcula como la relación entre el volumen mixto en la hora de máxima demanda y el flujo de tránsito correspondiente al volumen de los 15 minutos máximos de esa hora.

2.3.2.2 Información relacionada con los camiones

Para determinar la equivalencia de camiones se requiere la siguiente información:

- Pendiente y longitud de la pendiente en el sector de análisis.
- Porcentaje de camiones.

La información requerida y descrita anteriormente se consigna en la hoja de trabajo No. 1, que se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Hoja de trabajo No. 1.

CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO CARRETERAS MULTICARRIL COLOMBIA 2015			
Carretera:	Popayan Cali		
Proyecto:	k 25+300		
Analista:	CAV	Fecha (dd/mm/año):	06/03/2015
Tipo de análisis:	Operación	NS diseño:	C
VELOCIDAD A FLUJO LIBRE, VL			
Tipo de Velocidad VL:	Velocidad genérica, VG	Valor velocidad genérica, km/h	90.0
Límite de Velocidad (km/h):	80.0		
Valor sugerido de VG (km/h):	90.0		
Ancho de separador (m):	0.00	No de carriles por calzada:	2
Ancho de carril (m):	3.65	Ancho promedio de bermas (m):	2
		No accesos por kilómetro:	4
CALCULO DE VELOCIDAD A FLUJO LIBRE			
VG:	90.0	VL Calculada:	84.2
Corrección ancho de carril, f_c :	0.0	Tomar VL de:	80
Corrección promedio ancho de bermas, f_b :	0.0		
Corrección ancho de separador, f_s :	2.8		
Corrección densidad de accesos, f_A :	3.0		
INFORMACION DE VEHICULOS			
Volumen (veh/h):	2520	FHP:	0.90
Terreno: (Ver instrucciones)	Genérico Ondulado	Información de rampas compuestas	
Porcentaje de Vehículos	EC	Segmento	Longitud (m)
Camiones	20.0	1	6000.0
		2	
		3	
		4	
		5	
		6	
fHW	0.794	Longitud (m):	6000.0
Tipo de conductor:	Frecuente	Pendiente Ponderada (%):	5.0
Flujo vehicular (vp):	1764		
RESULTADOS			
Velocidad (km/h):	73.0		
Densidad(Ades/km/Carril):	24.2		
NIVEL DE SERVICIO: F			
Número de Carriles			

Fuente: Elaboración propia.

2.4. Paso 2: determinación de la curva flujo-velocidad característica del sector de análisis

2.4.1 Determinación de la velocidad a flujo libre del sector de análisis (VL)

La velocidad a flujo libre del sector de análisis (VL) puede ser medida en campo o estimada a partir de un procedimiento analítico.

2.4.1.1 Medición en campo de VL

Es recomendable hacer un estudio de velocidades de campo para determinar la velocidad a flujo libre del sector de análisis. Cuando las condiciones de la carretera sean atípicas o el pavimento se encuentre en malas condiciones este estudio es obligatorio.

Debe medirse velocidad al menos a sesenta vehículos a flujo libre, o lo que indique la estadística para este tipo de estudios. El valor de VL corresponde al percentil 85 de la velocidad.

Cuando VL se obtiene de mediciones de campo, no se aplica ninguna corrección.

2.4.1.2 Estimación de VL

La velocidad a flujo libre puede estimarse analíticamente utilizando la siguiente ecuación:

$$VL = VG - f_C - f_S - f_B - f_A$$

Donde:

VL = velocidad a flujo libre del sector.

VG = velocidad genérica del sector.

f_C = corrección por ancho de carril.

f_S = corrección por ancho de separador.

f_B = corrección por promedio de ancho de bermas.

f_A = corrección por densidad de accesos.

a. Estimación de la velocidad genérica del sector (VG)

El concepto de la velocidad base a flujo libre se ha utilizado en Colombia con el nombre de velocidad genérica (VG). Es la velocidad característica de la carretera teniendo en cuenta el trazado horizontal y vertical bajo un criterio de consistencia geométrica. Los elementos de la sección transversal y el entorno de la vía se consideran en una etapa posterior, aplicando correcciones a la velocidad genérica para obtener la velocidad a flujo libre para las condiciones imperantes en la carretera en estudio.

Teniendo en cuenta las características geométricas se formuló una clasificación de las carreteras multicarril en tres tipos A1, B1 y C1, según lo indicado en la Tabla 10.

Tabla 10. Clasificación de las carreteras multicarril según sus características geométricas.

Clasificación	Características geométricas
Tipo A1	Velocidad de diseño: 100 a 120 km/h Radio mínimo: 400 m Pendiente máxima: 5 % Ancho de calzada: 7.30 m Ancho de berma izquierda: 1.00 m Ancho de berma derecha: 2.50 m
Tipo B1	Velocidad de diseño: 80 a 100 km/h Radio mínimo: 230 m Pendiente máxima: 6 % Ancho de calzada: 7.30 m Ancho de berma izquierda: 0.50 m Ancho de berma derecha: 1.80 m
Tipo C1	Velocidad de diseño: 60 a 80 km/h Radio mínimo: 70 m Pendiente máxima: 8 % Ancho de calzada: 7.00 m Ancho de berma izquierda: 0.50 m Ancho de berma derecha: 1.50 m

Fuente: elaboración propia.

Incorporando a las características geométricas aspectos como zona libre lateral, control de accesos y presencia de peatones, resultan cinco tipos de carreteras multicarril a los que se asigna una velocidad genérica, siguiendo criterios de consistencia geométrica. En la Tabla 11 se consignan las características de cada tipología y la velocidad genérica asignada.

Tabla 11. Velocidad genérica por tipo de carretera.

Tipo de carretera	Velocidad genérica (km/h)	
	Con separador	Sin separador
Multicarril, con características geométricas de vía tipo A1, zona despejada de 9 m o con elementos de contención vehicular, accesos controlados, sin peatones.	120	No aplica
Multicarril, con características geométricas de vía tipo B1, control parcial de accesos, sin concentración de peatones.	100	90
Multicarril, con características geométricas de vía tipo B1, sin control de accesos, sin concentración de peatones.	90	80
Multicarril, con características geométricas de vía tipo C1, sin control de accesos, sin peatones frecuentes.	80	70
Multicarril, con características geométricas de vía tipo C1, sin control de accesos, con peatones frecuentes.	70	60

Fuente: elaboración propia.

b. Correcciones a la velocidad genérica

- Corrección por ancho de carril (f_c)

La corrección por ancho de carril se hace con los factores indicados en la Tabla 12.

Tabla 12. Ajuste de la velocidad genérica por efecto del ancho de carril (f_c).

Ancho del carril (m)	Corrección a la velocidad genérica por efecto del ancho del carril (km/h)
3.0	14.8
3.3	2.0
≥ 3.5	0.0

Fuente: elaboración propia.

- Corrección por ancho de separador, (f_s)

La corrección por ancho de separador se realiza con los factores indicados en la Tabla 13.

Tabla 13. Ajuste de la velocidad genérica por efecto del ancho del separador (f_s)

Ancho del separador (m)	Corrección a la velocidad genérica por efecto del ancho de separador (km/h)
0.0	2.80
0.5	1.60
1.0	1.30
1.5	0.90
2.0	0.70
>3.0	0.00

Fuente: elaboración propia.

- Corrección por ancho promedio de bermas (f_b)

La corrección por ancho promedio de bermas se realiza con los factores de la Tabla 14.

Tabla 14. Ajuste de la velocidad genérica por efecto del ancho promedio de bermas (f_B)

Ancho promedio de bermas (m)	Corrección a la velocidad genérica por efecto del ancho promedio de bermas (km/h)
0.0	7.9
0.5	2.5
1.0 – 1.5	1.7
1.8	0.8
≥ 2.0	0.0

Fuente: elaboración propia.

- Corrección por densidad de accesos (f_A)

La corrección por densidad de accesos se realiza con los factores de la Tabla 15.

Tabla 15. Ajuste de la velocidad genérica por efecto del ancho promedio de bermas (f_A)

Densidad de accesos (Puntos/km)	Corrección a la velocidad genérica por efecto de la densidad de accesos (km/h)
5	3.0
10	6.4
15	11.0
≥ 20	17.4

Fuente: elaboración propia.

2.4.1.3. Elección de la curva maestra de referencia

Esta velocidad se debe aproximar a la velocidad a flujo libre de una de las cuatro curvas maestras típicas desarrolladas:

- Tipo 1 – Carretera multicarril, velocidad a flujo libre: 96 km/h.
- Tipo 2 – Carretera multicarril, velocidad a flujo libre: 90 km/h.
- Tipo 3 – Carretera multicarril, velocidad a flujo libre: 80 km/h.
- Tipo 4 – Carretera multicarril, velocidad a flujo libre: 70 km/h.

Se debe seleccionar la velocidad a flujo libre que corresponda a la curva típica más cercana. Si estos cálculos arrojan valores mayores a 96 km/h se deberá escoger una velocidad a flujo libre de 96 km/h. Si el caso es de velocidades libres menores a 70 km/h se deberá seleccionar la velocidad a flujo libre de 70 km/h. La curva maestra de análisis se seleccionará aproximando el valor de la velocidad a flujo libre característica al valor más cercano múltiplo de 10.

Las ecuaciones finales adoptadas para los diferentes tipos de multicarril tiene la forma funcional:

$$v = v_f - a * \left(\frac{v_p}{b} \right)^c : v_p = q_p$$

En donde v es la velocidad a flujo libre y q_p es el flujo de tránsito en vehículos equivalentes por hora, a , b y c son parámetros a estimar. En la Tabla 16 se presentan los coeficientes de las ecuaciones para cada tipo de multicarril estudiada. Se resalta que las curvas no presentan un primer tramo horizontal.

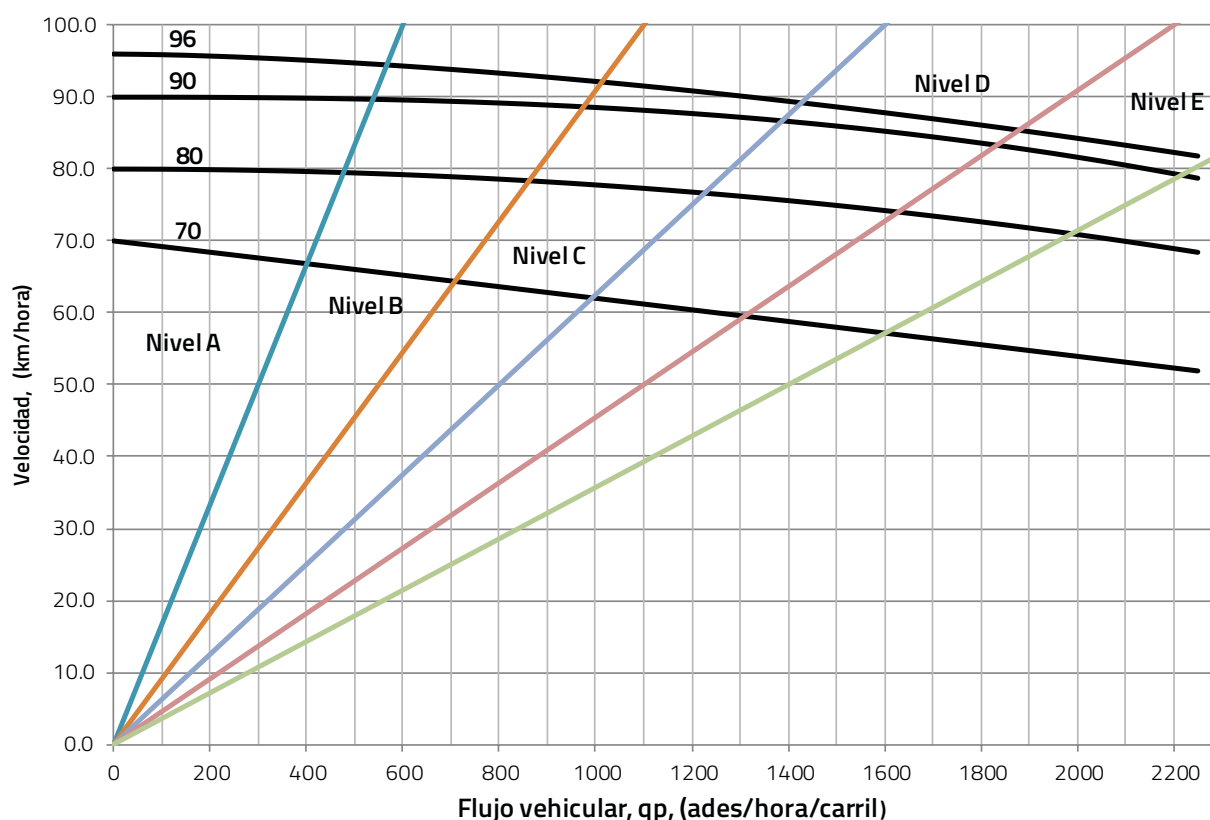
Tabla 16. Coeficientes de las ecuaciones flujo - velocidad. Carreteras multicarril Colombia.

Tipo de curva	v_f	a	b	c
Multicarril tipo 1 96 km/h	96	4.609	1124.526	1.624
Multicarril tipo 1 90 km/h	90	1.040	882.082	2.545
Multicarril tipo 1 80 km/h	80	2.375	1036.550	2.044
Multicarril tipo 1 70 km/h	70	5.497	692.345	1.010

Fuente: elaboración propia.

La gráfica de cada una de las curvas de ajuste seleccionadas por tipo de multicarril se presenta en la Figura 9.

Figura 9. Curvas flujo-velocidad maestras para Colombia.



Fuente: elaboración propia.

2.5 Paso 3: cálculo del flujo vehicular

En donde:

Debe corregirse el volumen de tránsito mixto y tenerse en cuenta el equivalente de camiones.

2.5.1 Corrección del volumen de tránsito mixto

El volumen de tránsito en vehículos mixtos (veh/h/sentido) se debe convertir en flujo vehicular, mediante la siguiente ecuación:

$$q_p = v_p = \frac{V}{FHP * N * f_{HV} * f_p}$$

v_p : flujo de tránsito, en veh/h/carril. (q_p)

V : volumen de tránsito mixto, en veh/h/sentido

FHP : factor de hora pico

N : número de carriles

f_{HV} : factor de corrección por camiones

f_p : factor por conocimiento de la vía

$f_p = 1.00$ (conductores frecuentes)

$f_p = 0.90$ (conductores ocasionales)

El factor de corrección por camiones se calcula con la siguiente expresión:

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_C (E_C - 1)}$$

En donde:

- f_{HV} : factor de corrección por camiones
- P_C : porcentaje de camiones
- E_C : factor de equivalencia de camiones

2.5.2 Equivalente de camiones

Se tienen en cuenta el tipo de terreno y las rampas

2.5.2.1 Tipo de terreno genérico

Cuando la aplicación corresponde a terreno genérico se deben utilizar los equivalentes indicados en la Tabla 17.

Tabla 17. Equivalente de camiones para tipo de terreno genérico.

Tipo de terreno	Equivalente de camión, EC
Plano	1.8
Ondulado	2.3
Montañoso	4.4

Fuente: elaboración propia.

2.5.2.2 Rampa en ascenso

Esta situación corresponde a sectores de análisis con pendientes ascendentes sostenidas. Es posible realizar ponderaciones de pendientes en tramos con rampas continuas en ascenso con longitudes de pendientes menores a 2000 m. Si se supera este límite de longitud se deberá estudiar esa rampa en forma independiente.

Los equivalentes de camiones para rampas en ascenso se presentan en la Tabla 18.

2.5.2.3 Rampas en descenso

Esta situación corresponde a sectores de análisis con pendientes descendentes sostenidas. Es posible realizar ponderaciones de pendientes en tramos con rampas continuas en descenso con longitudes de pendientes menores de 1500 m. Si se supera este límite de longitud se deberá estudiar esa rampa en forma independiente.

Los equivalentes de camiones para rampas en descenso se presentan en la Tabla 19.

Tabla 18. Equivalentes de camión en pendientes ascendentes.

Pendiente (%)	Longitud (m)	Porcentaje de camiones (%)								
		5	10	15	20	25	30	35	40	50
0	Todas	2.8	2.2	2.1	2.1	1.9	1.9	1.9	1.8	1.8
1	500	3.0	2.4	2.2	2.1	2.0	1.9	1.9	1.8	1.8
	1000	2.8	2.5	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	1.9	1.8
	1500	2.8	2.5	2.4	2.2	2.1	2.0	2.0	1.9	1.8
	2000	2.8	2.6	2.4	2.3	2.2	2.0	2.0	1.9	1.8
	2500	2.8	2.6	2.5	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	1.9
	3000	2.8	2.7	2.5	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0	1.9
	3500	2.8	2.7	2.6	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0	1.9
	4000	2.8	2.8	2.6	2.4	2.3	2.1	2.1	2.0	1.9
	5000	2.8	2.8	2.7	2.4	2.3	2.1	2.1	2.0	1.9
	6000	2.8	2.9	2.7	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9
	7000	2.9	2.9	2.7	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9
	8000	3.0	3.0	2.8	2.5	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9
2	500	3.1	2.4	2.3	2.1	2.0	1.9	1.9	1.9	1.8
	1000	3.0	2.4	2.4	2.3	2.1	2.0	2.0	1.9	1.9
	1500	3.2	2.5	2.5	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0	1.9
	2000	3.2	2.6	2.6	2.4	2.2	2.1	2.1	2.0	1.9
	2500	3.3	2.6	2.7	2.5	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0
	3000	3.4	2.7	2.7	2.5	2.3	2.2	2.2	2.1	2.0
	3500	3.4	2.8	2.8	2.6	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0
	4000	3.4	2.9	2.9	2.6	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0
	5000	3.5	3.0	3.0	2.7	2.5	2.3	2.2	2.1	2.0
	6000	3.6	3.1	3.1	2.8	2.5	2.4	2.3	2.2	2.0
	7000	3.7	3.3	3.1	2.8	2.5	2.4	2.3	2.2	2.0
	8000	3.8	3.4	3.2	2.8	2.5	2.4	2.3	2.2	2.0
3	500	3.1	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.9	1.8
	1000	3.2	2.6	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.9
	1500	3.4	2.7	2.6	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9
	2000	3.5	2.8	2.7	2.5	2.3	2.3	2.1	2.0	2.0
	2500	3.6	2.9	2.8	2.6	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0
	3000	3.7	3.1	2.9	2.6	2.5	2.4	2.2	2.1	2.1
	3500	3.8	3.2	3.0	2.7	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1
	4000	3.9	3.3	3.1	2.8	2.6	2.5	2.3	2.2	2.1
	5000	4.1	3.5	3.3	2.9	2.7	2.5	2.4	2.3	2.1
	6000	4.2	3.7	3.4	3.0	2.7	2.6	2.4	2.3	2.2
	7000	4.4	3.8	3.5	3.1	2.8	2.6	2.5	2.3	2.2
	8000	4.5	4.0	3.6	3.1	2.8	2.6	2.5	2.3	2.2

Continuación Tabla 18. Equivalentes de camión en pendientes ascendentes.

Pendiente (%)	Longitud (m)	Porcentaje de camiones (%)								
		5	10	15	20	25	30	35	40	50
4	500	3.1	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.9	1.8
	1000	3.2	2.6	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.9
	1500	3.4	2.7	2.6	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9
	2000	3.5	2.8	2.7	2.5	2.3	2.3	2.1	2.0	2.0
	2500	3.6	2.9	2.8	2.6	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0
	3000	3.7	3.4	3.0	2.8	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2
	3500	3.8	3.6	3.2	2.9	2.7	2.6	2.5	2.4	2.2
	4000	4.0	3.7	3.3	3.0	2.8	2.7	2.5	2.4	2.3
	5000	4.4	4.0	3.5	3.1	2.9	2.8	2.6	2.5	2.3
	6000	4.7	4.2	3.8	3.3	3.1	2.9	2.7	2.6	2.4
	7000	5.0	4.3	3.9	3.4	3.1	2.9	2.8	2.6	2.4
	8000	5.3	4.5	4.1	3.5	3.2	3.0	2.8	2.7	2.4
5	500	3.1	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.9	1.8
	1000	3.2	2.6	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.9
	1500	3.4	2.7	2.6	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9
	2000	3.5	2.8	2.7	2.5	2.3	2.3	2.1	2.0	2.0
	2500	3.6	2.9	2.8	2.6	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0
	3000	3.7	3.4	3.0	2.8	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2
	3500	4.3	3.8	3.5	3.1	3.0	2.7	2.7	2.5	2.4
	4000	4.6	3.9	3.6	3.3	3.1	2.8	2.8	2.6	2.4
	5000	5.1	4.2	3.9	3.5	3.3	3.0	2.9	2.7	2.5
	6000	5.6	4.5	4.1	3.7	3.5	3.1	3.1	2.8	2.6
	7000	6.2	4.8	4.3	3.8	3.6	3.2	3.1	2.9	2.6
	8000	6.8	5.0	4.5	4.0	3.7	3.3	3.2	3.0	2.7
6	500	3.5	2.7	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0	1.9	1.9
	1000	3.5	2.9	2.5	2.4	2.3	2.3	2.1	2.1	2.0
	1500	3.6	3.1	2.7	2.5	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1
	2000	3.9	3.3	2.9	2.7	2.6	2.6	2.4	2.4	2.2
	2500	4.3	3.5	3.2	2.9	2.8	2.7	2.5	2.5	2.3
	3000	4.7	3.7	3.4	3.1	3.0	2.9	2.7	2.6	2.4
	3500	5.0	4.0	3.7	3.3	3.1	3.0	2.8	2.7	2.5
	4000	5.2	4.2	3.9	3.4	3.3	3.2	2.9	2.9	2.6
	5000	5.7	4.7	4.3	3.8	3.5	3.4	3.1	3.0	2.7
	6000	6.2	5.1	4.6	4.0	3.7	3.6	3.3	3.2	2.8
	7000	6.7	5.4	4.9	4.2	3.9	3.7	3.4	3.3	2.9
	8000	7.1	5.6	5.1	4.4	4.0	3.8	3.5	3.3	2.9

Continuación Tabla 18. Equivalentes de camión en pendientes ascendentes.

Pendiente (%)	Longitud (m)	Porcentaje de camiones (%)								
		5	10	15	20	25	30	35	40	50
7	500	3.5	2.7	2.5	2.4	2.2	2.2	2.1	2.0	1.9
	1000	3.6	3.0	2.8	2.6	2.4	2.4	2.2	2.2	2.0
	1500	4.0	3.3	3.0	2.8	2.6	2.6	2.4	2.3	2.2
	2000	4.4	3.6	3.3	3.1	2.8	2.8	2.5	2.5	2.3
	2500	4.9	4.0	3.6	3.3	3.0	3.0	2.7	2.6	2.5
	3000	5.3	4.3	3.9	3.6	3.2	3.2	2.9	2.8	2.6
	3500	5.8	4.7	4.2	3.8	3.4	3.3	3.0	2.9	2.7
	4000	6.2	5.0	4.4	4.0	3.6	3.5	3.2	3.1	2.9
	5000	6.9	5.6	5.0	4.4	4.0	3.8	3.5	3.4	3.1
	6000	7.4	6.1	5.4	4.7	4.2	4.0	3.7	3.5	3.2
	7000	7.9	6.5	5.7	5.0	4.4	4.1	3.8	3.7	3.3
	8000	8.5	6.9	6.0	5.1	4.5	4.3	3.9	3.7	3.4
8	500	3.3	3.1	2.8	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9
	1000	3.6	3.5	3.0	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1
	1500	4.2	3.8	3.3	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3
	2000	4.8	4.1	3.5	3.0	2.9	2.8	2.8	2.6	2.5
	2500	5.4	4.4	3.8	3.2	3.1	3.1	3.0	2.8	2.7
	3000	6.0	4.8	4.2	3.5	3.4	3.4	3.3	3.0	2.8
	3500	6.6	5.2	4.6	3.8	3.7	3.6	3.5	3.3	3.0
	4000	7.2	5.6	4.9	4.1	4.0	3.8	3.7	3.4	3.2
	5000	8.1	6.3	5.6	4.6	4.4	4.2	4.1	3.7	3.4
	6000	8.7	6.9	6.0	4.9	4.7	4.5	4.3	3.9	3.6
	7000	9.2	7.4	6.3	5.2	4.9	4.6	4.4	4.1	3.7
	8000	9.7	7.6	6.5	5.4	4.9	4.8	4.5	4.2	3.7

Fuente: elaboración propia.

Tabla 19. Equivalentes de camión en pendientes descendentes.

Pendiente (%)	Longitud (m)	Porcentaje de camiones (%)							
		5	10	15	20	30	35	40	50
<= -2	500	3.0	2.5	2.4	2.4	2.2	2.1	2.0	1.9
	1000	3.1	2.6	2.5	2.4	2.2	2.1	2.0	1.9
	2000	2.9	2.5	2.4	2.4	2.2	2.0	2.0	1.9
	3000	2.9	2.5	2.3	2.3	2.1	2.0	2.0	1.9
	4000	2.9	2.5	2.3	2.3	2.1	2.0	2.0	1.9
	5000	3.1	2.5	2.3	2.2	2.0	1.9	1.9	1.8
	6000	3.5	3.3	3.2	2.8	2.5	2.5	2.3	2.1
	7000	3.4	3.2	3.2	2.7	2.5	2.5	2.3	2.1
	8000	3.4	3.2	3.1	2.7	2.5	2.4	2.3	2.1
	9000	3.3	3.1	3.1	2.7	2.5	2.4	2.2	2.1
-3	500	3.2	3.0	3.0	2.6	2.8	2.2	2.1	2.0
	1000	3.3	2.6	2.6	2.4	2.2	2.2	2.1	2.0
	2000	3.3	2.6	2.5	2.4	2.2	2.2	2.1	1.9
	3000	3.2	2.6	2.5	2.3	2.2	2.2	2.1	1.9
	4000	3.1	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9
	5000	3.5	2.7	2.4	2.3	2.1	2.0	1.9	1.9
	6000	4.6	4.3	3.8	3.1	2.9	2.8	2.6	2.4
	7000	4.5	4.2	3.7	3.1	2.9	2.7	2.6	2.4
	8000	4.4	4.0	3.6	3.0	2.9	2.7	2.6	2.4
	9000	4.3	3.9	3.5	3.0	2.8	2.7	2.6	2.3
-4	500	3.6	2.8	2.7	2.6	2.3	2.3	2.1	2.0
	1000	3.6	2.9	2.7	2.7	2.3	2.3	2.1	2.0
	2000	3.7	2.9	2.7	2.6	2.3	2.3	2.1	2.0
	3000	3.6	2.9	2.7	2.6	2.3	2.2	2.1	2.0
	4000	3.5	2.8	2.6	2.5	2.2	2.2	2.1	2.0
	5000	3.7	3.0	2.6	2.4	2.1	2.1	2.0	1.9
	6000	5.4	5.0	4.4	3.9	3.3	3.1	2.8	2.6
	7000	5.3	4.8	4.3	3.8	3.3	3.1	2.8	2.6
	8000	5.2	4.6	4.1	3.7	3.2	3.0	2.8	2.6
	9000	5.1	4.4	4.0	3.6	3.1	3.0	2.7	2.5

Continuación Tabla 19. Equivalentes de camión en pendientes descendentes.

Pendiente (%)	Longitud (m)	Porcentaje de camiones (%)							
		5	10	15	20	30	35	40	50
-5	500	3.5	3.2	3.0	2.8	2.5	2.4	2.3	2.1
	1000	3.5	3.2	3.0	2.9	2.5	2.4	2.3	2.1
	2000	3.5	3.2	3.0	2.8	2.5	2.4	2.3	2.1
	3000	3.4	3.1	2.9	2.7	2.4	2.3	2.2	2.1
	4000	3.3	3.0	2.8	2.6	2.4	2.3	2.2	2.0
	5000	3.7	3.1	2.7	2.5	2.2	2.2	2.1	1.9
	6000	6.5	5.3	5.1	4.3	3.6	3.4	3.1	2.8
	7000	6.5	5.1	4.9	4.3	3.6	3.3	3.0	2.7
	8000	6.4	5.0	4.7	4.2	3.5	3.3	3.0	2.7
	9000	6.1	4.8	4.5	4.1	3.4	3.2	2.9	2.6
-6	500	3.7	3.3	3.2	2.9	2.7	2.5	2.4	2.2
	1000	3.7	3.3	3.3	3.0	2.7	2.5	2.4	2.2
	2000	3.6	3.3	3.2	2.9	2.7	2.5	2.4	2.2
	3000	3.5	3.2	3.1	2.8	2.6	2.4	2.4	2.2
	4000	3.5	3.1	3.0	2.7	2.5	2.4	2.3	2.1
	5000	3.9	3.1	2.9	2.6	2.4	2.2	2.2	2.0
	6000	7.6	6.7	5.2	4.9	3.7	3.5	3.2	2.8
	7000	7.2	6.4	5.2	4.9	3.7	3.4	3.2	2.8
	8000	7.1	6.3	5.0	4.7	3.6	3.3	3.2	2.8
	9000	6.8	6.0	4.7	4.5	3.5	3.2	3.1	2.8
-7	500	4.4	3.6	3.4	3.1	2.8	2.6	2.5	2.3
	1000	4.5	3.6	3.4	3.1	2.8	2.6	2.5	2.3
	2000	4.4	3.6	3.3	3.0	2.7	2.6	2.4	2.3
	3000	4.2	3.4	3.2	2.9	2.7	2.5	2.4	2.2
	4000	4.0	3.4	3.1	2.8	2.6	2.5	2.3	2.2
	5000	4.3	3.5	3.0	2.7	2.4	2.3	2.2	2.1
	6000	8.8	7.2	5.2	4.9	3.9	3.6	3.4	3.1
	7000	8.6	6.9	5.1	4.7	4.0	3.6	3.5	3.1
	8000	8.4	6.7	4.9	4.6	3.9	3.6	3.4	3.0
	9000	8.0	6.4	4.7	4.4	3.7	3.4	3.3	3.0

Continuación Tabla 19. Equivalentes de camión en pendientes descendentes

Pendiente (%)	Longitud (m)	Porcentaje de camiones (%)							
		5	10	15	20	30	35	40	50
-8	500	4.2	3.7	3.7	3.3	2.9	2.7	2.6	2.4
	1000	4.3	3.8	3.7	3.2	2.9	2.7	2.6	2.4
	2000	4.2	3.7	3.6	3.2	2.9	2.7	2.6	2.3
	3000	4.1	3.5	3.5	3.1	2.8	2.6	2.5	2.3
	4000	3.9	3.4	3.3	3.0	2.7	2.5	2.5	2.3
	5000	4.4	3.5	3.1	2.8	2.5	2.4	2.3	2.1
	6000	9.8	7.1	5.7	4.9	4.0	3.8	3.6	3.3
	7000	9.6	6.8	5.5	4.8	4.0	3.7	3.6	3.2
	8000	9.4	6.6	5.3	4.7	4.0	3.7	3.6	3.2
	9000	9.0	6.3	5.1	4.5	3.8	3.6	3.4	3.1

Fuente: elaboración propia

2.5.3. Consideraciones para análisis de planeación

Todo lo expresado en este numeral aplica para análisis de operación y de planeación. La única diferencia está en la ecuación para obtener el flujo de tránsito, que para el caso de planeación es:

$$q_p = v_p = \frac{V}{FHP * f_{HV} * f_p}$$

2.6. Paso 4: determinación de la velocidad de operación en el sector de análisis (V)

La velocidad de operación en el sector de análisis V_i se determina con la curva maestra de análisis seleccionada en el paso 2 y el flujo de tránsito calculado en el paso 3. Esta velocidad representa las condiciones reales de la carretera.

2.7. Paso 5: cálculo de la densidad

La densidad del sector de análisis, en veh/km/carril, se determina con la expresión:

$$D = \frac{v_p}{V}; v_p = q_p$$

En donde:

D : Densidad (veh/km/carril)

q_p : Flujo de tránsito (ades/h/carril)

V : Velocidad de operación (km/h)

2.8 Paso 6: Determinación del Nivel de Servicio

En la Tabla 20, con la densidad calculada en el paso 5 y el tipo de multicarril hallada en el paso 2, se obtiene el Nivel de Servicio de la vía.

Tabla 20. Niveles de Servicio para carreteras multicarril en Colombia.

Nivel de Servicio	Multicarril tipo 1 (96 km/h) y tipo 2 (90km/h)	Multicarril tipo 3 (80 km/h)	Multicarril tipo 4 (70 km/h)
A	<= 6	<= 7	<= 8
B	> 6 - 11	> 7 - 12	> 8 - 15
C	>11 - 16	>12 - 18	>15 - 23
D	> 16 - 22	> 18 - 25	> 23 - 32
E	> 22 - 28	> 25 - 31	> 32 - 40
F	> 28	> 31	> 40

Fuente: elaboración propia

2.9. Paso 7: cálculo del número de carriles (planeación)

El análisis de planeación comprende los siguientes pasos previos:

- Paso 1: proceso de sectorización, definición del tipo de aplicación y preparación de información necesaria para usar el manual.
- Paso 2: determinación de la curva flujo-velocidad característica del sector de análisis.

- Paso 3: cálculo del flujo vehicular.

El siguiente paso es determinar el número de carriles que requiere la carretera para ofrecer el Nivel de Servicio deseado.

Para ello se obtiene la Tasa de flujo máxima que puede alcanzar una carretera multicarril en el Nivel de Servicio deseado. Este flujo se obtiene de la Tabla 21, para lo que se necesita el Nivel de Servicio deseado y el tipo de multicarril determinado en el paso 2.

Tabla 21. Tasas de flujo máximas por Nivel de Servicio (TFM_i).

Nivel de Servicio	Tipo de multicarril VL			
	Tipo 4: 70 Km/h	Tipo 3: 80 Km/h	Tipo 2: 90 Km/h	Tipo 1: 96 Km/h
A	525	540	550	560
B	945	970	990	1010
C	1365	1400	1430	1460
D	1785	1830	1870	1910
E	2100	2150	2200	2250

Fuente: elaboración propia.

El número de carriles se calcula con la ecuación:

$$N = \frac{v_p}{TFM_i} ; v_p = q_p$$

El encontrar el número de carriles requiere de un proceso iterativo, dado que N generalmente no es número entero. Para ello, se recalcula el Nivel de Servicio para los valores por defecto y exceso obtenidos para N. Este proceso iterativo se realiza aplicando el procedimiento de análisis de operación o con la ayuda del programa de computador diseñado para aplicar el manual.

3. Ejemplos de aplicación

3.1 Ejemplo de aplicación N° 1 – análisis de operación

Se tiene una carretera multicarril dividida de dos carriles por sentido y con una longitud de 5.2 kilómetros, de los cuales 2.2 kilómetros se desarrollan en terreno ondulado y 3.0 kilómetros tienen una pendiente del 4 %. El ancho de separador es de 1.5 metros, el ancho de cada carril es de 3.3 metros, el ancho de la berma derecha es de 2.0 metros y la berma izquierda de 1.0 metros. El número de accesos laterales es de 6 puntos/km por sentido.

El volumen de tránsito es de 1850 veh/hora/sentido, el factor de la hora pico es de 0.90 y el porcentaje de camiones es del 30 %. Se desea determinar el Nivel de Servicio ofrecido por la vía.

Una revisión de la metodología contemplada en la Tabla 9 permite establecer los pasos necesarios para determinar el Nivel de Servicio.

- Paso 1: proceso de sectorización, definición del tipo de aplicación y preparación de información necesaria para aplicar el manual.
- Paso 2: determinación de la curva flujo–velocidad característica del sector de análisis.
- Paso 3: cálculo del flujo vehicular.
- Paso 4: determinación de la velocidad de operación en el sector de análisis.
- Paso 5: cálculo de la densidad.
- Paso 6: determinación del Nivel de Servicio.

3.1.1 Paso 1: proceso de sectorización, definición del tipo de aplicación y preparación de información necesaria para aplicar el manual.

3.1.1.1 Proceso de sectorización

El manual se aplica a sectores homogéneos desde el punto de vista de geometría y tránsito. En el ejemplo se identifican dos sectores homogéneos: un primer sector en terreno ondulado y un segundo en pendiente sostenida del 4 %.

3.1.1.2 Definición del tipo de aplicación

Para el primer sector se define una aplicación de operación y terreno genérico, ondulado.

Para el segundo sector se definen dos aplicaciones de operación: pendiente en ascenso del 4 % y longitud de 3000 metros y pendiente en descenso del 4 % y longitud de 3000 metros.

En resumen, se deben realizar tres aplicaciones de operación:

- Aplicación 1: terreno genérico, ondulado.
- Aplicación 2: pendiente ascenso.
- Aplicación 3: pendiente descendente.

3.1.1.3 Preparación de información necesaria para aplicar el manual

El analista deberá preparar la información de geometría y tránsito.

a. Información de geometría

En la Tabla 22 se consigna la información de geometría del Ejemplo de aplicación No. 1.

Tabla 22. Información de geometría: Ejemplo de aplicación No 1.

Variable	Valor
Ancho de separador (m)	1.5
Ancho de carril (m)	3.3
Número de carriles	2
Promedio de bermas (m)	1.5
Densidad de accesos, puntos/km	6
Tipo de terreno	Aplicación 1: genérico, ondulado. Aplicación 2: pendiente en ascenso, $p=4\%$, $L=3000$ m. Aplicación 3: pendiente en descenso, $p=4\%$, $L=3000$ m.

Fuente: elaboración propia.

b. Información de tránsito

La información de tránsito se presenta en la Tabla 23.

Tabla 23. Información de tránsito: ejemplo de aplicación No. 1.

Variable	Valor
Volumen de tránsito, veh/h/sentido	1850
Factor Hora Pico (FHP)	0.90
Porcentaje de camiones (%)	30.0
Tipo de conductor	Frecuente

Fuente: elaboración propia.

3.1.2 Paso 2: determinación de la curva flujo-velocidad característica del sector de análisis**3.1.2.1 Determinación de la velocidad a flujo libre del sector de análisis (VL)**

La velocidad a flujo libre característica puede ser estimada analíticamente utilizando la siguiente ecuación:

$$VL = VG - f_C - f_S - f_B - f_A$$

Donde:

VL : velocidad a flujo libre del sector.

VG : velocidad genérica del sector.

f_C : corrección por ancho de carril.

f_S : corrección por ancho de separador.

f_B : corrección por promedio de ancho de bermas.

f_A : corrección por densidad de accesos.

a. Estimación de la velocidad genérica del sector de análisis (VG)

Se debe seleccionar una velocidad característica o genérica de la vía, para ello se analizan los tipos de vía incluidos en las Tablas 10 y 11. Con las especificaciones geométricas de los alineamientos horizontales y verticales, se define la vía como tipo B1 (Ver Tabla 10). Con las características de operación y la existencia de separador se asigna una velocidad genérica, VG , de 90 km/h (Ver Tabla 11).

b. Correcciones a la velocidad genérica

Se obtienen las correcciones de:

- Ancho de carril: $f_C = 3.00$ m. (Tabla 12 con ancho de carril de 3.3 m).
- Ancho de separador: $f_S = 0.90$ m. (Tabla 13, con ancho de separador de 1.5 m).
- Promedio de bermas: $f_B = 1.70$ m. (Tabla 14, con promedio de bermas de 1.5 m).

- Densidad de accesos: FA = 3.70 m (Tabla 15, con 6 puntos/km, interpolados linealmente).

$$VL = 90.00 - 3.00 - 0.90 - 1.70 - 3.70$$

$$VL = 81.7 \text{ km/h}$$

3.1.2.2 Selección de la curva maestra de referencia

La velocidad VL de 81.7 km/h se debe aproximar a la velocidad a flujo libre de una de las cuatro curvas maestras típicas desarrolladas:

- Tipo 1: Carretera multicarril, velocidad a flujo libre: 96 km/h.
- Tipo 2: Carretera multicarril, velocidad a flujo libre: 90 km/h.
- Tipo 3: Carretera multicarril, velocidad a flujo libre: 80 km/h.

- Tipo 4: Carretera multicarril, velocidad a flujo libre: 70 km/h.

Se selecciona la curva maestra tipo 3, velocidad a flujo libre de 80 km/h.

3.1.3. Paso 3: Cálculo del flujo vehicular.

El volumen de tránsito en vehículos mixtos veh/h/ sentido se debe convertir en flujo vehicular. Este cálculo se realiza utilizando la ecuación:

$$q_p = v_p = \frac{V}{FHP * N * f_{HV} * f_p}$$

El factor de corrección por camiones (f_{HV}) se calcula así:

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_c (E_c - 1)}$$

El equivalente de camiones y el factor de corrección de camiones para cada aplicación en estudio se presentan en la Tabla 24.

Tabla 24 Cálculo del flujo vehicular: Ejemplo de aplicación No. 1.

Aplicación	Descripción	Equivalente, de camión (EC)	f_{HV}	Flujo vehicular (q_p)
Aplicación 1	Tramo genérico, ondulado.	2.1 (Tabla 17)	0.719	1429
Aplicación 2	Pendiente en ascenso del 4 % y longitud de 3000 m y 30% de camiones.	2.5 (Tabla 18)	0.690	1490
Aplicación 3	Pendiente en descenso del 4 % y longitud de 3000 m y 30 % de camiones.	2.3 (Tabla 19)	0.719	1429

Fuente: elaboración propia.

3.1.4. Paso 4: determinación de la velocidad de operación en el sector de análisis.

En el paso 2 se selecciona la curva maestra tipo 3, velocidad a flujo libre de 80 km/h. La ecuación del flujo-velocidad tiene la forma funcional:

$$v = v_f - a * \left(\frac{q_p}{b} \right)^c, v_p = q_p$$

Los parámetros para la curva maestra se obtienen de la Tabla 16, resultando la ecuación:

$$v = 80 - 2.375 * \left(\frac{v_p}{1036.55} \right)^{2.044}$$

Las velocidades de operación obtenidas para cada aplicación se presentan en la Tabla 25.

Tabla 25. Cálculo de la velocidad de operación: Ejemplo de aplicación No. 1.

Aplicación	Descripción	Flujo vehicular, (v_p, q_p)	Velocidad de operación (v) km/h
Aplicación 1	Tramo genérico, ondulado.	1429	75.4
Aplicación 2	Pendiente en ascenso del 4% y longitud de 3000 m y 30% de camiones.	1490	75.0
Aplicación 3	Pendiente en descenso del 4% y longitud de 3000 m y 30% de camiones.	1429	75.4

Fuente: elaboración propia.

3.1.5. Paso 5: cálculo de la densidad

La densidad del sector de análisis, en veh/km/carril, se determina con la expresión:

$$D = \frac{v_p}{v}$$

Los resultados obtenidos para la densidad en cada una de las aplicaciones se presentan en la Tabla 26.

Tabla 26. Cálculo de la densidad: Ejemplo de aplicación No.1.

Aplicación	Descripción	Flujo vehicular (v_p, q_p)	Velocidad de operación (v) km/h	Densidad (veh/km/carril)
Aplicación 1	Tramo genérico, ondulado.	1429	75.4	18.9
Aplicación 2	Pendiente en ascenso del 4 % y longitud de 3000 m y 30 % de camiones.	1490	75.0	19.9
Aplicación 3	Pendiente en descenso del 4 % y longitud de 3000 m y 30 % de camiones.	1429	75.4	18.9

Fuente: elaboración propia.

3.1.6. Paso 6: determinación del Nivel de Servicio

Para la determinación del Nivel de Servicio se utiliza como variable de efectividad la densidad, cuyos cálculos, para cada una de las aplicaciones del ejemplo, se presentan en la Tabla 26. Con estos valores de densidad y la curva maestra tipo 3, 80 km/h, determinada en el paso 2, se determina el Nivel de Servicio ofrecido en la vía. En la Tabla 27 se presenta los Niveles de Servicio ofrecidos en la vía en las tres aplicaciones estudiadas.

Tabla 27. Determinación del Nivel de Servicio ofrecido: Ejemplo de aplicación No. 1.

Aplicación	Descripción	Densidad (veh/km/carril)	Nivel de Servicio
Aplicación 1	Tramo genérico, ondulado.	18.9	D
Aplicación 2	Pendiente en ascenso del 4 % y longitud de 3000 m y 30 % de camiones.	19.9	D
Aplicación 3	Pendiente en descenso del 4 % y longitud de 3000 m y 30 % de camiones.	18.9	D

Fuente: elaboración propia.

3.2 Ejemplo de aplicación No. 2: Análisis de planeación

Se está proyectando una carretera multicarril y de su estudio de prefactibilidad se ha obtenido la siguiente información:

- Velocidad de diseño de 80 km/h.
- Se considera que la vía tenga un separador de 0.5 metros de ancho, con bermas de 1.4 metro a la derecha y 1.00 metros a la izquierda.

- Los anchos de carril de 3.60 metros y la densidad de accesos es de 5 puntos por kilómetro y por sentido.
- El tramo de análisis tiene una longitud de ocho kilómetros, de los cuales tres kilómetros son planos y los 5.0 kilómetros restantes se desarrollan en pendiente de 4.5 %.
- El volumen de tránsito es de 2300 veh/h/sentido, el factor de hora pico (FHP) es de 0.90. El porcentaje de camiones es del 15 %.

Se solicita determinar el número de carriles que debe tener la carretera multicarril por sentido de circulación para ofrecer un Nivel de Servicio D.

Una revisión de la metodología contemplada en la Tabla 9 permite establecer los pasos necesarios para determinar el Nivel de Servicio.

- Paso 1: proceso de sectorización, definición del tipo de aplicación y preparación de información necesaria para aplicar el manual.
- Paso 2: determinación de la curva flujo-velocidad característica del sector de análisis.
- Paso 3: cálculo del flujo vehicular.
- Paso 7: determinación del número de carriles.

3.2.1 Paso 1: proceso de sectorización, definición del tipo de aplicación y preparación de información necesaria para aplicar el manual

3.2.1.1 Proceso de sectorización

El manual se aplica a sectores homogéneos desde el punto de vista de geometría y tránsito. En el ejemplo se identifican dos sectores homogéneos: un primer sector en terreno plano y un segundo sector en pendiente sostenida del 4.5 %.

3.2.1.2 Definición del tipo de aplicación

Para el primer sector se define una aplicación de planeación y terreno genérico, plano.

Para el segundo sector se definen dos aplicaciones de planeación: pendiente en ascenso del 4.5 % y longitud de 5000 metros y pendiente en descenso del 4.5 % y longitud de 5000 metros (para el otro sentido de circulación).

En resumen, se deben realizar tres aplicaciones de planeación:

- Aplicación 1: terreno genérico, plano.
- Aplicación 2: pendiente ascenso.
- Aplicación 3: pendiente descendente.

3.2.1.3 Preparación de información necesaria para aplicar el manual

El analista deberá preparar la información de geometría y de tránsito.

a. Información de geometría

En la Tabla 28 se consigna la información de geometría del Ejemplo de aplicación No. 2.

Tabla 28. Información de geometría: Ejemplo de aplicación No. 2.

Variable	Valor
Ancho de separador (m)	0.5
Ancho de carril (m)	3.6
Promedio de bermas (m)	1.2
Densidad de accesos (puntos/km)	5
Tipo de terreno	Aplicación 1: Genérico, plano. Aplicación 2: Pendiente en ascenso, p= 4.5%, L= 5000 m. Aplicación 3: Pendiente en descenso, p= 4.5%, L= 5000 m.

Fuente: elaboración propia.

b. Información de tránsito

La información de tránsito se presenta en la Tabla 29.

Tabla 29. Información de tránsito: ejemplo de aplicación No. 2.

Variable	Valor
Volumen de tránsito (veh/h/ sentido)	2300
Factor Hora Pico (FHP)	0.90
Porcentaje de camiones (%)	15.0
Tipo de conductor	Frecuente

Fuente: elaboración propia.

3.2.2 Paso 2: determinación de la curva flujo-velocidad característica del sector de análisis

3.2.2.1 Determinación de la velocidad a flujo libre del sector de análisis (VL)

La velocidad a flujo libre característica puede ser estimada analíticamente utilizando la siguiente ecuación:

$$VL = VG - f_C - f_S - f_B - f_A$$

Donde:

VL : velocidad a flujo libre del sector.

VG : velocidad genérica del sector.

f_C : corrección por ancho de carril.

f_S : corrección por ancho de separador.

f_B : corrección por promedio de ancho de bermas.

f_A : corrección por densidad de accesos.

a. Estimación de la velocidad genérica del sector de análisis (VG)

Se debe seleccionar una velocidad característica o genérica de la vía, que se puede asociar con su velocidad de diseño de 80 km/h.

b. Correcciones a la velocidad genérica

Se obtienen las correcciones de:

- Ancho de carril: $F_c = 0.00$ (Tabla 12 con ancho de carril de 3.6 m).
- Ancho de separador: $F_s = 1.60$ (Tabla 13 con ancho de separador de 0.5 m).
- Promedio de bermas: $F_b = 1.70$ (Tabla 14 con promedio de bermas de 1.2 m).
- Densidad de accesos: $F_A = 3.00$ (Tabla 15 con 5 puntos/km/sentido).

$$VL = 80.00 - 0.00 - 1.60 - 1.70 - 3.00$$

$$VL = 73.7 \text{ km/h}$$

3.2.2.2. Selección de la curva maestra de referencia

La velocidad VL de 73.7 se debe aproximar a la velocidad a flujo libre de una de las cuatro curvas maestras típicas desarrolladas:

- Tipo 1 – Carretera multicarril, velocidad a flujo libre: 96 km/h.

- Tipo 2 – Carretera multicarril, velocidad a flujo libre: 90 km/h.

- Tipo 3 – Carretera multicarril, velocidad a flujo libre: 80 km/h.

- Tipo 4 – Carretera multicarril, velocidad a flujo libre: 70 km/h.

Se selecciona la curva maestra tipo 4, velocidad a flujo libre de 70 km/h.

3.2.3. Paso 3: cálculo del flujo vehicular.

El volumen de tránsito en vehículos mixtos veh/h/sentido se debe convertir en flujo vehicular. Este cálculo se realiza utilizando la ecuación:

$$q_p = v_p = \frac{V}{FHP * f_{HV} * f_p}$$

El factor de corrección por camiones (f_{HV}) se calcula así:

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_C (E_C - 1)}$$

El equivalente de camiones y el factor de corrección de camiones para cada aplicación en estudio se presentan en la Tabla 30.

Tabla 30. Cálculo del flujo vehicular: Ejemplo de aplicación No. 2.

Aplicación	Descripción	Equivalente de camión, EC	f_{HV}	Flujo vehicular (v_p, q_p)
Aplicación 1	Tramo genérico, plano	1.8 (Tabla 17)	0.893	2862
Aplicación 2	Pendiente en ascenso del 4.5 % y longitud de 5000 m y 15 % de camiones	3.7 (Tabla 18)	0.712	3592
Aplicación 3	Pendiente en descenso del 4.5 % y longitud de 5000 m y 15 % de camiones	2.65 (Tabla 19)	0.802	3188

Fuente: elaboración propia.

3.2.4 Paso 7: determinación del número de carriles

El último paso es el de determinar el número de carriles de la carretera multicarril para ofrecer el Nivel de Servicio deseado. El número de carriles se calcula con la ecuación:

$$N = \frac{v_p}{TFM_i}$$

Donde:

N : Número de carriles

v_p : Flujo vehicular, cálculo realizado en la Tabla 30.

TFM_i : Tasa de flujo máxima para el Nivel de Servicio deseado. Este valor se determina en la Tabla 21, con la curva maestra, para el ejemplo Tipo 4 (70km/h) y el Nivel de Servicio deseado D. El valor es de 1785.

En la Tabla 31 se presentan los resultados obtenidos, número de carriles calculado y número de carriles seleccionado.

Tabla 31. Cálculo del número de carriles. Ejemplo de aplicación No. 2.

Aplicación	Descripción	Flujo vehicular (v_p, q_p)	Tasa de flujo máxima (TFM_i)	Número de carriles calculado (N)	Número de carriles adoptado
Aplicación 1	Tramo genérico, plano	2862	1785	1.6	2
Aplicación 2	Pendiente en ascenso del 4.5 % y longitud de 5000 m y 15 % de camiones	3592		2.0	2
Aplicación 3	Pendiente en descenso del 4.5 % y longitud de 5000 m y 15 % de camiones	3188		1.8	2

Fuente elaboración propia.

Es conveniente determinar el Nivel de Servicio ofrecido por la vía con el número de carriles seleccionado. Para ello se realizan los cálculos respectivos de la forma señalada en el Ejemplo 1. En la Tabla 32 se presentan los resultados obtenidos. Se recuerda que la curva maestra flujo-velocidad corresponde a la tipo 4 (70 km/h) y el número de carriles de 2.

Tabla 32. Chequeo final Nivel de Servicio ofrecido: Ejemplo de aplicación No. 2.

Aplicación	Descripción	Equivalente de camión (EC)	f_{HV}	Flujo vehicular (v_p)	Velocidad (V)	Densidad (D)	NS
Aplicación 1	Tramo genérico, plano	1.80	0.893	1431	58.6	24.4	D
Aplicación 2	Pendiente en ascenso del 4.5 % y longitud de 5000 m y 15 % de camiones	3.70	0.712	1795	55.6	32.3	D
Aplicación 3	Pendiente en descenso del 4.5 % y longitud de 5000 m y 15 % de camiones	2.65	0.802	1594	57.2	27.8	D

Fuente: elaboración propia.

4. Manual de uso del programa de computador

4.1 Presentación general

Teniendo como marco general lo descrito en la parte 2 del manual se ha preparado un programa de computador con el método para realizar las aplicaciones

de capacidad y Niveles de Servicio en carreteras multicarril. El programa se ha cifrado en lenguaje Visual Basic para aplicaciones y desarrollado en el entorno de Excel.

La apariencia del formulario con la información requerida y los resultados obtenidos en una aplicación del manual

se presenta en la Figura 10. De una forma más específica, en la Tabla 33 se describen las partes principales o bloques del formulario del programa.

Tabla 33. Partes principales del programa que desarrolla el método del manual.

Bloque	Descripción
A	Identificación general de la aplicación: en esta parte del programa se identifica el sector de análisis, proyecto, fecha y analista.
B	Configuración de la aplicación: se especifica si el análisis es de operación o planeación. Si es de planeación se registra el Nivel de Servicio deseado para determinar el número de carriles.
C	Datos de entrada: se registra la información de la geometría del sector de análisis: ancho de carril, ancho de separador, ancho promedio de bermas, número de puntos de acceso lateral. Además, la información de tránsito: volumen de tránsito, factor de hora pico, porcentaje de camiones.
D	Resultados de las correcciones de la velocidad genérica: en este bloque, el programa calcula y registra las correcciones a la velocidad genérica, por efecto de: ancho de carril, ancho de separador, ancho promedio de bermas y número de puntos de acceso lateral por kilómetro.
E	Configuración del tipo de terreno: en este bloque se define el tipo de aplicación: terreno genérico, pendiente ascenso y pendiente descenso. En caso de aplicaciones de sectores en rampas de ascenso y descenso se pueden especificar subsectores para determinar pendientes ponderadas.
F	Resultados del análisis de operación: se registra la velocidad, densidad y el Nivel de Servicio ofrecido en el sector de análisis.
G	Resultados del análisis de planeación: se registra el número de carriles necesarios para ofrecer un Nivel de Servicio deseado.

Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Apariencia general del formulario del programa.

CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO CARRETERAS MULTICARRIL COLOMBIA 2015				
A	Carretera:	Sector Ejemplo No 1		
	Proyecto:	Programa de Concesiones Viales		
	Analista:	Juan Váldez	Fecha (dd/mm/año):	22/11/2015
		Tipo de análisis	Operación	NS diseño: C
VELOCIDAD A FLUJO LIBRE, VL				
<input checked="" type="checkbox"/> Límite de Velocidad				
Tipo de Velocidad VL:		Velocidad genérica, VG		
Límite de Velocidad (km/h):		80.0		
Valor sugerido de VG (km/h):		90.0		
Ancho de separador (m):		0.00		
Ancho de carril (m):		3.65		
		Valor velocidad genérica, km/h: 90.0		
		No de carriles por calzada: 2		
		Ancho promedio de bermas (m): 2		
		No accesos por kilómetro: 4		
CALCULO DE VELOCIDAD A FLUJO LIBRE				
VG:		90.0		
Corrección ancho de carril, f_c :		0.0		
Corrección promedio ancho de bermas, f_b :		0.0		
Corrección ancho de separador, f_s :		2.8		
Corrección densidad de accesos, f_a :		3.0		
		VL Calculada:	84.2	
		Tomar VL de:	80	
		Ver Manual		
INFORMACION DE VEHICULOS				
Volumen (veh/h):		2520		FHP: 0.90
Terreno: (Ver instrucciones)		Genérico Ondulado		
Porcentaje de Vehículos		EC		
Camiones		20.0		
fHW		0.794		
Tipo de conductor:		Frecuente		
Flujo vehicular (vp):		1764		
		f _p : 1.0		
Información de rampas compuestas				
Segmento		Longitud (m)		Pendiente (%)
1		6000.0		5.0
2				
3				
4				
5				
6				
Longitud (m):		6000.0		
Pendiente Ponderada (%):		5.0		
RESULTADOS				
Velocidad (km/h):		73.0		
Densidad (Ades/km/Carril):		24.2		
G		NIVEL DE SERVICIO: F		
		Número de Carriles		

Fuente: elaboración propia.

4.2 Configuración de aplicaciones

4.2.1 Configuración tipo de análisis

Se debe seleccionar en el campo tipo de análisis la opción deseada: operación o planeación. Si se selecciona el análisis de planeación se debe registrar el Nivel de Servicio deseado.

En la Figura 11 se muestra la apariencia en el formulario básico del programa.

Figura 11. Configuración tipo de análisis.

Fuente: elaboración propia.

4.2.2 Configuración velocidad a flujo libre (VL)

Si se ha medido la velocidad a flujo libre en el campo no se deben efectuar correcciones a la velocidad y solo debe seleccionar la VL adoptada a la curva maestra más cercana.

4.2.2.1 Velocidad a flujo libre medida en campo

En el tipo de velocidad VL seleccionar una de dos opciones: "Medida en el campo" o "Velocidad genérica".

En la Figura 12 se muestra la apariencia del formulario del programa.

Figura 12. Configuración velocidad a flujo libre (VL) medida en el campo.

Fuente: elaboración propia.

4.2.2.2 Velocidad a flujo libre a partir de una velocidad genérica (VG)

Esta opción corresponde al caso de estimar la velocidad a flujo libre (VL) a partir de la velocidad genérica de la vía. En la Figura 13 se aprecia la apariencia del formulario del programa. El analista deberá revisar y aplicar el paso 2 del procedimiento de aplicación descrito en la parte 2 del manual.

Para efectuar las correcciones a la velocidad genérica se deberá registrar: ancho de carril, ancho de separador, ancho promedio de bermas y número de puntos de acceso por kilómetro. Si la carretera tiene un límite de velocidad máxima, la velocidad genérica se fija como la del límite de velocidad más 10 km/h.

Figura 13. Configuración velocidad a flujo libre (VL).

VELOCIDAD A FLUJO LIBRE, VL		<input checked="" type="checkbox"/> Límite de Velocidad
Tipo de Velocidad VL:	Velocidad genérica, VG	Valor velocidad genérica, km/h: 90.0
Límite de Velocidad (km/h):	80.0	
Valor sugerido de VG (km/h):	90.0	
Ancho de separador (m):	0.00	
Ancho de carril (m):	3.65	
CALCULO DE VELOCIDAD A FLUJO LIBRE		
VG:	90.0	
Corrección ancho de carril, f_c :	0.0	VL Calculada: 84.2
Corrección promedio ancho de bermas, f_b :	0.0	Tomar VL de: 80
Corrección ancho de separador, f_s :	2.8	
Corrección densidad de accesos, f_A :	3.0	
		Ver Manual

Fuente: elaboración propia.

4.2.3. Configuración de la información de tránsito y tipo de terreno (aplicación)

Se debe registrar la siguiente información de volumen de tránsito, factor de hora pico, porcentaje de camiones y seleccionar el tipo de conductor.

En la Figura 14 se presenta la apariencia del formulario del programa.

Además, se debe seleccionar entre las siguientes opciones el tipo de terreno:

- Genérico plano.
- Genérico ondulado.

- Genérico montañoso.
- Pendiente ascenso.
- Pendiente descenso.

Para las aplicaciones de pendiente en ascenso y descenso se debe registrar la longitud y la pendiente de cada uno de los segmentos de las rampas.

Figura 14. Configuración información de tránsito y tipo de terreno.

INFORMACION DE VEHICULOS			
Volumen (veh/h):	2520	FHP:	0.90
Terreno: (Ver instrucciones)	Genérico Ondulado		
Porcentaje de Vehículos Camiones	20.0	EC	2.30
fHW	0.794	f _p	1.0
Tipo de conductor:	Frecuente		
Flujo vehicular (vp):	1764		
Información de rampas compuestas			
Segmento	Longitud (m)	Pendiente (%)	
1	6000.0	5.0	
2			
3			
4			
5			
6			
Longitud (m):		6000.0	
Pendiente Ponderada (%):		5.0	

Fuente: elaboración propia.

4.2.4 Resultados de las aplicaciones

Para el análisis de operación, los resultados suministrados por el manual son: velocidad, densidad y Nivel de Servicio ofrecido. Para el análisis de planeación el resultado obtenido es el número de carriles necesarios para tener un Nivel de Servicio deseado.

En la Figura 15 se presenta la apariencia del formulario del programa.

Figura 15. Resultados de las aplicaciones.

RESULTADOS	
Velocidad (km/h):	83.9
Densidad(Ades/km/Carril):	21.0
NIVEL DE SERVICIO:	F
Número de Carriles	

Fuente: elaboración propia.

4.3 Ejemplos

4.3.2 Ejemplo 2: análisis de planeación

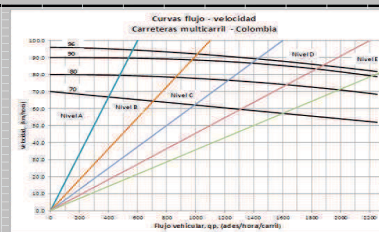
4.3.1 Ejemplo 1: análisis de operación

En la Figura 17 se presenta el Ejemplo de aplicación No. 2 desarrollado en la parte 3 del manual.

En la Figura 16 se presenta el Ejemplo de aplicación No.1 desarrollado en la parte 3 del manual.

Figura 16. Ejemplo de Aplicación No. 1 - operación.

CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO CARRETERAS MULTICARRIL COLOMBIA 2015																														
Carretera:	Sector Ejemplo No 1																													
Proyecto:	MANUAL DE CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO CARRETERAS MULTICARRIL																													
Analista:	UNICAUCA	Fecha (dd/mm/año):	22/11/2015																											
	Tipo de análisis:	Operación	NS diseño: C																											
VELOCIDAD A FLUJO LIBRE, VL <input type="checkbox"/> Límite de Velocidad																														
Tipo de Velocidad VL:	Velocidad genérica, VG	Valor velocidad genérica, km/h	90.0																											
Límite de Velocidad (km/h):																														
Valor sugerido de VG (km/h):																														
Ancho de separador (m):	1.50	No de carriles por calzada:	2																											
Ancho de carril (m):	3.3	Ancho promedio de bermas (m):	1.5																											
		No accesos por kilómetro:	6																											
CALCULO DE VELOCIDAD A FLUJO LIBRE																														
VG:	90.0	VL Calculada:	81.7																											
Corrección ancho de carril, f_c :	2.0	Tomar VL de:	80																											
Corrección promedio ancho de bermas, f_b :	1.7		Ver Manual																											
Corrección ancho de separador, f_s :	0.9																													
Corrección densidad de accesos, f_A :	3.7																													
INFORMACION DE VEHICULOS																														
Volumen (veh/h):	1850	FHP:	0.90																											
Terreno: (Ver instrucciones)	Pendiente Ascenso	Información de rampas compuestas <table border="1"> <thead> <tr> <th>Segmento</th> <th>Longitud (m)</th> <th>Pendiente (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1000.0</td><td>4.0</td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>Longitud (m):</td> <td>1000.0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Pendiente Ponderada (%):</td> <td>4.0</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Segmento	Longitud (m)	Pendiente (%)	1	1000.0	4.0	2			3			4			5			6			Longitud (m):	1000.0		Pendiente Ponderada (%):	4.0	
Segmento	Longitud (m)	Pendiente (%)																												
1	1000.0	4.0																												
2																														
3																														
4																														
5																														
6																														
Longitud (m):	1000.0																													
Pendiente Ponderada (%):	4.0																													
Porcentaje de Vehículos	EC																													
Camiones	30.0	2.10																												
fHW	0.752	f_p																												
Tipo de conductor:	Frecuente	1.0																												
Flujo vehicular (vp):	1367																													
RESULTADOS																														
Velocidad (km/h):	75.8																													
Densidad (Ades/km/Carril):	18.0																													
		NIVEL DE SERVICIO:	D																											



Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Ejemplo de Aplicación No. 2 - Planeación.

CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO CARRETERAS MULTICARRIL COLOMBIA 2015			
Carretera:	Sector Ejemplo No 1		
Proyecto:	MANUAL DE CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO CARRETERAS MULTICARRIL		
Analista:	UNICAUCA	Fecha (dd/mm/año):	22/11/2015
Tipo de análisis		Planeación	NS diseño: D
VELOCIDAD A FLUJO LIBRE, VL <input type="checkbox"/> Límite de Velocidad			
Tipo de Velocidad VL:	Velocidad genérica, VG	Valor velocidad genérica, km/h	80.0
Límite de Velocidad (km/h):			
Valor sugerido de VG (km/h):			
Ancho de separador (m):	0.50	Ancho promedio de bermas (m):	1.2
Ancho de carril (m):	3.6	No accesos por kilómetro:	5
CALCULO DE VELOCIDAD A FLUJO LIBRE			
VG:	80.0	VL Calculada:	73.7
Corrección ancho de carril, f_C :	0.0	Tomar VL de:	70
Corrección promedio ancho de bermas, f_B :	1.7	Ver Manual	
Corrección ancho de separador, f_S :	1.6		
Corrección densidad de accesos, f_A :	3.0		
INFORMACION DE VEHICULOS			
Volumen (veh/h):	2300	FHP:	0.90
Terreno: (Ver instrucciones)	Pendiente Descenso	Información de rampas compuestas	
Porcentaje de Vehículos		Segmento	Longitud (m)
Camiones	15.0	1	5000.0
		2	
		3	
		4	
		5	
		6	
fHW	0.802	Longitud (m):	5000.0
Tipo de conductor:	Frecuente	Pendiente Ponderada (%):	4.5
Flujo vehicular (vp):	3188		
Tasa Flujo Máxima:	1785		
RESULTADOS			
Velocidad (km/h):			
Densidad(Ades/km/Carril):			
		NIVEL DE SERVICIO:	
		Número de Carriles	1.8

Fuente: elaboración propia.

Bibliografía

AKÇELIK, Rahmi. Speed-Flow Models for Uninterrupted Traffic Facilities. Greythorn Victoria, Australia. Akcelik & Associates Pty Ltd. 2003.

AKÇELIK, Rahmi. Travel time functions for transport planning purposes. Australia. Australian Road Research 21 (3). 2000.

ANWAAR, Ahmed et al.. Using Lagging Headways to Estimate Passenger Car Equivalents - JOT . Washington, DC. Journal of Transportation, Volumen 2, Número 1, Institute of Transportation Engineers ITE. 2011.

ARBOLEDA, Carlos. Hoja de Cálculo Capacidad y Niveles de Servicio. Popayán. Universidad del Cauca - Facultad de Ingeniería Civil. 2015.

ÁVILA RODRÍGUEZ, Gerardo et al. Caracterización del Transporte Terrestre Automotor de Carga en Colombia 2005-2009. Bogotá. República de Colombia - Ministerio de Transporte. 2013.

ÁVILA RODRÍGUEZ, Gerardo et al. Caracterización del Transporte Terrestre Automotor de Carga en Colombia 2010-2012-final pub. Bogotá. República de Colombia - Ministerio de Transporte. 2013.

CHÁVEZ, Andrés Mauricio et. al. Documento Técnico 4001 - Infraestructura vial. Bogotá. DANE. 2014.

CONGRESO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. Ley 1228 de 2008. Bogotá. Diario Oficial. 2008.

DEPARTAMENTO DE VÍAS Y TRANSPORTE. Clasificación de un tramo vial de acuerdo a la tortuosidad. Popayán. Universidad del Cauca - Facultad de Ingeniería Civil. 2015.

DEPARTAMENTO DE VÍAS Y TRANSPORTE. Plan de Trabajo detallado del convenio 2141. Popayán. Universidad del Cauca - Facultad de Ingeniería Civil. 2014.

DIRECCIÓN DE VIALIDAD. Manual de carreteras de Chile - Capítulo 3. SIN LUGAR. Gobierno de Chile - Dirección de Vialidad. SIN FECHA.

DJI. Manual Dron DJI Phantom 2 vision+. SIN LUGAR. DJI. 2014.

ELEFTERIADOU, Lily. An Introduction to Traffic Flow Theory. New York. Springer Science+Business Media. 2014.

GALARRAGA, Jorge José et al. ISIT Calibración y Uso de Simulación. Córdoba. Universidad Nacional de Córdoba. SIN FECHA.

GALARRAGA, Jorge José et al. ISIT Factores de equivalencia para vehículos de carga. Córdoba. Universidad Nacional de Córdoba. SIN FECHA.

GALARRAGA, Jorge José et al. ISIT Modelación de performance de camiones en pendiente. Córdoba. Universidad Nacional de Córdoba. SIN FECHA.

GALARRAGA, Jorge José y BARSKY, Felipe. ISIT Cálculo de automóviles equivalentes para camiones en pendientes específicas. SIN LUGAR. Universidad Nacional de Córdoba. SIN FECHA.

GLUCK, Jerome et al. Impact of Access Management Techniques - NCHRP 420. Washington, DC. National Academy Press. 1999.

HARWOOD, Douglas W. et al. Capacity and Quality of Service of Two Lane Roads NCHRP 3-55(3). SIN LUGAR. National Cooperative Highway Research Program NCHRP / Midwest Research Institute - University of California-Berkeley. 1999.

HARWOOD, Douglas W. et al. Two Lane Road Analysis Methodology in the HCM - NCHRP 20-7 (160). Kansas City, Missouri. TRB / Midwest Research Institute. 2003.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS - SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA. Matriz de Categorización e Intervención Corredores de Mantenimiento Integral. Bogotá. República de Colombia - Instituto Nacional de Vías. 2004.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Contrato del Convenio 2141 de 2014. Bogotá. INVIAS. 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Estado de la red vial de INVIAS. Sitio en Internet. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Volúmenes de tránsito 2010-2011. SIN LUGAR. INVIAS. SIN FECHA.

ITT Industries. Introducción a CORSIM en inglés y español. SIN LUGAR. Federal Highway Administration - Office of Operations and Research. 2003.

ITT Industries. Manual de Referencia de Registros de CORSIM. SIN LUGAR. Federal Highway Administration - Office of Operations and Research. 2003.

KÜHNE, Reinhart y GARTNER, Nathan H.. 75 Years of the Fundamental Diagram for Traffic Flow Theory - Greenshields Symposium. Washington, DC. Minutas del simposio sobre el Diagrama Fundamental , 75 años, Glenda J. Beal, editor de producción para el Transportation Research Board. 2011.

LI, Jing. Two Lane Highways Simulation and Analysis. SIN LUGAR. University of Florida. 2012.

LONDOÑO MARTÍNEZ, Eduardo et al. Transporte en Cifras - Estadísticas 2013. Bogotá. República de Colombia - Ministerio de Transporte. SIN FECHA.

Marcelo Maldonado. Validación de metodología de HCM - Anexo II. Córdoba. Universidad Nacional de Córdoba. 2010.

Marcelo Maldonado. Validación de metodología de HCM - Anexo III. Córdoba. Universidad Nacional de Córdoba. 2010.

Marcelo Maldonado. Validación de metodología de HCM - Anexo IV. Córdoba. Universidad Nacional de Córdoba. 2010.

Marcelo Maldonado. Validación de metodología de HCM - Anexo V. Córdoba. Universidad Nacional de Córdoba. 2010.

Marcelo Maldonado. Validación de metodología de HCM - Anexo VI. Córdoba. Universidad Nacional de Córdoba. 2010.

Marcelo Maldonado. Validación de metodología de HCM - Tesis. Córdoba. Universidad Nacional de Córdoba. 2010.

Mc CULLOUGH, Bob et al. Project Traffic Forecasting Handbook. SIN LUGAR. Florida Department of Transportation. 2014.

METKARI, Mahendrakumar et al. Review of Passenger Car Equivalence Studies in Indian Context. SIN LUGAR. Actas de International Conference on Emerging Frontiers in Technology for Rural Area (EFITRA). 2012. Journal of Computer Applications (IJCA)

MINISTERIO DE TRANSPORTE - PLAN VIAL REGIONAL. Estado de la red vial secundaria. Sitio en Internet. MINISTERIO DE TRANSPORTE. 2015.

MONTOYA, Víctor Julio et al. Parque automotor de transporte de carga en Colombia. Bogotá. Ministerio de Transporte. 2000.

MURGUEITIO, Alfonso et al. Manual de Diseño Geométrico. SIN LUGAR. INVIAS. 2008.

NARANJO, Víctor Hugo. Análisis de la capacidad y Nivel de Servicio de las vías principales y secundarias de acceso a la ciudad de Manizales. Manizales. Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales. 2008.

OSPINA, Germán A. Estudio de apoyo sobre el sector transporte en Colombia. Bogotá. Recent Economic Development in Infrastructure - REDI. 2004.

OWEN, Larry E. et al. Traffic Flow Simulation Using CORSIM - Owen. SIN LUGAR. Minutas de la conferencia sobre simulación de invierno de 2000 (Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference) J. A. Joines, R. R. Barton, K. Kang, and P. A. Fishwick, editores. 2000.

PEÑALOZA PABÓN, César Augusto et al. Diagnóstico del Transporte 2011. Bogotá. República de Colombia - Ministerio de Transporte. 2011.

RADELAT EGÜES, Guido et al. Manual de Capacidad y Niveles de Servicio para Carreteras de dos carriles - 1996. Popayán. Ministerio de Transporte y Universidad del Cauca. 1996.

REILLY, W., HARWOOD, D., SCHOEN, J. and HOLLING, M. (1990). Capacity and LOS Procedures for Rural and Urban Multilane Highways. Final Report, National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Project 3-33. JHK & Associates, Tucson, Arizona.

REPÚBLICA DE COLOMBIA - MINISTERIO DE TRANSPORTE. Ley 105 de 1993. Bogotá. Diario Oficial. 1993.

REPÚBLICA DE COLOMBIA - MINISTERIO DE TRANSPORTE. Ley de categorización de la red vial nacional - Presentación de proyecto. Bogotá. Ministerio de Transporte. 2012.

REPÚBLICA DE COLOMBIA - MINISTERIO DE TRANSPORTE. Resolución 1240 de 2013. Bogotá. Diario Oficial. 2013.

REPÚBLICA DE COLOMBIA - MINISTERIO DE TRANSPORTE. Resolución 1860 de 2013. Bogotá. Ministerio de Transporte. 2013.

ROESS, Roger P. y PRASSAS, Elena S. The Highway Capacity Manual – A Conceptual and Research History – Volume 1 – Uninterrupted Flow. Suiza. Springer International Publishing. 2014.

SHALINI, Kanakabandi y KUMAR, Brind. Estimation of the Passenger Car Equivalent – A Review. India. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2014. Volumen 4, Número 6

SCHOEN, J., MAY, A., REILLY, W. and URBANIK, T. (1995). Speed-Flow Relationships for Basic Freeway Segments. Final Report, National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Project 3-45. JHK & Associates, Tucson, Arizona.

SIN AUTOR. Development of Indian Highway Capacity Manual – Executive Summary. New Delhi, India. Central Road Research Institute – CSIR. SIN FECHA.

SIN AUTOR. Industria automotriz en Colombia. SIN LUGAR. PROEXPORT Colombia. 2012.

SINCLAIR KNIGHT MERZ (1998). Review and Update of the Speed/Flow Curves and Road Link Types in the Melbourne Strategic Highway Model. Final report to Department of Infrastructure. Melbourne, Victoria, Australia.

SUMNER, Roy et al. Segment passenger car equivalent values for cost allocation on urban arterial roads. U.S.A. Transportation Research Record – Pergamon Press. 1984. Vol. 18A, No 5/6, pp. 399-406

TÉLLEZ, Juana et al. Situación Automotriz en Colombia. Colombia. BBVA Research Colombia. 2012.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD OF THE NATIONAL ACADEMIES. HCM 2010 Capítulo 14 en español. Washington, DC. TRB. 2010. Traducido por Nelson Rivas y Daniel Rivas

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD OF THE NATIONAL ACADEMIES. HCM 2010 Capítulo 15 en español. Washington, DC. TRB. 2010. Traducido por Nelson Rivas y Daniel Rivas

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD OF THE NATIONAL ACADEMIES. HCM 2010 vol 1. Washington, DC. TRB. 2010.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD OF THE NATIONAL ACADEMIES. HCM 2010 vol 2. Washington, DC. TRB. 2010.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD OF THE NATIONAL ACADEMIES. HCM 2010 vol 3. Washington, DC. TRB. 2010.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD OF THE NATIONAL ACADEMIES. Página del TRB sobre HCM2010. Washington, DC. TRB. 2015.

VILLAZÓN BARRAZA, Edgar Enrique. Conteos manuales de tránsito en la red a cargo del INVIAS. SIN LUGAR. INVIAS. SIN FECHA.

WEBSTER, Nathan y ELEFTERIADOU, Lily. A simulation study of truck passenger car equivalents (PCE). SIN LUGAR. Transportation Research Record. 1999.

ZEEGER, John D. et al. Default Values for Highway Capacity and LOS Analysis – NCHRP 599. Washington, DC. TRB. 2008.

Anexo 1

**Metodos alternativos para calificar la
operación de una vía multicarril**

1. Enfoque espacio-tiempo. Diagramas de evolución del tránsito

1.1 Aspectos generales

Una sección de carretera con problemas operacionales afecta el flujo vehicular, fenómeno que muchos investigadores asimilan a las ondas de perturbación, que generan impacto en dos sentidos:

- En el sentido espacial, en secciones aguas abajo donde inicia la perturbación. Este efecto se disipa en una distancia que depende de las condiciones de la carretera.
- Por otra parte, la perturbación tendrá una duración y un mecanismo de disipación en el tiempo.

Estos efectos se pueden observar en un diagrama espacio-tiempo que muestra todas las trayectorias de los vehículos que circulan por el sector afectado por la perturbación. Sin embargo, la elaboración del diagrama espacio-tiempo presenta varias dificultades:

- Es muy difícil obtener en campo los datos de ubicación y otras variables de operación para instantes cortos de observación, por ejemplo, cada segundo. Si se tratara únicamente de la ubicación y velocidad de cada vehículo se podría utilizar un GPS en cada uno de ellos. Para otras variables de operación como la densidad es demasiado dispendioso obtener la información en carretera.
- En la lectura inteligente del diagrama espacio-tiempo, resultado de la información señalada anteriormente.
- Se puede tener una buena aproximación de los efectos espaciales y temporales de las perturbaciones en la operación con la ayuda de: la simulación de la operación del tránsito en el sector.
- Diagramas de isovelocidades o isodensidades, que representan curvas de los vehículos con igual velocidad o igual densidad en el diagrama espacio-tiempo en análisis. Este concepto es similar a las curvas de nivel de los modelos de terreno utilizados en topografía. Si en estos modelos se reemplazan las curvas por

regiones de colores, se obtienen los denominados diagramas de evolución del tránsito.

1.2 Descripción del procedimiento para obtener los diagramas de evolución del tránsito

Se trabaja con base en un modelo de simulación.

1.2.1 Información proporcionada por el modelo de simulación

El modelo de simulación deberá proporcionar la siguiente información:

- Ubicación de cada vehículo en cada instante de observación. La manera más conveniente es proporcionar la abscisa del vehículo cada segundo de simulación.
- Los valores de densidad, velocidad o intervalos en estudio.

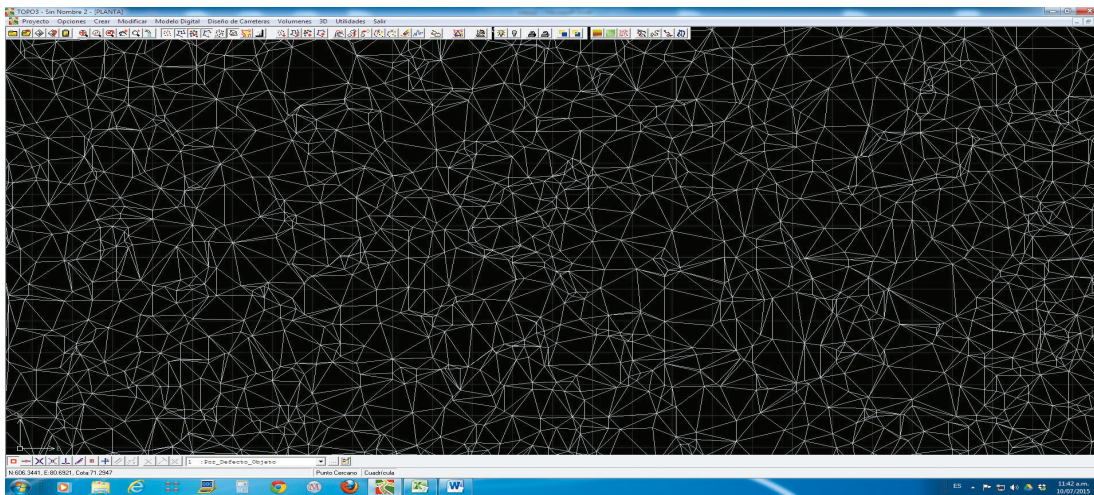
1.2.2 Proceso de triangulación

El primer paso en la generación del modelo de isovelocidades es la determinación de la triangulación. Para ello se aplican los principios de la triangulación de Delaunay, los cuales son:

- Cualquier punto perteneciente a la muestra de puntos medidos del terreno es siempre un vértice de un triángulo.
- Dos triángulos del conjunto de puntos pueden estar conectados por un vértice o un lado común, en ningún caso podrá existir superposición.
- Dado un triángulo $p_i p_j p_k$ no existe otro punto de la triangulación interno al círculo que pasa por los puntos p_i , p_j y p_k .
- Dados cuatro puntos y el cuadrilátero definido por ellos, la diagonal que los divide en dos triángulos es aquella que hace máximo el menor de los ángulos internos, es decir, la triangulación de Delaunay tiende a crear triángulos lo más equiláteros posible.

En la Figura 1 se presenta una triangulación típica aplicando los principios definidos anteriormente.

Figura 1. Disposición del proceso de triangulación.



Fuente: programa SIMCAR, Universidad del Cauca (2015)

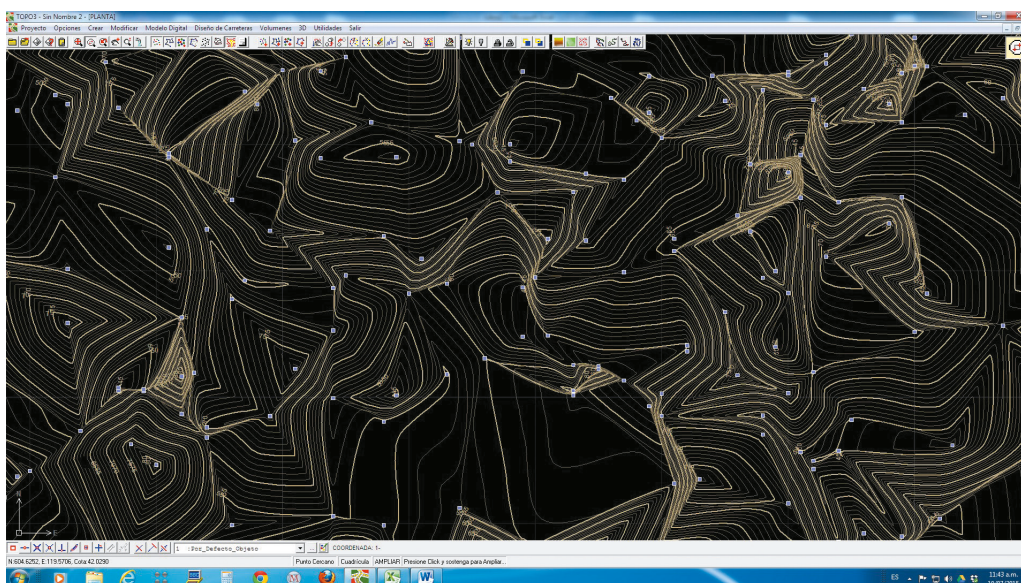
1.2.3. Elaboración de las curvas isovelocidades

Cada punto mostrado en la figura anterior dispone de la información de un vehículo (abscisa, tiempo, velocidad). Cada triángulo representa un plano de variación de la velocidad en el espacio-tiempo. El siguiente paso es la determinación de las curvas isovelocidades. Para ello se realiza un proceso de interpolación lineal bajo

el supuesto que un vehículo, al pasar de una velocidad a otra, en algún instante tuvo que pasar por valores intermedios de velocidad.

La Figura 2 presenta la disposición de las curvas isovelocidades en un tramo de carretera.

Figura 2. Trazado de las curvas isovelocidades.



Fuente: programa SIMCAR, Universidad del Cauca (2015)

1.2.4 Diagrama de evolución del tránsito

El siguiente paso es la elaboración del diagrama de evolución del tránsito, para lo que se prepara un algoritmo que asigna colores a regiones con similitud en las variables de operación. La Figura 3 presenta la disposición típica de un diagrama.

Figura 3. Diagrama típico de evolución de tránsito.



Fuente: programa SIMCAR, Universidad del Cauca (2015)

2. Enfoque indicadores de calidad

2.1 Aspectos generales

En los últimos años, la importancia que se concede a la calidad de los productos y servicios que están al alcance de los ciudadanos ha crecido considerablemente. Hoy en día no es suficiente disfrutar de ese producto o servicio, sino que se exige, tanto por parte de las administraciones como por parte de la opinión pública, que se cumplan ciertos requerimientos relacionados con la calidad. De esta manera, los procesos para garantizar la calidad se han incorporado casi a todas las actividades que se desarrollan en la sociedad, y los servicios que se prestan por medio de la carretera no son una excepción.

Hoy en día, en el contexto de una nueva cultura de la carretera, se ratifica intensamente el concepto de “carretera como servicio” frente al concepto de “carretera como obra”, lo que implica que el proceso de explotación y prestación de servicio de la infraestructura cobra una importancia vital dentro de la gestión de las carreteras, más significativa, si cabe, que la fase de su construcción. Por otro lado, el concepto de servicio va más allá de la explotación de las carreteras y alcanza un plano superior directamente vinculado a la percepción por parte de los usuarios.

Por tanto, con la construcción y aplicación de indicadores de calidad se pretende establecer si existen las condiciones adecuadas para la prestación del servicio y que estas condiciones permitan mejorar la apreciación de usuarios.

Los indicadores de calidad seleccionados en esta investigación son una mezcla de indicadores de eficiencia y eficacia de la organización, indicadores de seguridad vial y otros.

En relación con los indicadores de seguridad vial se retoma el trabajo desarrollado para el Fondo de prevención vial de Colombia por la empresa Ary Bustamante Asociados y la Universidad del Cauca. El grupo de trabajo estuvo integrado por los Ingenieros Mauricio Pineda del Fondo de prevención vial y los

ingenieros Ary Fernando Bustamante, Nelson Rivas, Carlos Arboleda y Efraín Solano.

Un indicador es un instrumento que provee evidencia de una determinada condición o el logro de ciertos resultados. Esta información puede cubrir aspectos cuantitativos y cualitativos sobre los objetivos de un programa o proyecto.

Los indicadores se clasifican en varias categorías:

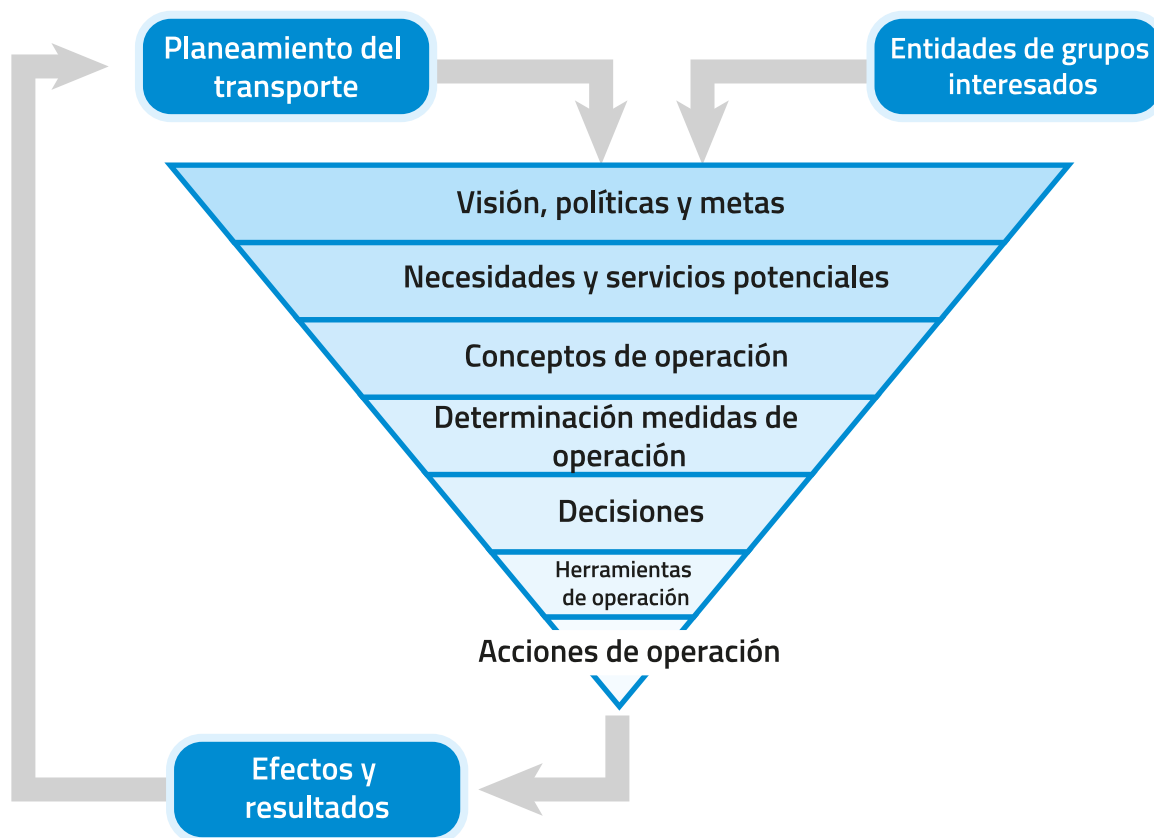
- Indicadores de eficacia: miden el grado del cumplimiento de los objetivos importantes de la actividad que se evalúa.
- Indicadores de eficiencia: miden la fuente y uso de los recursos: humanos, técnicos y económicos empleados en la prestación del servicio.
- Indicadores de calidad: miden los atributos, las capacidades o las características que tienen o deben tener los bienes y servicios que se producen. Los programas establecen las características mínimas que han de cumplir los bienes y servicios que entrega a la población; los indicadores de calidad permiten monitorear los atributos de estos productos desde diferentes perspectivas: la oportunidad, la accesibilidad, la percepción de los usuarios y la precisión en la entrega de los servicios.
- Indicadores financieros o económicos: miden la capacidad del programa para administrar, generar o movilizar de manera adecuada los recursos financieros.

2.2 Componentes del modelo

2.2.1 Estructura del modelo de gestión

En la explotación de una infraestructura vial participan muchos actores y se genera un numeroso conjunto de actividades, que inter-relacionadas proporcionan el servicio a los usuarios. En la Figura 1 se presenta la estructura piramidal típica del proceso de gestión vial.

Figura 1. Esquema piramidal del sistema de gestión vial.



Fuente: FHWA. Manual de gestión de autopistas.

2.2.2 Concepto de calidad

El método se centra en la adopción de un sistema con calificación ideal de 100 puntos, la cual se explica a través de atributos o indicadores óptimos. Al estudiar un sistema real, dicha calificación se va reduciendo por efecto del alejamiento de un atributo o indicador de su situación ideal. El grado o severidad del castigo está en función directa del grado del atributo y de la magnitud del alejamiento de la condición óptima.

de evaluación y calificación. El procedimiento adoptado cubre:

- Identificación de componentes o factores globales, que permiten desglosar el sistema en partes más o menos funcionales.
- Para cada factor se seleccionan un grupo de indicadores.
- Se lleva a cabo una valoración del grado de importancia de los factores y de sus indicadores.
- Se establecen instrumentos para llevar a cabo el proceso de calificación.

2.2.3 Estructura del modelo de indicadores de calidad

Una vez se tiene una concepción general del modelo de gestión, se centra la atención en el diseño del modelo

2.3. Identificación de factores globales

Los factores de evaluación de la calidad están íntimamente relacionados con los denominados elementos del tránsito.

En la Tabla 1 se presenta una breve descripción de cada uno de los factores globales de evaluación.

Tabla 1. Factores globales: indicadores de calidad.

Código	Nombre del factor	Descripción
1	La vía	Cubre todos los aspectos geométricos y operacionales de la vía
2	El usuario	Los usuarios de la vía se dividen en conductores, pasajeros y peatones. La diversidad de características de estas personas afecta la operación de una vía
3	El vehículo	Cada día crece el número de vehículos que circulan por las carreteras, y se han diversificado los tipos de vehículos. El control sobre los mismos y las características existentes en cuanto a protección de los usuarios, hace que mejoren las condiciones de seguridad en las vías
4	El medio ambiente	Es importante analizar los servicios adicionales que proporciona una vía tales como paraderos de autobuses, sitios de descanso y servicios para los viajeros. También es importante analizar los antecedentes de la vía en cuanto a accidentalidad.
5	Institucional	Se reúnen aquí los aspectos relacionados con la gestión de la seguridad vial por parte de los administradores de las carreteras, por ejemplo la realización auditorías de seguridad vial, puntos críticos, velocidad, mantenimiento, control policivo y atención de heridos en caso de accidentes (atención del trauma).

Fuente: Corporación Fondo de Prevención Vial.

2.4 Identificación de indicadores de calidad

Para identificar las variables e indicadores más apropiados para cada factor se realizó una jornada de discusión que cubre la elaboración de una lista de indicadores pertinentes para medir la calidad de una carretera.

En la Tabla 2 se presenta la identificación y las características de los indicadores seleccionados.

Tabla 2. Identificación y descripción de indicadores.

Código	Nombre	Descripción	Tipo de Indicador	Condición Ideal	Fuente de Información	Escala
1	Capacidad y nivel de servicio	Este indicador cubre las condiciones de operación de la carretera. Este indicador tiene en cuenta: tipo de carretera, velocidad de operación, número de carriles, ancho de carril, separador, distancia a obstáculos laterales, densidad de accesos.	Cuantitativo	Nivel A	Aplicación del Manual de capacidad y niveles de servicio	<ul style="list-style-type: none"> Nivel A, B Nivel C, D Nivel E Nivel F
2	Carriles auxiliares	Los carriles auxiliares de aceleración y deceleración canalizan el tránsito y facilitan las maniobras de convergencia y divergencia. Su existencia reduce los conflictos con los flujos de tránsito principales.	Cuantitativo	Existen a ambos lados	Inventario de campo	<ul style="list-style-type: none"> En los dos sentidos <input type="checkbox"/> En un sentido <input type="checkbox"/> No existe <input type="checkbox"/>
3	Peligrosidad del separador	El ancho y forma del separador pueden proporcionar condiciones más seguras y cómodas de circulación.	Cualitativo	Protegido	Inspección visual	<ul style="list-style-type: none"> Totalmente protegido, no traspasable y con elementos que redireccionan <input type="checkbox"/> Medio protegido <input type="checkbox"/> Desprotegido y con elementos peligrosos al choque con objeto fijo <input type="checkbox"/>
4	Cicloruta	Vía exclusiva o parte de la franja vehicular por la que se permite la circulación de bicicletas.	Cualitativo	Cicloruta separada del tránsito vehicular	Visita de Campo o Especificaciones de Diseño	<ul style="list-style-type: none"> Carril separado con barrera <input type="checkbox"/> Carril separado sin barrera <input type="checkbox"/> Carril sobre la berna <input type="checkbox"/> No existe. <input type="checkbox"/>
5	Motoruta	Vía exclusiva o parte de la franja vehicular por la que se permite la circulación de bicicletas.	Cualitativo	Carril exclusivo para el tránsito de motos	Visita de Campo o Especificaciones de Diseño	<ul style="list-style-type: none"> Carril separado con barrera <input type="checkbox"/> Carril separado sin barrera <input type="checkbox"/> Carril sobre la berna <input type="checkbox"/> No existe. <input type="checkbox"/>
6	Estado de las bermas	Las bermas pueden proporcionar espacio adicional de maniobrabilidad de los vehículos y proporcionan secciones en las cuales el conductor puede disfrutar de condiciones más apropiadas.	Cualitativo	Transitables	Inspección de campo	<ul style="list-style-type: none"> Transitables Con obstáculos Intransitables
7	Ancho del andén	Separación lateral de flujos de vehículos y peatones.	Cuantitativo	Mayor de 1.20m	Información de campo y planos de la vía	<ul style="list-style-type: none"> Ancho de andén mayor a 1,20m Andén entre 0.50m a 1.20m Sin andén
8	Estado de señales	Se evalúa el estado de la demarcación y si es adecuada para las necesidades de la vía.	Cualitativo	Señales en buen estado	Inspección de campo	<ul style="list-style-type: none"> Bueno Regular Malo
9	Estado de la demarcación	Se evalúa el estado de la demarcación y si es adecuada para las necesidades de la vía.	Cualitativo	Demarcación en buen estado	Inspección de campo	<ul style="list-style-type: none"> Bueno Regular Malo
10	Estado de la superficie de Rodadura	Se determina el tipo de superficie de rodadura y su estado.	Cuantitativo	Buena	Inventario de campo	<ul style="list-style-type: none"> Bueno Regular Malo
11	Tipo de Intersecciones	Por ser un punto de alto potencial de accidentalidad se debe analizar el tipo de intersección y su sistema de control operacional	Cualitativo	A desnivel	Inventario de campo	<ul style="list-style-type: none"> A desnivel Glorieta Semaforizada con y sin carril de giro. De prioridad
12	Tipo de pasos peatonales	Como se presta el servicio a los peatones, y cuáles son las medidas de seguridad que se presentan	Cualitativo	Cruce a desnivel	Planos y visita de campo	<ul style="list-style-type: none"> Cruce a desnivel - puente peatonal Semáforo con refugio Semáforo, sin refugio Sin semáforo, cruce pintado con refugio. Sin semáforo, cruce pintado sin refugio.
13	Facilidades para personas especiales	Se trata de establecer si se ha acondicionado la movilidad para personas en discapacidad.	Cualitativo	Cruces a desnivel con rampas de acceso	Inspección de campo	<ul style="list-style-type: none"> Pasos peatonales con rampas de acceso Pasos peatonales sin rampa de acceso
14	Información a conductores	Las tecnologías de la información en línea proporcionan medios para mantener adecuadamente informados a los conductores sobre aspectos de operación en la carretera.	Cualitativo	Información en línea	Entrevista	<ul style="list-style-type: none"> Información directa a usuarios Información con señalización dinámica
15	Zona perdonante	Establecer cuál es la distancia de seguridad que se proporciona a los conductores a lado y lado de la vía, y si permiten la recuperación del control del vehículo en estas áreas.	Cualitativo	Mayor a 9 m	Planos y visita de campo	<ul style="list-style-type: none"> Distancia Mayor a 9m o barrera de seguridad. Distancia entre 5m a 9 m Distancia entre 1.8m a 5 m Carece de zona perdonante.
16	Estado de las barreras de seguridad	Estado general de las barreras y el grado de oportunidad de su mantenimiento.	Cualitativo	Bueno	Inspección de campo	<ul style="list-style-type: none"> Bueno Regular Malo
17	Paraderos de autobuses	Es conveniente que se implementen paraderos de autobuses seguros.	Cualitativo	Fuera de la vía y aisladas del tráfico	Visita de campo	<ul style="list-style-type: none"> Fuera de la vía. A un lado de la vía Sobre la vía
18	Iluminación	Establecer si se dan condiciones adecuadas de iluminación en zonas especiales que lo requiere.	Cuantitativo	Buena	Inspección de campo	<ul style="list-style-type: none"> Bueno Regular Malo
19	Historia de la accidentalidad	Este historial nos permite determinar que tan segura es la circulación por la vía	Cuantitativo	Sin accidentes en los últimos 5 años	Análisis histórico	<ul style="list-style-type: none"> Sin Accidentes Índice de Severidad

Tabla 2. Identificación y descripción de indicadores (Continuación).

Código	Nombre	Descripción	Tipo de Indicador	Condición Ideal	Fuente de Información	Escala
20	Auditorías de Seguridad Vial	Establecer si en sector de análisis se han llevado a cabo auditorías de seguridad vial en los últimos dos años.	Cuantitativo	Anualmente	Administración Vial	<ul style="list-style-type: none"> • Anualmente • Cada dos años • No se han hecho
21	Estudios de Puntos críticos	Establecer si se han adelantado estudio de identificación de sitios de alta accidentalidad y se han formulado propuestas de mejoramiento.	Cuantitativo	Detectados con estudios	Administración Vial	<ul style="list-style-type: none"> • Detectados con estudios • Estudiados parcialmente • No estudiados.
22	Planes de mejoramiento	Verificar la existencia de planes de mejoramiento y seguimiento de los mismos.	Cuantitativo	En ejecución	Administración Vial	<ul style="list-style-type: none"> • En ejecución • Sin planes
23	Operativos de control	Verificar si se han realizado operativos de control en la vía.	Cuantitativo	Permanentes	Policía de carreteras	<ul style="list-style-type: none"> • Permanente • Esporádicos • Pocos
24	Campañas de prevención	Verificar si se han llevado a cabo campañas de prevención adelantadas por una Institución Oficial o por parte de agencias de Prevención Vial.	Cuantitativo	Más de 5 en el año	Administración Vial	<ul style="list-style-type: none"> • Más de 5 en el año • Entre 3 y 5 • Menos de 3 • No se han hecho
25	Mantenimiento vial	Calificar la oportunidad y calidad de las actividades de mantenimiento vial.	Cuantitativo	Programación de mantenimiento	Administración Vial	<ul style="list-style-type: none"> • Índices de mantenimiento.
26	Atención de emergencias	Verificar la existencia de medidas de atención de emergencias, disponibilidad de ambulancias, grúas, etc.	Cuantitativo	Menos de 10 minutos	Administración Vial	<ul style="list-style-type: none"> • Llegada de ambulancias menos de 10 minutos • Entre 10 y 15 minutos
27	Manejo de cierres de la vía	Verificar si los cierres de la vía se programan y se informa a los usuarios con anticipación.	Cuantitativo	Cierres programados	Administración Vial	<ul style="list-style-type: none"> • Registro de cierres

Fuente: elaboración propia.

2.5 Proceso de ponderación de indicadores

El procedimiento para la ponderación de indicadores está basado en la Matriz de Saaty. El proceso de ponderación es una combinación de análisis cualitativo y cuantitativo, que radica en determinar el peso específico de cada indicador en el proceso de evaluación de la calidad de la carretera.

El proceso de ponderación se lleva a cabo mediante el análisis entre cada par de indicadores (I_i) e (I_j) para lo cual se responden dos preguntas:

¿Cuál es más importante?

¿Cuál es el grado de diferencia?

Para responder estas preguntas se organizó un comité de trabajo integrado por no más de ocho (8) personas dirigido por un coordinador. Es tan importante en el trabajo de este comité la discusión cualitativa como la asignación de las calificaciones.

Una escala apropiada para calificar la diferencia en el grado de importancia podría ser la siguiente:

Diferencia extremadamente alta 9

Diferencia alta 7 – 8

Diferencia mediana 5 – 6

Diferencia moderada 2 – 4

Para el proceso cuantitativo, la técnica de cálculo es bastante simple. Se dispone de una matriz cuadrada, una fila y columna por indicador. En la diagonal de la matriz se dispone el número uno (1). Se comparan por pares de indicadores, se establece el más importante de los dos y el grado de diferencia. Este valor se anota en las celdas de la matriz, así: se determina la celda para la cual el indicador es el más importante y se coloca el inverso de las calificaciones, en la otra celda se consigna el promedio. En la Tabla 3 se presenta la matriz de resultado obtenida en la investigación.

Tabla 3. Matriz de ponderación.

$I_i \backslash I_j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1 - Capacidad y nivel de servicio	1	5	6	8	8	9	7	5	5	3	5	7	9	5	5	7	9	9	5	7	9	3	7	9	3	5	5
2 - Carriles Auxiliares	1/5	1	3	3	7	3	5	5	5	1/5	1/3	1/3	5	1/3	1/3	7	7	5	1/7	3	3	1/3	5	5	1/3	1/3	1/3
3 - Peligrosidad del separador	1/6	1/3	1	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/9	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/9	1/5	1/5
4 - Cicloruta	1/8	1/3	5	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1/5	3	3	3	3	3	1/3	3	3
5 - Motoruta	1/8	1/7	5	1/3	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/5	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/7	1/3	1/3
6 - Estado de las bermas	1/9	1/3	5	1/3	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1/5	3	3	3	3	3	1/9	3	3
7 - Ancho del andén	1/7	1/5	5	1/3	3	1/3	1	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/5	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/8	1/4	1/4
8 - Estado de señales	1/5	1/5	5	1/3	3	1/3	4	1	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5
9 - Estado de la demarcación	1/5	1/5	5	1/3	3	1/3	4	5	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/5	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/5	1/3	1/3
10 - Estado de la superficie de Rodadura	1/3	5	5	1/3	3	1/3	4	5	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	1/5	3	3	3	3	3	1/1	3	3
11 - Tipo de Intersecciones	1/5	3	5	1/3	3	1/3	4	5	3	1/3	1	2	2	2	2	2	2	2	1/5	2	2	2	2	2	1/3	2	2
12 - Tipo de pasos peatonales	1/7	3	5	1/3	3	1/3	4	5	3	1/3	1/2	1	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/3	1/5	1/5
13 - Facilidades para personas especiales	1/9	1/5	5	1/3	3	1/3	4	5	3	1/3	1/2	5	1	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/9	1/5	1/5
14 - Información a conductores	1/5	3	5	1/3	3	1/3	4	5	3	1/3	1/2	5	5	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1/3	3	3
15 - Zona perdonante	1/5	3	5	1/3	3	1/3	4	5	3	1/3	1/2	5	5	1/3	1	7	7	7	1/1	7	7	7	7	7	1/3	7	7
16 - Estado de las barreras de seguridad	1/7	1/7	5	1/3	3	1/3	4	5	3	1/3	1/2	5	5	1/3	1/7	1	2	2	1/5	2	2	2	2	2	1/5	2	2
17 - Paraderos de autobuses	1/9	1/7	5	1/3	3	1/3	4	5	3	1/3	1/2	5	5	1/3	1/7	1/2	1	5	1/5	5	5	5	5	5	1/5	5	5
18 - Iluminación	1/9	1/5	5	1/3	3	1/3	4	5	3	1/3	1/2	5	5	1/3	1/7	1/2	1/5	1	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5
19 - Historia de la accidentalidad	1/5	7	9	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	1/3	1	5	5	5	1	3	3	1/1	1/1	1/1	1/5	3	5
20 - Auditorias de Seguridad Vial	1/7	1/3	5	1/3	3	1/3	4	5	3	1/3	1/2	5	5	1/3	1/7	1/2	1/5	5	1/3	1	1/7	1/7	1/7	1/7	1/3	1/7	1/7
21 - Estudios de Puntos críticos	1/9	1/3	5	1/3	3	1/3	4	5	3	1/3	1/2	5	5	1/3	1/7	1/2	1/5	5	1/3	7	1	1/3	1/3	1/3	1/5	1/3	1/3
22 - Planes de mejoramiento	1/3	3	5	1/3	3	1/3	4	5	3	1/3	1/2	5	5	1/3	1/7	1/2	1/5	5	1	7	3	1	1/9	1/9	1/3	1/9	1/9
23 - Operativos de control	1/7	1/5	5	1/3	3	1/3	4	5	3	1/3	1/2	5	5	1/3	1/7	1/2	1/5	5	1	7	3	9	1	7	1/3	7	7
24 - Campañas de prevención	1/9	1/5	5	1/3	3	1/3	4	5	3	1/3	1/2	5	5	1/3	1/7	1/2	1/5	5	1	7	3	9	1/7	1	1/5	3	3
25 - Mantenimiento vial	1/3	3	9	3	7	9	8	5	5	1	3	3	9	3	3	5	5	5	5	3	5	3	3	5	1	1/4	1/4
26 - Atención de emergencias	1/5	3	5	1/3	3	1/3	4	5	3	1/3	1/2	5	5	1/3	1/7	1/2	1/5	5	1/3	7	3	9	1/7	1/3	4	1	3
27 - Manejo de cierres de la vía	1/5	3	5	1/3	3	1/3	4	5	3	1/3	1/2	5	5	1/3	1/7	1/2	1/5	5	1/5	7	3	9	1/7	1/3	4	1/3	1
Suma	5.60	45.5	138	27.2	91.2	36.9	105	112.78	76	22.5	31.7	93.7	102	26.1	27.5	52.2	53.3	89.7	22.1	88.9	66.1	74.7	47.9	59.2	18.2	50.4	55.1
1/suma	0.18	0.02	0.01	0.04	0.01	0.03	0.01	0.0089	0.01	0.04	0.03	0.01	0.01	0.04	0.04	0.02	0.02	0.01	0.05	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.05	0.02	0.02
Ponderación	23.80	2.93	0.97	4.90	1.46	3.61	1.27	1.18	1.75	5.92	4.21	1.42	1.31	5.12	4.85	2.55	2.50	1.49	6.04	1.50	2.02	1.78	2.78	2.25	7.32	2.64	2.42

Fuente: elaboración propia.

Los resultados del proceso de ponderación de indicadores de calidad se presentan en la Tabla 4. Los indicadores que mayor impacto tienen sobre la calidad son: capacidad y Nivel de Servicio ofrecido por la carretera, mantenimiento vial, historial de accidentalidad, estado de la superficie de rodadura, información a conductores y la existencia de ciclo ruta.

Tabla 4. Resultados ponderación de indicadores.

Indicador	Ponderación, %
1 - Capacidad y nivel de servicio	23.80
2- Carriles Auxiliares	2.93
3 - Peligrosidad del separador	0.97
4 - Cicloruta	4.90
5 - Motoruta	1.46
6 - Estado de las bermas	3.61
7 - Ancho del andén	1.27
8 - Estado de señales	1.18
9 - Estado de la demarcación	1.75
10 - Estado de la superficie de Rodadura	5.92
11 - Tipo de Intersecciones	4.21
12 - Tipo de pasos peatonales	1.42
13 - Facilidades para personas especiales	1.31
14 - Información a conductores	5.12
15 - Zona perdonante	4.85
16 - Estado de las barreras de seguridad	2.55
17 - Paraderos de autobuses	2.50
18 - Iluminación	1.49
19 - Historia de la accidentalidad	6.04
20 - Auditorias de Seguridad Vial	1.50
21 - Estudios de Puntos críticos	2.02
22 - Planes de mejoramiento	1.78
23 - Operativos de control	2.78
24 - Campañas de prevención	2.25
25 - Mantenimiento vial	7.32
26 - Atención de emergencias	2.64
27 - Manejo de cierres de la vía	2.42

Fuente: elaboración propia.

2.6 Proceso de calificación

El marco general de calificación para cualquier carretera está dado por los indicadores y pesos relativos consignados en la Tabla 5, que contiene el formato para hacer la calificación de una carretera. El procedimiento es el siguiente:

- Calificar cada indicador en la escala de 1 a 10. La calificación 1 es deficiente y la calificación de 10 es excelente.

- Obtener la calificación ponderada, calculada como el producto de la calificación asignada por el ponderado del indicador.
- La calificación final está dada por la suma de los resultados de las calificaciones ponderadas.

La calificación final ideal es de 100 puntos; cualquier calificación por debajo de esta indica un alejamiento de la carretera de ese ideal, y en esta medida, se da un margen para formular el plan de mejoramiento, que debe contemplar las acciones o proyectos a emprender en el corto, mediano o largo plazo.

Tabla 5 Formato de calificación de la calidad de una carretera

Indicador	Ponderación, %	Calificación	Calificación Ponderada
1 - Capacidad y nivel de servicio	23.80		
2- Carriles Auxiliares	2.93		
3 - Peligrosidad del separador	0.97		
4 - Cicloruta	4.90		
5 - Motoruta	1.46		
6 - Estado de las bermas	3.61		
7 - Ancho del andén	1.27		
8 - Estado de señales	1.18		
9 - Estado de la demarcación	1.75		
10 - Estado de la superficie de Rodadura	5.92		
11 - Tipo de Intersecciones	4.21		
12 - Tipo de pasos peatonales	1.42		
13 - Facilidades para personas especiales	1.31		
14 - Información a conductores	5.12		
15 - Zona perdonante	4.85		
16 - Estado de las barreras de seguridad	2.55		
17 - Paraderos de autobuses	2.50		
18 - Iluminación	1.49		
19 - Historia de la accidentalidad	6.04		
20 - Auditorias de Seguridad Vial	1.50		
21 - Estudios de Puntos críticos	2.02		
22 - Planes de mejoramiento	1.78		
23 - Operativos de control	2.78		
24 - Campañas de prevención	2.25		
25 - Mantenimiento vial	7.32		
26 - Atención de emergencias	2.64		
27 - Manejo de cierres de la vía	2.42		
CALIFICACION DE CALIDAD			

2.7 Redefinición de la escala de los Niveles de Servicio

En aras de mantener la escala del Nivel de Servicio del HCM, en la Tabla 6 se establece la escala de la calidad ofrecida por la vía.

Tabla 6. Escala de calificación de la calidad de la carretera.

Escala de calificación de la calidad	Intervalo de calificación
A	>90 – 100
B	>80 – 90
C	>70 – 60
D	>60 – 50
E	>30 – 50
F	<30

Fuente: elaboración propia.



Este libro fue diagramado utilizando fuentes Titillium a 10,5 pts, en el cuerpo del texto y Titillium en la carátula.

Se empleó papel bond blanco de 90 grs. en páginas interiores y propalcote de 300 grs. para la carátula.





La movilidad
es de todos

Mintransporte



INVIAS
INSTITUTO NACIONAL DE VIAS