

EVALUACIÓN DEL IMPACTO SOBRE LA MOVILIDAD EN CORREDORES VIALES
DEBIDO A LA INCLUSIÓN DE CICLO-BANDAS

JHON SEBASTIÁN MOLANO GAVIRIA
LUIS DAVID LUNA MARTÍNEZ



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
SANTIAGO DE CALI
JUNIO 2019

EVALUACIÓN DEL IMPACTO SOBRE LA MOVILIDAD EN CORREDORES VIALES
DEBIDO A LA INCLUSIÓN DE CICLO-BANDAS

JHON SEBASTIÁN MOLANO GAVIRIA
LUIS DAVID LUNA MARTÍNEZ

Proyecto de grado para optar por el título de
INGENIERO CIVIL

Director
JACKELINE MURILLO HOYOS
Ingeniera Civil

Codirector
LUIS CARLOS MOYA
Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
SANTIAGO DE CALI
JUNIO 2019

EVALUACIÓN DEL IMPACTO SOBRE LA MOVILIDAD EN CORREDORES VIALES
DEBIDO A LA INCLUSIÓN DE CICLO-BANDAS

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Santiago de Cali, junio de 2019

A Dios gracias por derramar bendiciones sobre mi vida cada día y que para esta ocasión no es más que la muestra de su amor.

A mis padres por ser ese pilar fundamental de los cuales siempre tuve su apoyo incondicional lleno de amor, comprensión y fortaleza para el cumplimiento de mis sueños.

A mis familiares y amigos que siempre me expresaron su apoyo y atención para solucionar los obstáculos durante este proceso.

A los grandiosos profesores que conocí en este camino de aprendizaje, que elevaron mi crecimiento como profesional y como persona.

A mis directores de tesis por su dedicación y ser esa guía fundamental que permitió la culminación de este proyecto.

Jhon Sebastián Molano Gaviria

*A la persona con más fortaleza, mi madre,
por su inmenso amor y comprensión,
por enseñarme a ser perseverante y a luchar por mis sueños,
por guiarme, apoyarme y cuidarme.*

Luis David Luna Martínez

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios, por permitirnos llegar hasta este punto tan importante de nuestras vidas, por guiarnos y darnos fortaleza durante toda nuestra etapa de aprendizaje.

A nuestros padres, por educarnos con principios y valores, por impulsar nuestros sueños y por guiarnos día a día.

Agradecemos a todos los profesores de la Universidad del Valle que compartieron sus conocimientos, experiencia, dedicación y tiempo; por motivarnos a salir adelante.

Agradecemos al grupo de investigación GITTIV por el acompañamiento de sus integrantes y la disposición de espacios, herramientas y conocimientos los cuales facilitaron el desarrollo de este proyecto

Agradecemos al grupo consultor Grupo Vial y su equipo de trabajo por permitirnos hacer uso de sus instalaciones, su equipamiento y de importante información para el desarrollo de este proyecto.

Agradecemos de manera especial a la profesora Jackeline Murillo Hoyos y al ingeniero Luis Carlos Moya por todo el tiempo dedicado, por la valiosa guía y por impulsar nuestras ideas.

A todos ellos, gracias

Sebastián M. – David L.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	1
1.2	OBJETIVOS	3
1.3	JUSTIFICACIÓN	3
2	ANTECEDENTES.....	5
3	MARCO TEÓRICO	10
3.1	LA INGENIERÍA DE TRÁNSITO	10
3.1.1	Corredor Vial.....	10
3.1.2	Características del flujo de tráfico	13
3.1.3	Parámetros de flujo de tráfico ininterrumpido	14
3.1.4	Parámetros de flujo de tráfico interrumpido	16
3.1.5	Capacidad vial	17
3.1.6	Ciclo-infraestructura.....	19
3.2	MOVILIDAD SOSTENIBLE	22
3.2.1	Indicadores de movilidad sostenible	23
3.2.2	Índices de movilidad sostenible	24
3.3	MODELOS DE MICROSIMULACIÓN DE TRÁNSITO	27
3.3.1	Fundamentos.....	27
3.3.2	Clasificación.....	27
3.3.3	Aspectos generales del software PTV VISSIM©	28
4	METODOLOGÍA.....	35
5	IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS QUE CONDICIONAN EL IMPACTO SOBRE LA MOVILIDAD EN CORREDORES VIALES.....	36
5.1	IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS.....	36
5.1.1	Revisión de literatura	36
5.1.2	Parámetros que condicionan el impacto en la operación del corredor.....	38
5.2	EVALUACIÓN DE IMPACTOS SOBRE LA MOVILIDAD EN CORREDORES VIALES..	51
5.2.1	Construcción del índice de movilidad.....	51
5.2.2	Guía para la evaluación del índice.....	59
6	CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE MOVILIDAD DEL CORREDOR VIAL CALLE 5 ENTRE CARRERA 56 Y CARRERA 15	61
6.1	CORREDOR VIAL CALLE 5.....	61
6.2	PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS.....	61
6.3	RECOLECCIÓN Y VALIDACIÓN DE DATOS PARA LOS ESCENARIOS PLANTEADOS	61
6.4	MODELACIÓN DE ESCENARIOS PLANTEADOS EN PTV VISSIM© PARA LOS ESCENARIOS PLANTEADOS	62
6.4.1	Tipo de vehículo	62
6.4.2	Comportamiento de conducción	63
6.4.3	Links y conectores	63
6.4.4	Elementos de red adicionales	64

6.4.5	Control del tráfico.....	65
6.4.6	Balanceo.....	65
6.4.7	Tráfico vehicular	66
6.4.8	Transporte público	67
6.4.9	Simulación	67
6.4.10	Calibración y validación	67
6.5	CÁLCULO DE ÍNDICE PARA LOS ESCENARIOS PLANTEADOS.....	68
7	ANÁLISIS DE IMPACTOS Y SENSIBILIDAD SOBRE LA MOVILIDAD PARA EL CORREDOR VIAL CALLE 5 ENTRE CARRERA 56 Y CARRERA 15.	71
7.1	DESEMPEÑO DE LOS DOMINIOS, SENTIDO N-S.....	71
7.2	DESEMPEÑO DE LOS DOMINIOS, SENTIDO S-N.....	72
7.3	IMPACTO OPERACIONAL, SENTIDO N-S	74
7.4	IMPACTO OPERACIONAL, SENTIDO S-N	75
7.5	ANÁLISIS DE CAPACIDAD.....	75
8	CONCLUSIONES	77
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
	ANEXOS	81
	ANEXO A: RESULTADOS DE MODELOS PTV VISSIM©	81
	ANEXO B: ENCUESTA PARA CÁLCULO DE PESOS	81
	ANEXO C: GUIA DE CÁLCULO PARA INDICADORES	81
	ANEXO D: CÁLCULO DEL ÍNDICE PARA CORREDOR VIAL CALLE 5.....	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes típicos de un corredor.	10
Figura 2. Medidas de servicio de acuerdo al modo y el elemento vial.	11
Figura 3. Esquema de corredor vial como estatus de link.	12
Figura 4. Esquema de corredor vial como estatus de área.	12
Figura 5. Ciclo-banda unidireccional, segregada visualmente (izquierda) y físicamente (derecha).	21
Figura 6. Relación volumen de tráfico-velocidad como guía para la inclusión de la ciclo- infraestructura.	22
Figura 7. Estructura jerarquizada y multicriterio del índice <i>IMUS</i>	25
Figura 8. Lógica de seguimiento de vehículo (Wiedmann 1974).	29
Figura 9. Links y conectores modelando configuraciones viales.	30
Figura 10. Tipos de presentación: <i>normal</i> (izquierda) y por <i>eje de tramo</i> (derecha)	30
Figura 11. Metodología del proyecto.	35
Figura 12. Localización de corredores viales.	40
Figura 13. Intersecciones modeladas visualizando links (en negro) y conectores (en rojo).	44
Figura 14. Porcentajes de diferencia normalizados para el Acceso Oriente-Occidente de la intersección Calle 34N con Carrera 1.	48
Figura 15. Porcentajes de diferencia normalizados para el Acceso Sur-Norte de la intersección Calle 16 con Carrera 98.	49
Figura 16. Porcentajes de diferencia normalizados para el Acceso Occidente-Oriente de la intersección Carrera 1 con Calle 34N.	49
Figura 17. Porcentajes de diferencia normalizados para el Acceso Norte-Sur de la intersección Calle 5 con Carrera 27.	50
Figura 18. Niveles jerárquicos de los criterios del <i>IMCV</i>	52
Figura 19. Estructura jerárquica de Dominios, Temas e Indicadores del <i>IMCV</i>	53
Figura 20. Escala de evaluación de criterios de <i>IMCV</i>	54
Figura 21. Ejemplo de tabla de evaluación de los temas del <i>IMCV</i>	55
Figura 22. Visualización de red, links, conectores y tipos de vía modelados.	64
Figura 23. Red Corredor Calle 5 dibujada en VISTRO© para balanceo.	66
Figura 24. Desempeño de dominios del <i>IMCV</i> , sentido N-S.	71
Figura 25. Desempeño de dominios del <i>IMCV</i> , sentido S-N.	73
Figura 26. Desempeño de indicadores del tema <i>Fluidez y circulación del tráfico mixto</i> , sentido N-S	74
Figura 27 . Desempeño de indicadores del tema <i>Fluidez y circulación del tráfico mixto</i> , sentido S-N	75
Figura 28. Porcentajes de diferencia normalizados para el Acceso N-S de la intersección Calle 5 con Carrera 27.	76

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ciclo-bandas: Ventajas e inconvenientes o desventajas.....	2
Tabla 2. Principios para el diseño de calles urbanas según NACTO, 2013.	7
Tabla 3. Principios y metas para el diseño de calles, según NYSDOT, 2015.	7
Tabla 4. Principios y metas para la reconstrucción de calles arteriales, según Svensson, 2004.	8
Tabla 5. Categorías e indicadores de sostenibilidad en modelo MOSAIC.	9
Tabla 6. Medidas de eficiencia para la definición de los niveles de servicio.	19
Tabla 7. Conceptos básicos.	19
Tabla 8. Definiciones específicas de vías ciclistas.	20
Tabla 9. Definiciones específicas de vías ciclo-adaptadas.	20
Tabla 10. Criterios de comparación de volúmenes horarios por <i>GEH</i>	34
Tabla 11. Criterios de comparación de volúmenes horarios para categorías de modelo E y F.	34
Tabla 12. Revisión bibliográfica de metodologías de evaluación de desempeño de calles.	37
Tabla 13. Dominios o principios identificados.	37
Tabla 14. Parámetros identificados para la evaluación de la movilidad en corredores viales.	38
Tabla 15. Corredores viales seleccionados y sus características.	39
Tabla 16. Intersecciones para acotación de corredores y sus accesos para evaluación.	41
Tabla 17. Relación de escenarios de corredores viales.	41
Tabla 18. Resultados calibración <i>GEH</i>	47
Tabla 19. Porcentajes de cambio para el Acceso S-N de la Calle 16 con Carrera 98.	47
Tabla 20. Porcentajes de cambio ponderados para el Acceso S-N de la Calle 16 con Carrera 98.	48
Tabla 21. Estructura jerárquica de criterios de <i>IMCV</i> y respectivos pesos.	56
Tabla 22. Escala de evaluación para el indicador 1.1.2 – Nivel de ruido equivalente.	57
Tabla 23. Escala de evaluación para el indicador 4.2.1 – Velocidad media de ciclo-usuarios.	57
Tabla 24. Valores globales de los criterios y del índice <i>IMCV</i>	59
Tabla 25. Elementos de evaluación de VISSIM© para cálculo de indicadores.	62
Tabla 26. Líneas de transporte público modeladas.	67
Tabla 27. Resultados calibración <i>GEH</i>	68
Tabla 28. Puntuaciones de indicadores y valores <i>IMCVg</i> para escenarios, sentido N-S.	69
Tabla 29. Puntuaciones de indicadores y valores <i>IMCVg</i> para escenarios, sentido S-N.	70
Tabla 30. Resultados de <i>IMCVg</i> para la Calle 5, sentido norte-sur.	71
Tabla 31. Porcentajes de diferencia de <i>IMCVd</i> y <i>IMCVg</i> respecto a esc. CB = 0,0, sentido N-S.	72
Tabla 32. Porcentajes de diferencia de <i>IMCVd</i> y <i>IMCVg</i> respecto a esc. CB = 0,0, sentido S-N.	73

RESUMEN

Este trabajo describe el proceso para la evaluación del impacto sobre la movilidad en corredores viales debido a la inclusión de ciclo-bandas, discutiendo aspectos importantes de su aplicación metodológica como herramienta de apoyo para la planificación y gestión de la movilidad. La evaluación se basa en parámetros que condicionan la movilidad desde dimensiones sociales, económicas, ambientales, operativas, entre otras. Se presenta un análisis de caso sobre el corredor Calle 5 entre Carrera 56 y Carrera 15 en la ciudad de Santiago de Cali, validado a partir de un índice de movilidad urbana sostenible y variables correlacionadas correspondientes a los elementos que componen el sistema Corredor Vial. La evaluación de impactos a partir de una metodología con bases técnicas es una herramienta fundamental en la formulación de políticas que promuevan la movilidad urbana sostenible.

Palabras clave: inclusión de ciclo-banda, índice de movilidad, reducción de anchos de carril, movilidad sostenible.

1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la ciudad de Santiago de Cali hoy por hoy supone grandes retos: atender las necesidades de movilidad segura y eficiente de las personas, los bienes y los suministros; disminuir las emisiones de gases efecto invernadero, cambiar los métodos de suministro de energía, incentivar la movilidad activa como método de disminución de riesgos asociados al sedentarismo, entre otros.

Todos estos retos han sido contemplados por el Ministerio de Transporte, teniendo como premisa la promoción de modos activos de movilización, cuyo pilar fundamental es la construcción y la implementación de una infraestructura segura, eficiente y confortable para usuarios de la bicicleta. Es por eso que en Julio del año 2006 se decreta la Ley 1083, que en su artículo 1 establece un nuevo enfoque de movilidad sostenible para los Distritos y Municipios con Planes de Ordenamiento Territorial, en el cual se da prioridad a los modos de transporte más sostenibles como lo son el peatón, la bicicleta y el transporte público optimizado.

De acuerdo a este enfoque de movilidad sostenible, se ha formulado en la ciudad de Santiago de Cali el Plan Integral de Movilidad Urbana PIMU – Visión 2028, un instrumento maestro de planificación de la movilidad urbana, que en el marco de la Política Pública de Movilidad Sostenible tiene como objetivo general fomentar un modelo de movilidad multimodal e intermodal que otorgue a los modos de transporte público optimizados y los modos no motorizados (peatón y bicicleta) prioridad sobre el transporte privado, fomente la seguridad vial y garantice la accesibilidad a todos los grupos poblacionales; buscando con ello la mejora de la calidad de vida de los habitantes del Municipio de Santiago de Cali.

Con el fin de fomentar la bicicleta como modo de transporte en la ciudad de Cali, El PIMU presenta un programa que responde a este objetivo. Este programa contempla el mejoramiento y la dotación de ciclo-infraestructura existente, la cual comprende la adecuación e implementación de diferentes tipos de ciclo-infraestructura, entre ellas la ciclo-banda o bici-carril.

La inclusión de esta tipología de ciclo-infraestructura en corredores viales afectará la movilidad e implica un impacto directo para los usuarios de distintos modos de transporte considerados en el modelo conceptual de movilidad del PIMU. De modo que evaluar la implementación de ciclo-bandas con diferentes secciones transversales en los corredores viales, permitirá evaluar la sensibilidad del sistema de movilidad a este tipo de intervención.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

De acuerdo con el principio de movilidad sostenible, El PIMU - Visión 2028 dentro de sus objetivos plantea un programa de fomento de la movilidad en bicicleta que incluye diversas acciones encaminadas al fomento del modo de transporte en los diversos sectores de la ciudad mediante la dotación, mejoramiento y optimización de la red de ciclo-infraestructura de la ciudad y sus servicios asociados. El programa se compone de subprogramas formulados con base en la identificación de las necesidades respecto a la oferta de ciclo-infraestructura y servicios del modo bicicleta, y respecto al estímulo a la demanda para potenciar un mayor uso de este medio de transporte.

Uno de los subprogramas contemplados dentro del mencionado programa es el “Mejoramiento y dotación de ciclo-infraestructura para la accesibilidad territorial y la

intermodalidad con el transporte público”, el cual tiene como objetivo dotar a la ciudad de una red de ciclo-infraestructura para los viajes unimodales e intermodales (bicicleta/transporte público), ya sea para los viajes de movilidad obligada (viajes relacionados con trabajo o estudio) y no obligada (viajes relacionados con compras, servicios u ocio), los cuales representan un 4,5% de participación en la repartición modal, donde en un día típico se realizan 162.211 viajes en bicicleta (Gleave, S. D., 2015). Este subprograma responde a las actuales necesidades de los ciclistas, reflejadas en falencias en cuanto a condiciones de superficie de rodadura, señalización horizontal, iluminación, estacionamientos y vegetación. Debido a esta falta de infraestructura física para la bicicleta, la ausencia de señalización, la falta de cultura vial y otros factores, ser ciclista en Santiago de Cali es un reto en materia de seguridad. Según reportes en prensa, en el año 2017, cuatro ciclistas sufrieron accidentes de tránsito en Cali (periódico el Tiempo, 2017) y según el Observatorio de Movilidad Sostenible y Seguridad vial, en el año 2015 y 2016 se registraron 32 víctimas mortales producto de accidentes de tránsito.

La dotación de ciclo-infraestructura comprende la adecuación e implementación de diferentes tipos de ciclo-infraestructura, entre ellas la ciclo-banda o bici-carril, este carril o senda se ubica sobre la calzada o andén, segregada del tránsito vehicular o peatonal solo por demarcación y/o delineadores horizontales. La ciclo-infraestructura de este tipo tiene unas virtudes e inconvenientes a considerar las cuales se mencionan en la Tabla 1.

Tabla 1. Ciclo-bandas: Ventajas e inconvenientes o desventajas.

Ventajas	Inconvenientes o desventajas
- Fácil Implementación. - Costo mínimo de implantación y reposición. - Flexibilidad de uso por parte de ciclistas. - Buenas condiciones de visibilidad en intersecciones. - Permite circular de modo seguro a altas velocidades.	- Propensión al uso indebido por vehículos circulando o estacionados. - Baja percepción de seguridad, especialmente para ciclistas con poca experiencia. - Mayor exposición de ciclistas a emisiones contaminantes y acústicas. - Fricción con las paradas de autobús. - Aumento del ancho de la calzada, puede conducir a secciones urbanísticamente desequilibradas.

Fuente: Adaptado de Ministerio de Transporte de Colombia. (2016). Despacio: *Guía de ciclo-infraestructura para ciudades colombianas*.

La inclusión de las ciclo-bandas implica un impacto a la movilidad que podrá verse asociado a diferentes aspectos como: accesibilidad; medioambientales, sociales y políticos; infraestructura de transporte, modos no motorizados, planeamiento integrado, circulación de tráfico, sistemas de transporte, entre otros. De estos aspectos caracterizadores del estado de la movilidad de un sistema, se puede identificar un subconjunto de aspectos con los que es posible realizar un análisis del impacto a la operación, sin que llegue a ser ajeno del análisis a la movilidad. Debido al carácter geométrico y técnico del problema, la evaluación del impacto a la movilidad se sostiene principalmente en un análisis de impacto a la operación del sistema corredor, la cual podrá verse asociada a indicadores como demora, longitud de cola, tiempos de viaje, entre otros; que complementados con indicadores como la accesibilidad universal, emisiones de gases contaminantes, consumo de combustible, distribución de la infraestructura de transporte, reducción de viajes e intermodalidad de los mismos, calidad de vida, ocupación vehicular y otros, complementan las herramientas caracterizadoras y descriptoras para realizar el análisis de impacto a la movilidad.

Conocer de forma técnica los cambios operacionales de un corredor vial debido a diferentes reducciones de la sección transversal se traduce en el planteamiento de una metodología que permita analizar la sensibilidad del corredor vial bajo diferentes escenarios, además de

reconocer el impacto que pueda generar a los modos de transporte contemplados en el concepto de movilidad de una unidad geográfica. Este análisis debe permitir describir el corredor a partir de variables y parámetros que puedan ser medidas y comparadas, para que de acuerdo con criterios técnicos se pueda evaluar la viabilidad técnica de la inclusión de ciclo-bandas.

De acuerdo con lo anterior, se plantea la siguiente pregunta que sintetiza los objetivos del proyecto.

¿Cuál es el impacto sobre la movilidad en corredores viales debido a la inclusión de ciclo-bandas?

1.2 OBJETIVOS

- Objetivo general:

Evaluar el impacto sobre la movilidad en corredores viales debido a la inclusión de ciclo-bandas.

- Objetivos específicos:

- Identificar los parámetros que condicionan la evaluación de impactos sobre la movilidad.
- Caracterizar las condiciones de movilidad del corredor vial de la Calle 5 entre Carrera 56 y Carrera 15.
- Evaluar las condiciones de movilidad del corredor vial de la Calle 5 entre Carrera 56 y Carrera 15 con relación a cambios en la sección transversal (escenarios) debido a la inclusión de ciclo-bandas.
- Analizar los impactos y la sensibilidad sobre la movilidad para los diferentes escenarios planteados.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El carácter de los resultados que se pueden obtener a partir del proyecto es de interés social y técnico-administrativo. La evaluación del impacto a la movilidad en los corredores viales donde se contemple la inclusión de ciclo-bandas, conlleva a una serie de modificaciones en la operación del corredor que impactará a los diferentes usuarios de los modos de transporte considerados en el modelo conceptual de movilidad del PIMU Visión 2028.

De acuerdo a la *Guía para el desarrollo de instalaciones para bicicletas* de la AASHTO (2012), cuando el ancho transversal de la calzada no es suficiente para acomodar la infraestructura de la ciclo-banda y se debe considerar una reducción de los anchos de la sección transversal de los carriles, se debe revisar que estas reducciones están comprendidos dentro de los criterios mínimos, de lo contrario tales reducciones deben estar respaldadas por un análisis técnico de ingeniería debidamente documentado, siendo este un argumento de peso técnico para el desarrollo del proyecto.

Desde el punto de vista administrativo, los resultados obtenidos para los diferentes escenarios podrán ser consultados y tomados a consideración como un referente en cuanto para la toma de decisiones respecto a la implementación de ciclo-bandas. El presente proyecto propone además definir una metodología que permita estudiar de forma técnica un corredor vial bajo intervenciones que modifiquen el ancho de la sección transversal del carril mixto, es

decir, se plantea una metodología que permitirá a entidades como la Secretaría de Movilidad realizar evaluaciones para diferentes casos o corredores donde se considere una intervención.

En lo que respecta a Metro Cali S.A, será un producto de interés en el sentido que la articulación de distintos modos de transporte como el sistema MIO y el proyectado modo de transporte a construir sobre las ciclo-bandas, serán modelados en distintos escenarios que arrojan indicadores que permitirán prever impactos de forma anticipada y orientar la toma decisiones o la ejecución de estas.

En general, los resultados del presente trabajo de grado son de interés para la Alcaldía de Santiago de Cali y sus dependencias, debido a la seriedad del problema, la importancia de realizar un planeamiento apoyado en datos técnicos y lo que significa llevar a cabo un acertado plan de acción en lo que respecta a la inclusión de ciclo-bandas en la ciudad. Tratar los corredores para identificar los menores posibles impactos generados por la inclusión de ciclo-bandas significa tomar las mejores decisiones para llevar a cabo la implementación de estos proyectos y es por eso que este estudio sería de interés para las entidades mencionadas.

2 ANTECEDENTES

Los antecedentes descritos a continuación referencian investigaciones y estudios asociados a la infraestructura de tipo ciclo-banda, intervenciones asociados al ancho de carril, a la movilidad urbana sostenible y al uso de software de modelación de tráfico vehicular. Estos antecedentes están relacionados en general a la inclusión de ciclo-bandas, a la sensibilidad del tráfico vehicular respecto al ancho del carril y a la modelación y calibración del comportamiento del tráfico vehicular en softwares de simulación.

Infraestructura tipo Ciclo-bandas

- Capacidad y comportamiento en bici-carriles unidireccionales de diferentes anchos (*Capacity and behaviour on one-way cycle tracks of different widths*, Greibe y Buch, 2016). En este estudio se examinó cómo los anchos de bici-carriles unidireccionales influyen el comportamiento, flujo y capacidad del tráfico de bicicletas. Se recolectó información de ocho diferentes tipos de bici-carriles unidireccionales de anchos variados (1.85 m – 2.85 m). Se concluyó que el ancho no afecta la capacidad a menos que el número de carriles sea reducido o incrementado, sin embargo, la dispersión de la velocidad se reduce considerablemente cuando se presentan volúmenes altos. De forma general, Greibe y Buch concluyen que la velocidad de los bici-usuarios se incrementa a medida que el ancho del bici-carril aumenta.
- Bici-carriles y carriles: un estudio antes y después (*Bicycle tracks and lanes: A before-after study*, Jensen, S. U., 2008). Se realiza una investigación tipo antes y después asociada a accidentes de tránsito tomando como referencia la intervención a carriles debido a la implementación de bici-carriles. Se concluyó que los efectos de seguridad por implantación de bici-carriles produjo un controversial aumento de accidentes y heridos del 10% en Copenhague, Dinamarca (porcentaje asociado a los ciclo-usuarios). Sin embargo, las implementaciones de estas facilidades de transporte resultan en más tráfico de bicicletas y menos tráfico vehicular, contribuyendo a beneficios asociados a la actividad física, menor contaminación del aire, menos ruido por tráfico y menor consumo de combustible. Jensen menciona que los resultados de seguridad pueden estar asociados a múltiples factores de las dinámicas de los diferentes modos de transporte, como el aumento en la velocidad del tráfico no-motorizado debido a la disminución del tráfico vehicular y el cambio en la distribución de edades de la composición de los ciclistas.

Intervenciones asociadas a la sección transversal (ancho de carril)

- Efecto del ancho del carril en la capacidad vial bajo condiciones de tráfico mixto en India (*Effect of lanes width on capacity under mixed traffic conditions in india*, Chandra y Kumar, 2003). Se recolectó información en diez secciones de vías de dos carriles con anchos de calzada entre 5.5 y 8.8 metros. El flujo vehicular se clasificó en nueve categorías y se estimó el factor de equivalente vehicular (FEV) tomando como referencia el automóvil. Se encontró que el FEV de cada tipología se incrementa linealmente con el ancho de la calzada. Esto se atribuyó a la libertad de movimiento en carreteras más anchas y, por lo tanto, a un mayor diferencial de velocidad entre un automóvil y un tipo de vehículo. Respecto a la capacidad vial, se encontró que aumentar el ancho de carril de 3.0 a 3.3 metros, corresponde a un aumento aproximado del 14% de la capacidad vial, mientras que un incremento del ancho de carril de 3.0 a 3.6 metros

resulta en un incremento aproximado del 26% de la capacidad vial, tomando como referencia el volumen flujos vehiculares equivalentes. Además de la relación lineal entre ancho de calzada y capacidad vial se concluyó que la reducción de anchos de carril no provee un adecuado margen de error para el comportamiento vehicular y, por lo tanto, las velocidades de los vehículos disminuyen.

- Relación entre el ancho del carril y la seguridad en arterias urbanas y suburbanas (*Relationship of lane width to safety on urban and suburban arterials*, Potts I. B. et al., 2007). En esta investigación de arterias urbanas y suburbanas se estudiaron 3.031 secciones transversales y 1.342 intersecciones semaforizadas en los estados de Minnesota y Michigan. Se concluyó que no hay indicios de un aumento en la frecuencia de accidentes debido a la reducción del ancho del carril y a cambios geométricos en intersecciones semaforizadas. Sin embargo, sugiere que hay situaciones en las que el uso de carriles más estrechos puede proporcionar beneficios en las operaciones de tráfico, la seguridad de los peatones o la interferencia reducida con el desarrollo circundante. Los resultados del análisis indicaron que los carriles estrechos se pueden utilizar generalmente para obtener estos beneficios sin comprometer la seguridad.
- Proceso explícito e implícito en la adaptación del comportamiento al ancho de la vía (*Explicit and implicit processes in behavioural adaptation to road width*, Lewis-Evans y Charlton, 2006). El estudio analiza la adaptación del comportamiento vehicular a través de un simulador de conducción para interpretar la influencia de los anchos de carreteras en la velocidad y los desplazamientos laterales. Los resultados indicaron significantes efectos en la velocidad y la posición en el carril. Los carriles de ancho reducido están asociados a velocidades bajas y posiciones en el carril más alejadas de sus bordes, mientras que en carriles más anchos se presentaban velocidades más altas y posiciones en el carril más cercanas al borde. La investigación también señala que estos impactos están asociados a percepciones de riesgo que son implícitas para los conductores.

Movilidad urbana sostenible

- Un índice de movilidad urbana sostenible (*Um índice de mobilidade urbana sustentável*, Costa, M. D. S., 2008). La investigación identifica los conceptos que estructuran la referencia de movilidad urbana sostenible y desarrolla una herramienta para el diagnóstico y monitorización de la movilidad urbana. El estudio propone bases para la construcción de índices de movilidad sostenible validada a partir de la construcción del Índice de Movilidad Urbana Sostenible para ciudades brasileñas (*IMUS*), constituyéndose de una jerarquía de criterios, un sistema de pesos para identificar importancias relativas, un método de agregación matemática, escalas de evaluación para los criterios, entre otros procedimientos.
- Guía de diseño de calles urbanas (*Urban street design guide*, National Association of City Transportation Officials – NACTO, 2013). La guía expone principios de diseño y estrategias contemporáneas adoptadas por ciudades de acuerdo a las necesidades de las calles y sus usuarios. La guía tiene como fundamento que las calles son espacios de uso para la gente. En la Tabla 2 se exponen los cinco principios que establecen las metas primarias para el diseño de calles urbanas.

Tabla 2. Principios para el diseño de calles urbanas según NACTO, 2013.

Principios	Comentario
"La calle es un espacio público"	Las calles no sólo deben ser diseñadas como canales para el movimiento vehicular, sino que también como espacios que propicien el encuentro de sus comunidades
"Una buena calle es buena para el comercio"	Calles bien diseñadas generan ganancias más grandes para los negocios, además de valorizarlos.
"Las calles son diseñadas a favor de la seguridad"	Las calles se deben diseñar para que, sin importar el modo de transporte y su motivo de viaje, los usuarios se puedan mover con seguridad a través y a lo largo de la calle.
"Las calles pueden ser cambiadas para dar gestión a su forma y a la movilidad"	Es necesario que los ingenieros de transporte, planificadores y otros profesionales tengan la capacidad de ser flexibles ante la posibilidad de intervenir un espacio vial para redistribuir de mejor manera los usos entre los diferentes modos de transporte.
"La calle es un ecosistema"	Al hablar de las calles como ecosistemas es importante tener presente que las calles son elementos que intervinieron el paisaje natural de un sector específico que a su vez está sujeto a los factores climáticos.

Fuente: Elaboración propia con base en la Guía de diseño de calles de NACTO, 2013.

- Manual de diseño de calles (*Street Design Manual*, New York City Department of Transportation – NYSDOT, 2015). Este manual señala que las condiciones de las calles tienen un significativo impacto en la salud ambiental de la ciudad y en la calidad de vida de sus residentes. El manual está basado en el pensamiento actual sobre el diseño de calles, materiales, iluminación e implementación de proyectos en todo el mundo para promover un gran ámbito público. Aboga por el diseño sostenible de alta calidad y alienta al uso de modos no convencionales. Tomando como referencia este manual de diseño, se presentan en la Tabla 3 los principios y metas que deben ser pilares en el diseño de calles urbanas, de modo que se alcance una inclusión máxima, además de cumplir los más altos estándares estéticos.

Tabla 3. Principios y metas para el diseño de calles, según NYSDOT, 2015.

Principios	Metas
Seguridad	- Brindar seguridad a los usuarios, en especial los más vulnerables - Diseñar calles locales para bajas velocidades - Investigar, ensayar, evaluar tratamientos innovadores de seguridad
Accesibilidad y Movilidad	- Dar facilidades para diferentes modos de transporte - Acomodación de tráfico pesado y parqueo en vía - Acomodación y acceso a vehículos de emergencia
Contexto (Urbanismo)	- Preservar el carácter de uso de suelo adyacentes a las vías - Apoyar conectividad y accesibilidad a peatones - Mantener la consistencia estética entre la calle y suelos adyacentes
Espacio público	- Aprovechamiento de espacio público abierto usable - Diseñar calles para fomentar la actividad física a pie y en bicicleta
Sostenibilidad y resiliencia	- Uso de materiales resilientes frente aguas lluvias - Reducción de tasa de absorción de calor por medio de árboles - Minimizar huella ecológica de proyectos de infraestructura vial
Costo/Eficiencia	- Calles diseñadas para responder a necesidades del futuro - Idear proyectos y objetivos de forma clara y consistente

Fuente: Elaboración propia con base en el Manual de diseño de Calles de NYSDOT, 2015.

- Calles arteriales para personas. Guía para planificadores y tomadores de decisiones al reconstruir calles arteriales (*Arterial streets for people. Guidance for planners and decision makers when reconstructing arterial streets*, Svensson, Å., 2004). Este reporte

menciona nuevas formas de pensamiento sobre como las calles arterias son conceptualizadas, diseñadas y gestionadas, como parte del sistema de calles. El informe está dirigido principalmente a las autoridades de la ciudad, constructores de políticas y consultores con la responsabilidad del diseño y gestión de calles, dando conceptos y técnicas generales que pueden ser adaptadas en diferentes contextos. La guía tiene como principios y metas de sus orientaciones las mencionadas en la siguiente Tabla 4.

Tabla 4. Principios y metas para la reconstrucción de calles arteriales, según Svensson, 2004.

Principio	Metas	Indicador
Sostenibilidad social	Seguridad de ocupantes de vehículos	Accidentes de tránsito
	Seguridad de peatones	Accidentes peatonales
	Velocidad vehicular	Alcance del percentil 85 de velocidad
Sostenibilidad económica	Eficiencia de movimiento a lo largo de la calle	Tasa de flujo de personas
	Demora a lo largo de la calle	Demoras tanto para vehículos como para peatones
Sostenibilidad ambiental	Calidad del aire	Concentración de contaminantes relevantes

Fuente: Elaboración propia con base en Svensson, Å., 2004.

- Planificación integral de corredores viales con indicadores de sostenibilidad (*Comprehensive highway corridor planning with sustainability indicators*, Zhang, L. y Ferrari, N., 2013). La Administración de Autopistas del Estado de Maryland (*The Maryland State Highway Administration – SHA*), inició en el año 2011 esfuerzos para mejorar la eficiencia del transporte, la seguridad y la sostenibilidad de corredores viales tipo autopistas. Con autoría de Zhang, se desarrolló un ‘Modelo de sostenibilidad e integración de corredores’ (*Model of Sustainability and Integrated Corridors – MOSAIC*), identificando opciones de mejora de la sostenibilidad del corredor, además de identificar estrategias e indicadores para mejorar aspectos de movilidad, seguridad y aspectos socioeconómicos y ambientales. Además de desarrollar un modelo con indicadores de sostenibilidad, se provee una herramienta de análisis para integrar seguridad, movilidad, medio ambiente y objetivos socioeconómicos, con el fin de proveer al SHA un proceso o metodología de planeación para evaluar alternativas de intervención. El modelo MOSAIC define indicadores de sostenibilidad, analiza el impacto a la sostenibilidad del corredor a partir de mejoras e identifica necesidades tempranas de mitigación de impactos para el proceso de planeación y gestión. Las categorías de sostenibilidad incluyen movilidad, seguridad, calidad del aire, consumo de energía, impacto a los recursos naturales, contaminación, aspectos socioeconómicos y costos. En la Tabla 5 se muestra el modelo MOSAIC, sus categorías e indicadores.

Tabla 5. Categorías e indicadores de sostenibilidad en modelo MOSAIC.

Principios/Categorías	Estrategias/Indicadores
Movilidad	Tiempo de viaje
	Demora
	Velocidad
	Nivel de servicio
	Fiabilidad del viaje
Seguridad	Conteo y tasa de accidentes
	Severidad de accidentes
Impacto socioeconómico	Impacto económico
	Compatibilidad con uso de suelo
	Habitabilidad
	Ruido
	Estética
	Compatibilidad con modos de transporte sostenibles
Costos	Costos
Energía y emisión	Emisiones contaminantes
	Consumo de combustible
Recursos naturales	Cantidad y grado de disturbios ambientales

Fuente: Elaboración propia, adaptado de Zhang, L., 2013.

- Indicadores de transporte sostenible: un programa de investigación recomendado para el desarrollo de indicadores y datos de transporte sostenible (*Sustainable transportation indicators: a recommended research program for developing sustainable transportation indicators and data*, Litman, T. A., 2009). Se identifican indicadores que pueden ser usados para la evaluación del transporte sostenible. El documento presenta definiciones y conceptos relacionados con el transporte sostenible, describe factores a ser considerados en el momento de seleccionar indicadores, y aspectos relacionados con la calidad de la información junto con recomendaciones para la toma de datos en campo.

Uso de software como herramienta para calibración

- Metodología para la calibración de tráfico mixto en VISSIM© (Methodology for the calibration of VISSIM in mixed traffic, Manjunatha, P. et al., 2013). Este estudio incluye la identificación y observación de características únicas del tráfico mixto y las técnicas para incorporarlas en la microsimulación. Los resultados obtenidos después de calibrar sugirieron mejoras y acercamientos al comportamiento vehicular, esto se logró a partir de la modificación de los valores por defecto que el software VISSIM© emplea. Parámetros como el espaciamiento lateral y longitudinal o de seguimiento fueron calibrados a valores más bajos que los valores por defecto presentes en el software, reflejando la compacidad del tráfico mixto de las intersecciones y sus accesos estudiados.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 LA INGENIERÍA DE TRÁNSITO

La ingeniería de tránsito es conceptualizada por Kraft et al. (Instituto de Ingenieros de Transporte, 2009), como la fase de la ingeniería de transporte que relaciona la planeación, el diseño geométrico y la operación del tránsito por las calles y carreteras, sus redes, terminales, tierras adyacentes y su relación con otros modos de transporte. La ingeniería de tránsito, como una ciencia definida y estructurada, ha permitido el estudio de las variables propias del tráfico en las ciudades. Se ha enfocado principalmente en el estudio de los elementos del tránsito: conductor, peatón, vehículo, vía, señalización y dispositivos de control del tráfico, y la caracterización y estudio del comportamiento de las llamadas variables macroscópicas del tránsito: volumen vehicular, velocidad y densidad, así como la relación existente entre elementos y variables. Del estudio de estos componentes, tanto en flujos vehiculares como en flujos peatonales, en áreas urbanas y rurales, se desprende la mayoría de las soluciones empleadas hoy en día para el tratamiento de problemas de tráfico como la congestión, las demoras, los tiempos de viaje, el nivel de servicio y la accidentalidad.

3.1.1 Corredor Vial

De acuerdo con el manual de capacidad vial (Highway Capacity Manual, HCM (2010)), un corredor es generalmente un conjunto de facilidades paralelas de transporte diseñadas para el tránsito de diferentes modos de transporte entre dos lugares o zonas. El corredor puede incluir diversas configuraciones viales, puede ser desde una calle hasta una autopista, presentando internamente a su vez elementos tipo nodos – intersecciones viales, rotondas, rampas y segmentos; carriles o calzadas de uso exclusivo para transporte de buses, ciclo-infraestructura, etc. En la Figura 1 se ilustra de forma esquemática los componentes típicos de un corredor.

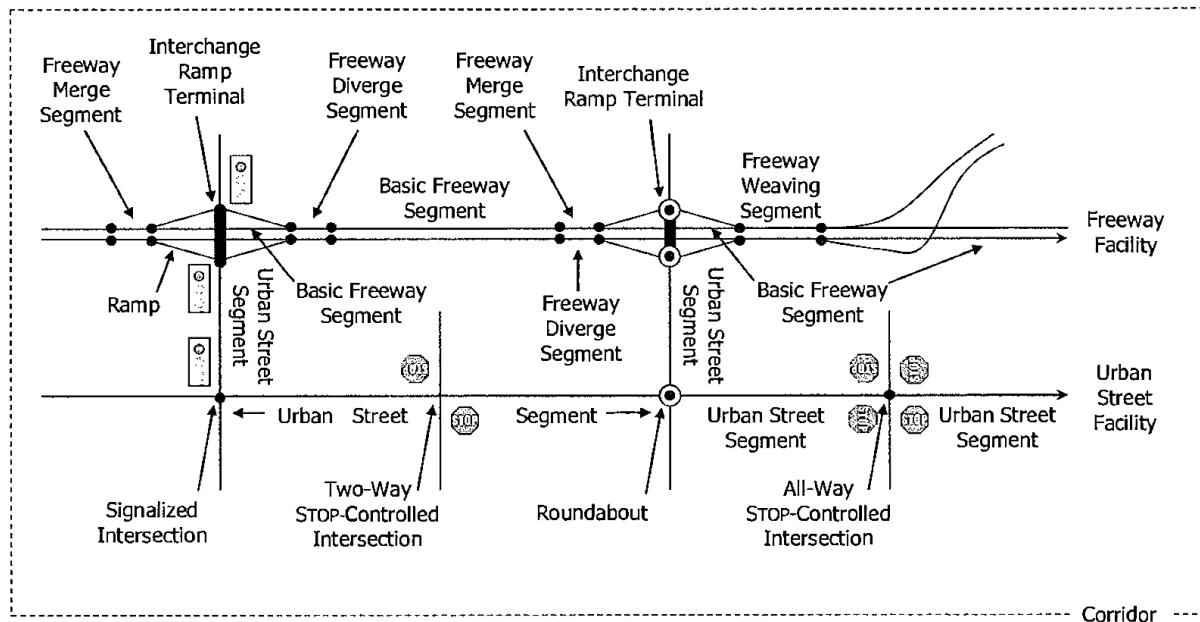


Figura 1. Componentes típicos de un corredor.

Fuente: HCM (2010).

El análisis de un corredor requiere su división en elementos tipo segmento o nodo, reconociendo además a qué tipo de configuración vial corresponde cada elemento. Los procedimientos recomendados para evaluar un corredor implican la evaluación de los segmentos y nodos en cada dirección de flujo existente durante varios periodos de tiempo. Los resultados en líneas de espacio y tiempo se agrupan para obtener las estadísticas de desempeño del corredor.

Los nodos corresponden a límites establecidos para realizar el análisis al corredor, estos son llamados 'puertas' (en inglés, *gates*). Como su nombre lo indica, las puertas son puntos de entrada y salida al corredor, asociados a zonas de generación y atracción de viajes que simplifican la previsión de demanda de tráfico para el corredor. A lo largo del corredor vial, las puertas corresponden a calles que generalmente representan elementos de convergencia y divergencia de viajes. De acuerdo al HCM (2010) estas calles establecen condiciones de demanda y capacidad de tráfico constantes relativamente constantes a lo largo del corredor. Cuando el corredor vial es limitado o acotado por nodos de tipo intersección vial, los accesos y salidas a la intersección y al corredor, representan las puertas para el corredor vial.

Para estimar las medidas de desempeño de elementos individuales de sistemas multimodales de transporte, el HCM (2010) provee herramientas o guías para este análisis. Generalmente, estos análisis propuestos tienen como medida de desempeño general el nivel de servicio (LOS – *Level Of Service*, por sus siglas en ingles), sin embargo, de acuerdo al modo de transporte y el elemento de infraestructura vial, el nivel de servicio combina diferentes medidas e indicadores para generar su valor final. A continuación, se expone en la Figura 2 las medidas de servicio para diferentes modos y elementos de un sistema.

System Element	HCM Chapter	Service Measure(s)				Systems Analysis Measure
		Automobile	Pedestrian	Bicycle	Transit	
Freeway facility	10	Density	--	--	--	Speed
Basic freeway segment	11	Density	--	--	--	Speed
Freeway weaving segment	12	Density	--	--	--	Speed
Freeway merge and diverge segments	13	Density	--	--	--	Speed
Multilane highway	14	Density	--	LOS score ^a	--	Speed
Two-lane highway	15	Percent time-spent-following, speed	--	LOS score ^a	--	Speed
Urban street facility	16	Speed	LOS score ^a	LOS score ^a	LOS score ^a	Speed
Urban street segment	17	Speed	LOS score ^a	LOS score ^a	LOS score ^a	Speed
Signalized intersection	18	Delay	LOS score ^a	LOS score ^a	--	Delay
Two-way stop	19	Delay	Delay	--	--	Delay
All-way stop	20	Delay	--	--	--	Delay
Roundabout	21	Delay	--	--	--	Delay
Interchange ramp terminal	22	Delay	--	--	--	Delay
Off-street pedestrian-bicycle facility	23	--	Space, events ^b	LOS score ^a	--	Speed

Notes: ^a See Exhibit 2-3 for the LOS score components.

^b Events are situations where pedestrians meet bicyclists.

Figura 2. Medidas de servicio de acuerdo al modo y el elemento vial.

Fuente: HCM (2010).

3.1.1.1 Clasificación de acuerdo a la función

Un corredor vial es generalmente un foco para la actividad y el desarrollo urbano y es mucho más que una simple vía en un área urbana. Según Svensson Å. (2004), un corredor vial es también un lugar urbano con una identidad y un carácter; un ambiente físico; un espacio social. Esta facilidad vial puede desempeñar una gran variedad de roles cívicos, políticos, culturales y sociales, además de desempeñar un rol económico y comercial.

El uso del espacio-calle es importante para reconocer la importancia de los actores que van 'desde a hacia' (quienes van a lo largo de la calle para ir del punto A al punto B) y los actores que van 'a través' (quienes buscan hacer uso de una sección particular de la calle). La diferenciación se remite al estatus de análisis que se le dé a la calle, si es entendida como un link o como un área.

- **Estatus de arco (*link*):** el estatus de link denota la importancia del corredor como un arco dentro de una red. Está efectivamente basada en su escala de significancia dentro de una red a la cual pertenece, por ejemplo: calles de acceso local, calles colectoras, calles arteriales, etc.
Para la perspectiva de la gente, es importante no solamente asociar el estatus de link en términos de tráfico motorizado, sino también en términos de tráfico no motorizado (ciclistas y peatones). La operación debe enmarcar diferentes formas de movimiento a lo largo del corredor. Sin embargo, la importancia para cada modo de transporte es determinado por su rol dentro de la estructura de red o la infraestructura vial y sus usos de suelos inmersos o adyacentes. En la Figura 3 se ilustra de forma esquemática el corredor vial como estatus de link.



Figura 3. Esquema de corredor vial como estatus de link.

Fuente: Svensson, Å. (2004).

- **Estatus de área:** el estatus de área o lugar denota la importancia relativa de un corredor como un lugar urbano en una completa área urbana. Por ejemplo, una vía puede desempeñar un rol de ciudad-red o simplemente un rol de lugar o espacio urbano. Considerar un corredor vial como un área da lugar a reconocerle un "uso de suelo", un 'origen' y un 'destino', permitiendo pensar que los movimientos no sólo están presentes 'a lo largo' de la vía, sino que también se presentan de forma transversal dentro de la misma.
Conceptualizando las calles como áreas de dos dimensiones, se puede apreciar mejor el alcance y el potencial del espacio-calle para acomodar usos y usuarios en un sentido más amplio que el del flujo de tránsito longitudinal. A continuación, se muestra en la Figura 4 un esquema de corredor siendo interpretado como un área.

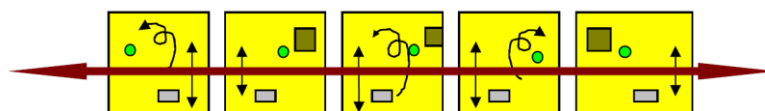


Figura 4. Esquema de corredor vial como estatus de área.

Fuente: Svensson, Å. (2004).

3.1.1.2 Sostenibilidad del desempeño de una calle

De acuerdo con Svensson, Ä. (2004), la sostenibilidad en una calle está compuesta por la sostenibilidad social, económica y ambiental. En conexión a las dos dimensiones de clasificación por función se puede resumir lo siguiente.

- **Sostenibilidad de la función como link:** significando eficiencia, seguridad y modos de transporte amigables con el ambiente.
- **Sostenibilidad de la función como lugar:** significando que las personas pueden usar la vía no tan solo para actividades de tráfico, y que la calle provee un ambiente seguro y saludable para esas actividades.

3.1.2 Características del flujo de tráfico

El flujo de tráfico está compuesto de conductores individuales y vehículos que interactúan entre sí con los elementos físicos y su ambiente en general. Debido a que el comportamiento y las características vehiculares varían de forma individual, los vehículos dentro del flujo de tráfico no se comportan exactamente de la misma forma, como también dos flujos de tráfico no se comportarán de la misma forma, incluso bajo las mismas circunstancias, esto se da porque el comportamiento del conductor varía de acuerdo a las características locales y los hábitos de conducción.

Describiendo el flujo de tráfico en términos cuantitativos, el propósito es entender la variabilidad de sus características y a su vez definir los rangos normales de comportamiento. Para hacer eso, parámetros claves deben ser definidos y medidos. Los ingenieros de tráfico pueden analizar, evaluar y ultimadamente planear mejoras en las facilidades de tráfico basados en estos parámetros y sus conocimientos de los rangos normales de comportamiento. En las siguientes sesiones se describe de forma general los parámetros más usados y las características normalmente observadas en la descripción y evaluación de los flujos de tráfico. (Roess, R. P. et al., 2004).

3.1.2.1 Tipos de flujo de tráfico

El HCM (2010) realiza la clasificación del flujo de tráfico de acuerdo al tipo de caminos y no a la calidad del flujo de tráfico. Así, una autopista que en un momento dado experimenta un alto grado de congestión, sigue siendo un camino de flujo continuo, las causas del estado de su flujo de tráfico son inherentes a la corriente de tránsito. De acuerdo con HCM (2010), se reconocen dos tipos de flujo de tránsito:

- **Flujo ininterrumpido:** aquel que no tiene interrupciones del flujo de tráfico. Existe principalmente en autopistas donde no hay intersecciones a nivel, control alguno de tráfico como pares y semaforización, u otras interrupciones externas del tráfico. Como una directriz muy general, es normalmente aceptado que el flujo ininterrumpido puede existir en situaciones donde la distancia entre controles de tráfico u otras significantes interrupciones fijas es mayor a dos millas (aproximadamente 3,2 kilómetros)
- **Flujo interrumpido:** aquel que incorpora interrupciones en su diseño y operación. La más frecuente de estas interrupciones es el control semafórico, otros ejemplos son las señales de pare y las maniobras de aparcamiento. Virtualmente, todas las calles y/o vías urbanas presentan flujo interrumpido.

La mayor diferencia entre las configuraciones viales con flujo ininterrumpido e interrumpido es el impacto del tiempo. Cuando hay flujo ininterrumpido las facilidades físicas son

aprovechadas por los conductores y los vehículos en todo tiempo, mientras que para flujos interrumpidos el movimiento es periódicamente suspendido por controles de tráfico.

3.1.3 Parámetros de flujo de tráfico ininterrumpido

Los parámetros de flujo de tráfico caben en dos categorías. Los *parámetros macroscópicos* describen el flujo de tráfico como un todo; los *parámetros microscópicos* describen el comportamiento del vehículo individual dentro del flujo de tráfico.

3.1.3.1 Volumen y tasa de flujo

De acuerdo con Roess, R. P. et al. (2004) el volumen y tasa de flujo son dos medidas que cuantifican la cantidad de tráfico pasando por un punto de un carril o vía durante un intervalo de tiempo definido.

- **Volumen:** es el número total de vehículos que pasan por un punto o sección de un carril o vía durante un intervalo de tiempo definido; los volúmenes pueden ser expresado en términos de años, días, horas o subperiodos de hora.
- **Tasa de flujo:** la tasa de flujo es equivalente a la cantidad de vehículos que pasan por un punto o sección de carril o vía durante un intervalo de tiempo definido de menos de 1 hora, usualmente es de 15 minutos.

En el ámbito de planeación y operación, es fundamental conocer del volumen de tráfico sus variaciones periódicas dentro de las horas de máxima demanda, en las horas del día, en los días de la semana y en los meses del año. Además, es importante también conocer las variaciones de los volúmenes en función de su distribución por carriles, distribución direccional y su composición. (Rafael Cal y Mayor R., & Cárdenas, J., 2010).

3.1.3.2 Velocidad

La velocidad (v) es definida como la relación entre el espacio recorrido (d), y el tiempo que se tarda en recorrerlo (t). La velocidad y el tiempo de viaje están inversamente de acuerdo con la Ecuación (1):

$$v = \frac{d}{t} \quad (1)$$

- **Velocidad promedio de viaje (S):** conocida también como velocidad global o de viaje, es el resultado de dividir la distancia recorrida, desde principio a fin de viaje, entre el tiempo total que se empleó en recorrerla. En este tiempo se incluyen las demoras operacionales provocadas por reducciones de velocidad, detenciones, el tránsito y dispositivos de control, todos ellos ajenos a la voluntad del conductor.
En cuanto a un grupo de vehículos o el flujo de tráfico, la velocidad promedio de viaje es la suma de sus distancias recorridas divididas entre la suma de los tiempos totales de viaje. En caso de que todas las distancias recorridas sean iguales, la velocidad media de recorrida se obtiene dividiendo la distancia recorrida entre el promedio de los tiempos de recorrido.
Con este parámetro se pueden comparar condiciones de fluidez en sucesiones de tramos viales o específicamente en un segmento de vía. A continuación, se expresa su fórmula general en la Ecuación (2):

$$S = \frac{nL}{\sum_{i=1}^n t_i} = \frac{L}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i} = \frac{L}{t_a} \quad (2)$$

Donde:

S = velocidad promedio de viaje (km/h)

L = longitud del segmento de vía (km)

t_i = tiempo de viaje del vehículo i para recorrer la sección L (h)

n = número de tiempos de viaje observados

$t_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$ = tiempo de viaje promedio para L (h)

- **Velocidad de punto:** es la velocidad de un vehículo pasando por un determinado punto de una vía. Se le denomina también velocidad instantánea debido a que el dato se toma en el preciso instante del paso por el punto.

3.1.3.3 Densidad (D)

La densidad es el número de vehículos ocupando un tramo de vía en un instante particular. Es generalmente expresada como vehículos por kilómetro (veh/km) o vehículos por kilómetro por carril (veh/km/carril). La densidad puede ser expresada matemáticamente a partir de la velocidad promedio de viaje y la tasa de flujo, las cuales son medidas con facilidad. La siguiente Ecuación (3) es usada para condiciones de tráfico no saturado.

$$D = \frac{V}{S} \quad (3)$$

Donde:

V = tasa de flujo (veh/h),

S = velocidad promedio de viaje (km/h),

D = densidad (veh/km).

La densidad es un parámetro crítico en el análisis de flujos ininterrumpidos, ya que caracteriza la calidad de las operaciones de tráfico, describe la proximidad entre los vehículos y refleja la libertad de maniobra y el confort psicológico de los conductores. (Roess, R. P. et al., 2004).

3.1.3.4 Espaciamiento e intervalo: parámetros microscópicos

Mientras que el flujo, velocidad y densidad representan descriptores macroscópicos para el flujo de tráfico como un todo, el espaciamiento y avance pueden relacionarse como parámetros microscópicos que describen individualmente al vehículo dentro del flujo de tráfico, o específicamente un par de vehículos dentro del flujo.

- **Espaciamiento:** es definido como la distancia entre vehículos sucesivos en un mismo carril, expresada en metros y medida entre sus defensas traseras. El espaciamiento promedio es el promedio de todos los espaciamientos unitarios o simples existentes entre los diversos vehículos que circulan por una vialidad. Es expresada en metros por vehículo (m/veh).
- **Intervalo:** es definido como el intervalo de tiempo entre vehículos sucesivos avanzando en mismo carril, también medido entre sus defensas traseras, expresado en segundos por vehículo (s/veh).

3.1.4 Parámetros de flujo de tráfico interrumpido

El flujo interrumpido es más complejo que el ininterrumpido debido a la dimensión de tiempo asociada a los conflictos del flujo de tráfico. En un flujo interrumpido, el flujo es usualmente dominado por puntos de control de tráfico como señales de tráfico y de pare, teniendo todas diferentes impactos sobre el flujo en general.

Los estados operacionales del tráfico en corredores dominados por el flujo interrumpido son dominados por las siguientes medidas:

- Volumen y tasa de flujo
- Controles de tráfico
- Colas
- Demoras

La discusión de volumen y tasa de flujo descrita para el flujo ininterrumpido también es aplicable a facilidades viales con flujos interrumpidos, sin embargo, es importante tener en cuenta que los flujos son controlados y limitados por los controles de tráfico, y que en caso la cola de vehículos se extienda por efecto de demanda excediendo la capacidad, hace complejo el análisis de flujo de tráfico, impulsando a realizar observaciones aguas arriba de la congestión. (Roess, R. P. et al., 2004).

3.1.4.1 Control de señales

De acuerdo con el HCM (2010), el control semafórico es el tipo de control de flujo en facilidades viales con tipo de flujo interrumpido más común. Controlan los movimientos existentes en una intersección vial de forma periódica por medio de prohibiciones de movimiento durante intervalos de tiempo, regulando así la salida de vehículos a la intersección y luego a las vías. Debido a que los tiempos de salida están sujetos al cambio, es conveniente expresar la capacidad y las tasas de flujo de tráfico para intersecciones semaforizadas en términos de vehículos por hora (veh/h).

3.1.4.2 Velocidad

Para el flujo interrumpido, la demora, más que la velocidad, es la principal medida de operación. Sin embargo, medidas de velocidad similar a las mencionadas para flujos ininterrumpidos, son de ayuda en la determinación de tiempo de viaje añadidos debido a fenómenos de operación como la desaceleración, los movimientos en colas y la aceleración de vehículos atravesando una intersección. (HCM, 2010).

3.1.4.3 Demoras

Como se mencionó anteriormente, la demora es la medida crítica de desempeño para analizar flujos interrumpidos. La demora es el tiempo perdido por el ocupante de un vehículo, y es también la principal medida de servicio para evaluar el nivel de servicio en intersecciones señalizadas y no señalizadas. El control de demoras involucra varios fenómenos como la reducción de velocidad en movimientos en intersecciones, la aproximación de vehículos al control semafórico, su interacción hacia y dentro la cola, entre otras. Para su determinación, requiere de una velocidad promedio para cada acceso a la intersección. (HCM, 2010).

3.1.4.4 Colas

De acuerdo con el HMC (2010) cuando la demanda excede la capacidad en un acceso a la intersección semaforizada para un tiempo de verde específico, se forma una cola. Puede aparecer cuando durante la fase de rojo para un acceso ocurre un arribo de vehículos que no alcanza a despejar posteriormente el acceso durante la fase de verde. La cola también puede aparecer como consecuencia de las maniobras internas de los vehículos dentro del acceso, como parqueo en vía, detenciones, entre otras.

Las características de la cola pueden ser modeladas a partir de la tasa de llegada, la tasa de servicio y los tiempos del plan de señales. En situaciones de la vida real, la tasa de llegada y la tasa de servicio están cambiando constantemente. Estas variaciones complican el modelo, pero las relaciones básicas no cambian. La longitud de la cola puede ser estimada para propósitos de planeamiento asumiendo la densidad de almacenamiento (densidad promedio de vehículos en la cola) y luego usando la Ecuación (4). Se debe notar que la demanda debe ser más grande que la capacidad para usar esta relación.

$$QL = \frac{T * (v - c)}{N * d_s} \quad (4)$$

Donde,

QL = longitud de cola (km);
 T = duración del periodo de análisis (h);
 v = demanda (veh/h);
 c = capacidad (veh/h);
 N = número de carriles, y
 d_s = densidad de almacenamiento (veh/km/carril).

Se reconocen dos estados de colas: sobresaturado e insaturado (HCM, 2010). En colas sobresaturadas, la tasa de llegada es mayor que la tasa de servicio, bajo esta circunstancia la longitud de la cola se puede extender hasta alcanzar intersecciones aguas arriba, impidiendo el ingreso de vehículos al acceso e incluso provocando iguales condiciones para accesos de intersecciones aguas arriba. En caso de presentarse flujo insaturado, la longitud de cola no alcanzará intersecciones aguas arriba y podrá albergar vehículos con una tasa de llegada específica.

3.1.5 Capacidad vial

La *capacidad* u *oferta* es una medida de la eficiencia con la que un sistema vial presta servicio a una determinada demanda, representando la tasa máxima de flujo a la cual se espera que los vehículos o personas razonablemente puedan pasar por un punto o sección uniforme de un carril o calzada, durante un intervalo de tiempo dado, bajo las condiciones prevalecientes de la infraestructura vial, del medio ambiente, del tránsito y de los dispositivos de control.

Como se expuso en secciones anteriores, las facilidades de infraestructura vial para el flujo de tránsito, puede ser de circulación interrumpida o ininterrumpida. Dependiendo de esta condición se debe establecer un procedimiento para el cálculo de su capacidad y calidad de operación. De acuerdo con lo anterior, el principal objetivo del análisis de capacidad es estimar el máximo número de vehículos o personas que un elemento dentro de un sistema vial puede acomodar con razonable seguridad mientras se mantiene una determinada calidad de operación, introduciéndose aquí el concepto de *nivel de servicio*.

3.1.5.1 Nivel de servicio

El nivel de servicio mide la calidad del flujo vehicular y describe las condiciones de operación de un flujo vehicular (sean motorizados o no motorizados) y de su percepción por el conductor y/o pasajeros. Estas condiciones se describen en términos de factores tales como la velocidad, el tiempo de recorrido, la libertad de realizar maniobras, la comodidad, la conveniencia y la seguridad vial. De estos actores se distinguen dos tipos: los internos y los externos. Los factores internos son aquellos que corresponden a variaciones en la velocidad, en el volumen, en la composición del tránsito, en el porcentaje de movimientos de entrecruzamientos o direccionales, etc. Entre los externos, están las características físicas, tales como el *ancho de los carriles*, la distancia libre lateral, las pendientes. Se identifica entonces que la intervención de la inclusión de las ciclo-bandas representa una modificación en un factor externo que afecta directamente el nivel de servicio. Para determinar el efecto de los factores externos e internos en la capacidad de un elemento de un sistema de infraestructura vial se realiza comúnmente un análisis de capacidad, el cual permite aislar y medir tales factores.

3.1.5.2 Condiciones prevalecientes

La capacidad presenta un carácter probabilístico, por lo que puede ser mayor o menor en un instante dado, estas condiciones prevalecientes son factores que al variar modifican la capacidad. Se agrupan en cuatro tipos generales:

- Condiciones de la infraestructura vial
- Condiciones del medio ambiente
- Condiciones del tránsito
- Condiciones de los controles

De los anteriores tipos, es importante mencionar los factores representativos de las condiciones de la infraestructura vial, éstas son características físicas de la carretera o calle (de tránsito continuo o discontinuo, con o sin control de accesos, dividida o no, de dos o más carriles, etc.), el desarrollo de su entorno, las características geométricas (ancho de carriles, obstrucciones laterales, velocidad de proyecto, restricciones para el rebase, carriles exclusivos y características de los alineamientos), y el tipo de terreno donde se aloja la infraestructura vial. Se identifica que la reducción del ancho del carril mixto representa cambios en el factor del ancho del carril, factor contenido dentro de las condiciones de infraestructura vial. (Rafael Cal y Mayor R., & Cárdenas, J., 2010)

3.1.5.3 Criterios de análisis de capacidad y niveles de servicio

Tradicionalmente se ha considerado la velocidad el principal indicador para identificar el nivel de servicio, sin embargo, los métodos modernos introducen además de la *velocidad*, otros indicadores como la *densidad* para casos de circulación ininterrumpida y la *demora* para caso de circulación interrumpida.

La capacidad de una infraestructura vial es tan variable como las variables físicas del mismo o las condiciones del tránsito. Por esta razón, los análisis de capacidad se realizan aislando las diversas partes del sistema vial, como un tramo recto; un tramo con curvas; un tramo con pendientes; el acceso a una intersección; un tramo de entrecruzamiento; una rampa de enlace; etc. Para estudiar estas diferentes configuraciones se debe buscar en cada una de estas partes, condiciones uniformes, es decir, segmentos con condiciones prevalecientes.

El criterio utilizado para una identificación práctica de los niveles de servicio, de las diversas infraestructuras viales (HCM, 2010), establece que se deben mostrar *medidas de eficiencia* presentadas en la Tabla 6.

Tabla 6. Medidas de eficiencia para la definición de los niveles de servicio.

Tipo de infraestructura vial	Medidas de eficiencia
<i>Autopistas</i>	
Segmentos básicos	Densidad, velocidad, relación volumen-capacidad
Tramos de entrecruzamientos	Densidad, velocidad
Rampas de enlaces	Densidad, velocidad
<i>Carreteras</i>	
Múltiples carriles	Densidad, velocidad, relación volumen-capacidad
Dos Carriles	Velocidad, % de tiempo de seguimiento
<i>Intersecciones</i>	
Con semáforos	Demora por controles
De prioridad	Demora por controles
<i>Arterias urbanas</i>	Velocidad de recorrido
<i>Transporte colectivo</i>	Velocidad de marcha y recorrido, tiempo de espera
<i>Ciclo rutas</i>	Eventos, demoras, velocidad
<i>Peatones</i>	Espacio, eventos, demoras, velocidad

Fuente: Adaptado del HCM (2010).

Cabe resaltar que cada uno de los tipos de infraestructura vial mencionados en la Tabla 6, requiere un cálculo de capacidad y nivel de servicio diferente, propio de las condiciones de operación de la misma infraestructura.

3.1.6 Ciclo-infraestructura

La ciclo-banda está compuesta por una ciclo-red y unos complementos. La ciclo-red está constituida por un conjunto de tramos e intersecciones que disponen de vías ciclistas o de vías ciclo-adaptadas, es decir, una infraestructura vial con diseño ciclo-inclusivo. De esta infraestructura se desprenden dos grandes grupos, las vías ciclistas, que son de uso exclusivo para el ciclista y por lo tanto son bandas segregadas del espacio de otros usuarios de la vía pública, ya sea el tráfico motorizado o los peatones, y las vías-ciclo-adaptadas, que son aquellas calles o espacios públicos que son especialmente acondicionadas para la circulación en bicicleta, pero no presumen un uso exclusivo de las vías. La Tabla 7 resume las definiciones expuestas, (Ministerio de Transporte de Colombia, 2016). Respecto a las vías ciclistas, se diferencian por sus características particulares en las modalidades expuestas en la Tabla 8.

Tabla 7. Conceptos básicos.

Categoría	Definición
Ciclo-infraestructura	Conjunto formado por la infraestructura pensada para la bicicleta y los complementos que la hacen funcional para este vehículo
Ciclo-red	Conjunto de tramos e intersecciones viales ciclo-inclusivas
Vía ciclista	Vía exclusiva para la circulación de bicicletas
Vía ciclo-adaptada	Vía acondicionada para la circulación de bicicletas

Fuente: Adaptado de Ministerio de Transporte de Colombia. (2016). Despacio: *Guía de ciclo-infraestructura para ciudades colombianas*.

Tabla 8. Definiciones específicas de vías ciclistas.

Subtipo	Formas de segregación respecto a los demás modos
Ciclo-ruta	Física (cambios de altura o instalación de elementos físicos permanentes)
Ciclo-banda	- Cambios de pavimento - Dispositivos de canalización de tránsito (hitos, balizas, tachones, bordillos, o elementos similares) - Demarcación

Fuente: Adaptado de Ministerio de Transporte de Colombia. (2016). Despacio: *Guía de ciclo-infraestructura para ciudades colombianas*.

En algunos casos, el diseño de bandas segregadas no siempre aporta ventajas, no siempre son necesarias, o no siempre hay suficiente espacio disponible. Sin embargo, existe una amplia gama de posibilidades de intervención en la red vial para acondicionar las calles y hacer la circulación en bicicleta más segura, cómoda, rápida o atractiva, sin llegar a ofrecer bandas de uso exclusivo. Estas opciones se llaman “vías ciclo-adaptadas” y las principales modalidades son presentadas en la Tabla 9.

Tabla 9. Definiciones específicas de vías ciclo-adaptadas.

Subtipo	Adaptación	Definición
Prelación de bicicleta	Banda ciclo-preferente	Banda en la calzada reservada preferentemente a la circulación de bicicletas y delimitada mediante una línea discontinua. Vehículos motorizados y las bicicletas pueden cruzar la línea si la situación del tráfico así lo requiere, siempre y cuando no se incomode ni se ponga en peligro al ciclista.
	Carril ciclo-preferente	Carril de la calzada de uso compartido con indicación de la circulación del ciclista por el centro y limitación de velocidad.
Autorizadas para el tránsito de bicicletas	Carril bus-bici	Carril para uso preferencial del transporte público (bus), en el que se autoriza la circulación al ciclista.
	Contraflujo ciclista	Vía de sentido único para el tráfico general en donde se autoriza la circulación al ciclista a contraflujo.
	Calle peatonal	Espacio o vía peatonal donde se autoriza la circulación de bicicletas, manteniendo el peatón la prioridad. Sin ningún tipo de diferenciación de los espacios.
Calle con tránsito calmado		Uso compartido de la calzada por parte de los ciclistas, la circulación es segura, cómoda y atractiva gracias que la intensidad y la velocidad del tránsito motorizado son bajas.

Fuente: Adaptado de Ministerio de Transporte de Colombia. (2016). Despacio: *Guía de ciclo-infraestructura para ciudades colombianas*

3.1.6.1 Ciclo-bandas

Las ciclo-bandas, ciclo-carriles o bici-carriles son vías reservadas exclusivamente para la circulación en bicicleta, siendo unidireccionales y bidireccionales. Son segregadas visual y físicamente a través de marcas viales, color y otros dispositivos de indicación (Figura 5). Las ciclo-bandas pueden ubicarse a nivel de la calzada o formar parte del andén, aunque en ese caso se debe justificar con rigurosidad al generar conflictos con los peatones, situación que debe evitarse desde la propia concepción de la ciclo-infraestructura.

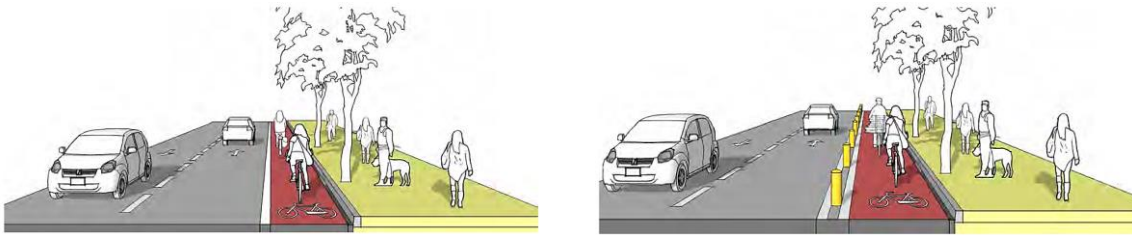


Figura 5. Ciclo-banda unidireccional, segregada visualmente (izquierda) y físicamente (derecha).

Fuente: Ministerio de Transporte de Colombia. (2016). Despacio: Guía de ciclo-infraestructura para ciudades colombianas.

La ciclo-banda como infraestructura para los ciclistas presenta unas virtudes e inconvenientes a considerar. El bici-carril tiene unas ventajas físicas considerando su facilidad de implantación y su uso, que es en general muy adecuado en el sentido que el ciclista tiene una vía exclusiva, sin obstáculos fijos y con facilidades de percepción. Sin embargo, le presenta inconvenientes a los ciclo-usuarios en el ámbito de seguridad, cultura vial y salud, mencionando también que cuando la vía no fue diseñada y construida para incluir ciclo-bandas, se genera un impacto por la redistribución de los anchos de carriles para el tráfico mixto. Se resumen en la Tabla 1, las ventajas e inconvenientes para la tipología ciclo-banda.

3.1.6.2 Inclusión de la ciclo-banda

Una apropiada inclusión o creación de la ciclo-banda debe considerar el volumen y velocidad del tráfico vehicular. En la Figura 6 se presenta una orientación acerca de la factibilidad de inclusión/creación de ciclo-bandas de acuerdo con rangos de tolerancia de las variables mencionadas. La figura muestra que cuando el percentil 85 de la velocidad está entre aproximadamente 35 y 65 km/h, y el volumen horario está entre 1000 y 6000 vehículos, la inclusión de la ciclo-banda es viable.

De acuerdo con el Programa brasileiro de movilidad para bicicletas (Brasil, B., 2007), hay tres puntos claves a ser considerados respecto a la inclusión de ciclo-bandas.

- Cuanto más alta la velocidad vehicular, más necesaria se hace la separación entre los flujos de bicicleta y los de los vehículos motorizados (cuando más del 85% de los vehículos van a más de 50 km/h), haciéndose por lo tanto necesaria la construcción de la ciclo-ruta.
- Cuanto más alto sea el número de vehículos motorizados, más separados deben estar los flujos de bicicletas y autos.
- Cuando el flujo de tránsito tiene en su composición vehicular más del 10% de vehículos de carga pesada como camiones y buses, se recomienda la inclusión de la ciclo-banda.

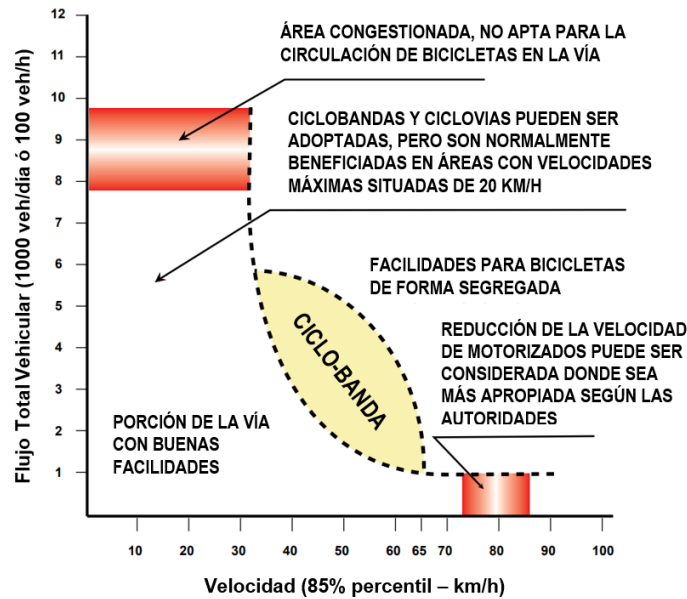


Figura 6. Relación volumen de tráfico-velocidad como guía para la inclusión de la ciclo-infraestructura.
Fuente: Adaptado del Programa brasileiro de movilidad por bicicleta, Brasil, B. (2007).

3.1.6.3 Ancho de la calle

Cuando se incluye una ciclo-banda en una vía se presenta un dilema habitual y es la redistribución de los anchos de carril disponibles para el tráfico motorizado, impactando de alguna forma y en alguna medida los modos componentes de este tráfico.

La acomodación de los modos motorizados y no motorizados representa un problema común. En situaciones de calles con dimensiones básicas con andenes accesibles y calzadas básicas, es claro que podría pensarse que la solución es darle un uso compartido a la calzada, aplicando medidas de tránsito calmado para que la movilidad en bicicleta resulte segura y atractiva. Sin embargo, aún en calles amplias puede resultar difícil llegar a soluciones “fáciles” debido a la congestión frecuente que se presenta en ejes principales de la malla vial.

Aunque la red vial pueda presentar saturación en su capacidad, los programas de inclusión de ciclo-infraestructura deben interpretarse como una oportunidad ambiental y social para redistribuir el espacio vial de las calles, que se otorguen anchos adecuados a modos motorizados y no motorizados, conforme al nuevo discurso de movilidad sostenible. (Ministerio de Transporte de Colombia, 2016)

3.2 MOVILIDAD SOSTENIBLE

“El estudio de la movilidad en la ciudades se ha valido de ciencias aplicadas como la Ingeniería de Tránsito que, con base en estudios especializados de variables como el volumen del tráfico, la velocidad y la densidad, además de inventarios de infraestructuras, la generación de modelos de pronóstico y la modelación con el empleo de software, han facilitado la caracterización del comportamiento del tráfico, así como el diseño de medidas para su mejoramiento, orientadas a la planeación de la operación del tránsito y la intervención física de la infraestructura del transporte. No obstante, en la práctica, dichos estudios han dejado de lado el análisis de factores esenciales como la equidad social, el ambiente y el valor económico, propios de la concepción del problema de movilidad urbana en el marco de la

sostenibilidad de los sistemas de transporte...” (Quintero-González, J. R., 2017).

Los conceptos de sostenibilidad originalmente han sido asociados con aspectos ambientales, describiendo un esfuerzo por proteger los recursos naturales y los sistemas ecológicos, enfatizando la conservación ética y las políticas favorables para minimizar el consumo de recursos naturales. (Litman, T. 2008).

Respecto a la movilidad, existen diversas fuentes para la definición de movilidad sostenible, sin embargo, hay definiciones ya bastante aceptadas y difundidas sobre el tema. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD) define la movilidad sostenible como aquella que permite la satisfacción de las necesidades básicas de acceso y movilidad de personas, empresas y sociedades, de forma compatible con la salud humana y el equilibrio del ecosistema, promoviendo igualdad dentro de las generaciones y entre las mismas. (Gudmundsson, H., 1998).

En Colombia, el concepto de movilidad sostenible se ve desarrollado por el Ministerio de Transporte en la Ley 1083 de Julio 31 de 2006. Conforme a esta ley se definen políticas de transporte y circulación que buscan proporcionar el acceso amplio y democrático al espacio urbano, a través de la priorización de los modos de transporte colectivo y no-motorizados de manera efectiva, de forma socialmente inclusiva y ecológicamente sostenible.

Entendiendo al corredor como un sistema, la movilidad sostenible en corredores viales contempla los mismos componentes políticos descritos en la Ley 1083, por lo tanto, se evaluará la movilidad sobre el corredor reconociendo el componente de sostenibilidad.

Las palabras índice e indicador son usualmente empleadas erróneamente como sinónimos. De acuerdo con Mitchell (1996) el indicador es una herramienta o criterio que permite obtener información y datos sobre una realidad dada. Para Mueller et al. (1997), un indicador puede ser un dato individual o un agregado de información, siendo buen indicador si es simple de entender, permite una cuantificación lógica y coherente, y comunica eficientemente el estado del fenómeno observado.

En cuanto al índice, Shields et al. (2002) señala que un índice revela el estado de un sistema o fenómeno. Prabhu et al. (1999) argumenta que un índice puede ser construido para analizar datos a través de la reunión de un grupo de elementos o indicadores con relaciones establecidas.

De acuerdo con Siche (2007), el índice y el indicador se diferencian en que un índice es el valor agregado final de todo un procedimiento de cálculo donde se utilizan incluso indicadores como variables que lo componen. Entre otros aspectos, menciona que el índice es simplemente un indicador de alta categoría y que se puede transformar en un componente de otro índice.

3.2.1 Indicadores de movilidad sostenible

Según Svensson, Å. (2004), se reconocen indicadores de movilidad sostenible para el corredor entendiéndolo desde su función como link y como área, siendo la mayoría de estos de tipo link, es decir, obedecen más a la función del corredor como infraestructura longitudinal o lineal.

De acuerdo con Costa (2008), los indicadores de movilidad sostenible tienen una función de evaluación y monitoreo en políticas de transporte, especialmente para comparar el desempeño de los sistemas o políticas a lo largo del tiempo y en el espacio. En el ámbito del

planeamiento urbano, el análisis de indicadores juega un papel importante para evaluar y monitorear estructuras urbanas, además de identificar oportunidades y deficiencias. Los indicadores de movilidad sostenible tienen como desafío:

- Representar la situación presente (desarrollo) y escenarios futuros (sostenibilidad)
- Incluir criterios de sostenibilidad y metas para la interpretación de desempeño;
- Ser desarrollado con base en datos de calidad y reproducibles;
- Incorporar la participación de diferentes actores en el desarrollo de los indicadores;
- Ser adoptados teniendo en cuenta la cantidad apropiada de indicadores;
- Ser desarrollado para máxima utilización e impacto (Gudmundsson, 2004).

Respecto al número de indicadores, aunque los investigadores están habituados a manipular un gran número de datos e información, decisores y el público en general prefieren información seleccionada sobre aspectos clave, ya que la sobrecarga de información generalmente genera más entropía en la percepción de los fenómenos. Para Gudmundsson (2004), cuando la cantidad de indicadores es de 5 a 10, hay un alto grado de agregación y son indicadores-clave para decisores y el público, mientras que una cantidad de 20 a 200 indicadores corresponde a sistemas de indicadores, de interés para sistemas de análisis.

Por último, según Litman, T. (2008), hay una serie de principios para la selección de indicadores. Estos principios son descritos a continuación:

- Los datos deben poder ser fácilmente recolectados: La colecta de datos debe ser posible y sin gran dificultad. Deben ser estandarizados para permitir la comparación entre unidades geográficas y comparaciones de tiempo.
- Fácil comprensión y utilidad: se deben comprender fácilmente por el público en general, además de ser útiles para la toma de decisiones.
- Cobertura y equilibrio: el sistema de evaluación y monitoreo debe incluir indicadores de los principales temas y/o dominios de análisis.
- Desagregación: los datos de los indicadores deben poder ser desagregados para dar soporte a tipos específicos de análisis, como análisis de diferentes modos de transporte.
- Unidades de referencia: los indicadores deben ser normalizados para facilitar la comparación de sus impactos. La selección de unidades de referencia puede influenciar en como los problemas son definidos y como sus soluciones son priorizadas.

3.2.2 Índices de movilidad sostenible

El índice de movilidad sostenible hace parte de la construcción de herramientas prácticas incorporadas en el proceso de planeamiento y gestión de las ciudades y de sus sistemas de movilidad, como el corredor urbano. Si bien, existe amplio desarrollo metodológico y teórico respecto a índice de movilidad sostenible para ciudades, se reconocen en la literatura pocas metodologías que involucren índices de movilidad sostenible para el proceso de gestión y planeación de corredores o sistemas viales. Sin embargo, bajo el concepto de movilidad sostenible, se abarca de forma metodológica y teórica el desarrollo de nuevas herramientas para la monitorización del estado de la movilidad sostenible en corredores viales.

De acuerdo a Magagnin y Silva (2008), los índices e indicadores son ampliamente usados como herramientas para guiar adecuadamente políticas de decisión en áreas de movilidad urbana, resultando en una importante contribución para la mejoría de la movilidad de la sociedad.

Los índices de movilidad sostenible son herramientas de apoyo desarrolladas para la

evaluación, análisis y monitoreo de la movilidad urbana, y la elaboración de políticas públicas enmarcadas en el discurso de sostenibilidad de los sistemas de movilidad y la mejoría de la calidad de vida. Para la construcción de un índice de movilidad urbana sostenible, algunas actividades fundamentales deben ser desarrolladas.

1. La forma de cómo los diferentes criterios se relacionan entre sí, definiendo una jerarquía de criterios que sirve como base para la construcción del índice;
2. La identificación de indicadores direccionados a monitorear cada uno de los criterios o tópicos que componen la jerarquía;
3. La determinación de la importancia relativa a través de pesos de los diferentes criterios que componen el índice, permitiendo identificar así de qué forma influyen el resultado final del mismo;
4. El método de normalización de los criterios, de modo que se permita su agregación y comparación;
5. El método de la combinación de los criterios, es decir, el modo de cómo estos son agregados para llegar a una determinada evaluación;
6. La forma de evaluación del índice, el modo como los resultados son presentados e interpretados.

A continuación, se expone el marco teórico sobre el que se fundamentó la construcción del índice *IMUS*, mencionado en los antecedentes.

3.2.2.1 Jerarquía

El índice *IMUS* agrega criterios de diferente nivel o categoría, es decir, algunos abordan fenómenos más complejos que otros. Costa (2008) construye el índice reconociendo tres niveles: Dominio, Tema e Indicador. En este orden, cada nivel contiene y relaciona criterios o indicadores abordando fenómenos, que, en este caso, buscan evaluar el desempeño de la movilidad sostenible en ciudades brasileiras. En la Figura 7 se muestra el esquema de jerarquía presente en el *IMUS*.

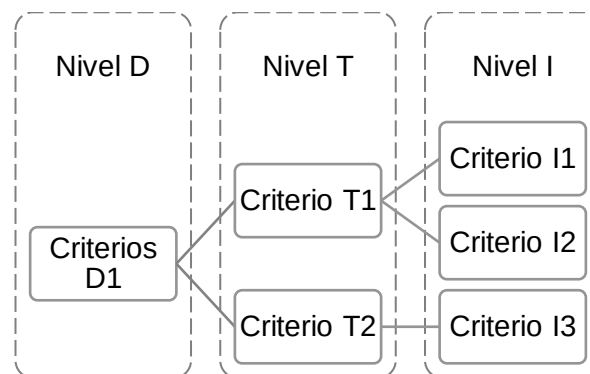


Figura 7. Estructura jerarquizada y multicriterio del índice *IMUS*.

Fuente: Elaboración propia.

La construcción y cálculo del índice se puede realizar con el apoyo de metodologías que permitan asociar numéricamente los criterios entre sí y con los criterios de niveles o esferas superiores o inferiores. Se describe a continuación el método usado por Costa (2008) para la construcción del índice *IMUS*.

3.2.2.2 Método de construcción: Multicriterio de Apoyo a la decisión – Constructivista

La metodología Multicriterio de Apoyo a la decisión – Constructivista (en inglés, *Multicriteria Decision Aid – Constructivist* o MCDA-C), consiste en una técnica de evaluación que contiene aspectos considerados importantes por el decisor. Tiene como base tres premisas:

- Interacción entre sujeto y objeto, es decir, la evaluación es necesariamente basada en los valores y percepciones del sujeto;
- Constructivismo, considera que el entendimiento del problema es hecho paulatinamente;
- Participación, implica que los actores participan activamente del proceso de estructuración del problema, interactuando entre sí.

Este método ha sido utilizado para ayudar a la toma de decisiones en un proceso, permitiendo al decisor identificar claramente sus objetivos, medir esos objetivos y visualizar el impacto de las alternativas en el conjunto de objetivos. (Costa, 2008). El MCDA-C es usualmente utilizado en situaciones complejas donde exista una combinación de diferentes actores, todos con diferentes valores, percepciones, objetivos e interacciones entre sí. La metodología enfatiza en la idea de la construcción del problema, es decir, se enfoca en el contexto de decisión que representan los actores involucrados.

3.2.2.3 Método de agregación: combinación lineal ponderada

Como se mencionó, en la metodología MCDA-C se involucran diferentes actores, en diferentes niveles. Las relaciones entre actores de un mismo nivel y entre otros niveles o esferas se pueden describir a partir de métodos de agregación como la combinación lineal ponderada, donde los criterios son combinados a través de una media ponderada. Este método de agregación ya ha sido utilizado anteriormente en índices de calidad de vida y medidas de sostenibilidad de los sistemas de movilidad, entre otras aplicaciones.

De acuerdo con Costa (2008) citando a Silva et al. (2004), la característica más importante de este procedimiento es el hecho de permitir la compensación entre criterios, lo que significa que una cualidad o criterio pobre o de poco aporte al índice, puede ser compensada por un conjunto de buenas cualidades o criterios con abundante aporte al índice. Un ejemplo de su aplicación se desarrolla en el índice *IMUS* construido por Costa (2008). En la estructura adoptada de tres niveles, el índice de agregación de los criterios resulta en un índice global, calculado a partir de los pesos de cada criterio conforme a la Ecuación (5).

$$IMUSg = \sum_{i=1}^n Peso_i^D * Peso_i^T * Peso_i^I * x_i \quad (5)$$

Donde:

IMUSg: puntuación global del índice

$Peso_i^D$: peso del dominio al que pertenece el indicador *i*;

$Peso_i^T$: peso del tema al que pertenece el indicador *i*;

$Peso_i^I$: peso del indicador *i*;

x_i : puntuación (valor normalizado) obtenido para el indicador *i*;

Para obtener la puntuación global del índice *IMUS*, se debe calcular la puntuación normalizada de cada uno de los indicadores que componen el índice, para posteriormente, efectuar la combinación lineal para cada indicador y obtener de la sumatoria de estos valores

la puntuación global del índice.

3.3 MODELOS DE MICROSIMULACIÓN DE TRÁNSITO

3.3.1 Fundamentos

De acuerdo con Ortuzar & Willumsen (2008), un modelo es en esencia una representación simplificada de la realidad, es una abstracción utilizada para lograr mayor claridad conceptual acerca de ésta, reduciendo su variedad y complejidad de modo que se permita comprender de forma adecuada para su análisis. Los modelos permiten realizar simplificaciones de sistemas de caminos, como lo es el corredor vial, es decir, logra abstraer la infraestructura y los modos de transporte.

3.3.2 Clasificación

Este modelo del sistema corredor vial y sus componentes se traduce en un modelo de tránsito, el cual se clasifica según su naturaleza, nivel de detalle y aleatoriedad, variables asociadas al nivel de complejidad de análisis que se quiera lograr. En la clasificación por naturaleza se consideran los modelos discretos y continuos; de acuerdo con el nivel de detalle podrán ser modelos macroscópicos, mesoscópicos y microscópicos; también pueden ser determinísticos o estocásticos de acuerdo al nivel de aleatoriedad. En el presente trabajo se hace énfasis en la clasificación según el nivel de detalle.

- **Modelos macroscópicos:** usualmente basados en la teoría de tráfico, cuyo objetivo es la descripción de la evolución del tiempo-espacio de las variables caracterizadoras de fluidos macroscópicos: volumen $q(x,t)$, velocidad $u(x,t)$, y densidad $k(x,t)$, de los cuales se asume que están definidos a cada instante para un tiempo t y en cada punto en el espacio x .
- **Modelos mesoscópicos:** son una simplificación que es menos demandante de información, siendo computacionalmente más eficientes que los modelos microscópicos. Este tipo de modelo combina en algunas formas aspectos microscópicos y macroscópicos, como algunos asociados a las dinámicas vehiculares. Básicamente, hay dos tipos de enfoques en la modelación de tráfico mesoscópico: un enfoque en el cual el vehículo individual no es tenido en cuenta y es simulado como pelotones que se mueven a lo largo de arcos; y otro enfoque en el cual las dinámicas de los flujos son determinados por dinámicas simplificadas de vehículos individuales.
- **Modelos microscópicos:** está basada en la descripción de movimiento de cada vehículo componente de la corriente de tráfico. Esto implica la modelación de acciones, p. ej., aceleración, desaceleración y cambios de carril de cada conductor en respuesta al tráfico circundante.

La metodología de estos modelos se basa en la teoría de seguimiento de vehículos, complementado con el adelanto de los vehículos bajo una distancia de seguridad deseada y cambio de carril que describe el comportamiento vehicular con respecto a la conducta del tránsito lateral, incorporando además análisis de formación de colas de espera, análisis de propagación de onda y otras técnicas analíticas.

3.3.3 Aspectos generales del software PTV VISSIM©

3.3.3.1 Generalidades de VISSIM©

VISSIM© es un software de modelación microscópica y discreta de tráfico vehicular. Basado en varios modelos matemáticos, este software puede ser usado para investigar sobre transporte público y privado, así como también las dinámicas particulares del tráfico motorizado y no motorizado y sus interacciones. Aplicaciones comunes incluyen las siguientes:

- Estudios de corredores viales con alta presencia de tráfico motorizado, con el fin de evaluar y analizar desempeño de la red, congestión y oportunidades de mejoras.
- Estudios de corredores viales con intersecciones semaforizadas y no semaforizadas.
- Investigaciones en esquemas de tráfico calmado, incluyendo estudios detallados de velocidad durante maniobras con visibilidad limitada.
- Sistemas de transporte público con variedad vehicular como transporte ferroviario ligero, tranvías, sistemas de autobús de tránsito rápido, sistemas de ciclo-infraestructura. Estos estudios incluyen análisis de operación y capacidad, además de ser de gran apoyo técnico en la refinación de estrategias de diseño y operación.

Los inicios de VISSIM© datan de la década de los 80', en la universidad de Karlsruhe de Alemania. Aparece por primera vez en el comercio en el año 1992, con la versión 2.03 dentro del entorno de Windows (PTV Group, 2019). En la actualidad, la empresa alemana dispone de la versión 11.00 de VISSIM©. Se mencionan a continuación los principales aspectos para la construcción de modelos. Vissim, P. T. V. (2008).

3.3.3.2 Tipo de vehículo

En VISSIM©, el tipo de vehículo hace referencia al grupo de vehículos con características técnicas y de comportamiento de conducción física similares. Ejemplos de tipo de vehículos son: auto, camión, autobús, bus articulado, tranvía, bicicleta, peatones. Adicional a estos vehículos predeterminados, es posible crear nuevos tipos de vehículos o bien, modificar los existentes. Algunos parámetros de configuración del tipo de vehículo son la longitud, el ancho, la ocupación, el color, entre otros.

3.3.3.3 Comportamiento de conducción

El comportamiento de conducción está enlazado a cada tramo según el tipo de comportamiento. Para cada clase de vehículo, un conjunto de parámetros de comportamiento de conducción diferente puede ser definido

- **El enfoque de “Wiedemann”:** VISSIM© usa el modelo del comportamiento psicofísico del conductor desarrollado por Wiedemann (1974). Los vehículos siguen uno a otro en un proceso de oscilación. Cuando un vehículo más rápido se acerca a un vehículo más lento en un solo carril se ajusta su separación. El punto de acción o de reacción consciente, depende de la diferencia de velocidad, la distancia y el comportamiento del conductor. En conexiones de multicarril se verifica si los vehículos manejan cambiando de carriles. Si ese es el caso, ellos verifican la posibilidad de encontrar los espacios aceptables en carriles vecinos. El seguimiento de vehículos y el cambio de carril forman un conjunto integrado en el modelo de tránsito. Por lo tanto, el proceso de conducción de acuerdo con las condiciones dadas se asocia a las diferentes áreas, las cuales son representadas en la Figura 8.

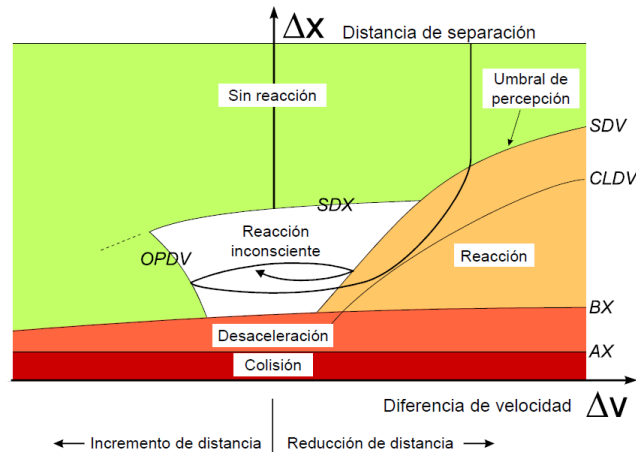


Figura 8. Lógica de seguimiento de vehículo (Wiedmann 1974)

Fuente: PTV Group. (2013). PTV VISSIM 7 User Manual. PTV AG, 240.

- **Comportamiento de seguimiento:** hace referencia al modo de conducción en el cual el conductor sigue al vehículo precedente sin una aceleración o desaceleración consiente, manteniendo una distancia de seguridad más o menos constante. Este comportamiento depende de parámetros como la distancia de visión frontal, el comportamiento de acercamiento, el número de vehículos observados y el modelo de seguimiento de vehículos. De este último se destacan dos modelos: el modelo Wiedemann 74 es un modelo idóneo principalmente para el tráfico urbano y zonas de entrecruzamiento, y el modelo Wiedemann 99 que es un modelo idóneo principalmente para el tráfico interurbano (carreteras).
- **Cambio de carril:** en VISSIM®, se reconocen dos clases de cambio de carril: cambio de carril necesario (con el fin de alcanzar el conector siguiente de una ruta) y cambio de carril libre (relacionando el espacio disponible a la velocidad). Los parámetros que configuran este estado de conducción son: comportamiento de sobrepaso, separación mínima, factor de reducción de la distancia de seguridad, entre otros.
- **Comportamiento lateral:** los parámetros de comportamiento lateral permiten a los vehículos viajar en diferentes posiciones laterales. Así es posible que estos sobrepasen otros vehículos dentro del mismo carril, si el sobrepaso es permitido y si el ancho del carril es suficiente. Se mencionan algunos parámetros configuradores del comportamiento: posición deseada a flujo libre, tiempo entre cambios de dirección, opción de sobrepasar en el mismo carril, distancia lateral mínima, entre otros.
- **Funciones de aceleración y desaceleración:** VISSIM® utiliza diferentes valores de aceleración y desaceleración a través de funciones que representan la diferencias en el comportamiento del conductor. Para cada tipo de vehículo se debe ajustar las funciones de aceleración y desaceleración máximas y deseadas.

3.3.3.4 Links y conectores

El elemento básico de una red de tráfico en VISSIM® es el tramo o *link*, representando una vía de un carril o múltiples con un sentido de flujo específico. Las redes se construyen enlazando los tramos con conectores. Configuraciones como la reducción de número de carriles, bahías de desaceleración y enlaces para movimientos vehiculares, son posibles a través de la combinación de links y conectores. A continuación, en la Figura 9 se aprecian diferentes configuraciones de links y conectores para representación y creación de segmentos de red con facilidades viales variadas.

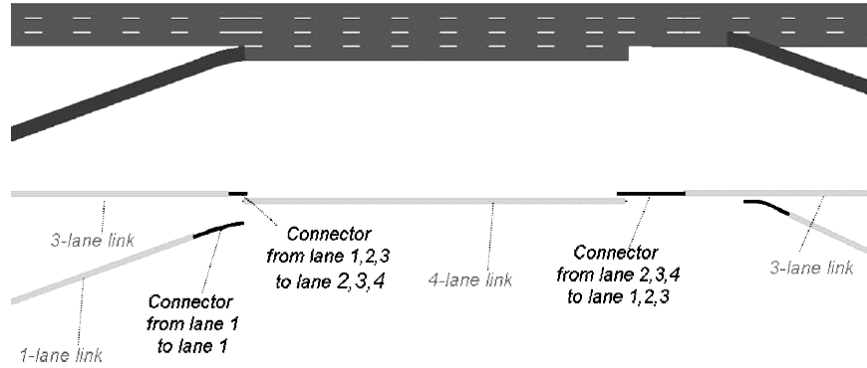


Figura 9. Links y conectores modelando configuraciones viales.

Fuente: Fellendorf (2010).

En cuanto a la visualización, es posible presentar la red de forma *normal*, mostrando los colores típicos del pavimento, y a partir de *ejes de tramos*, que esquematizan la red con líneas “eje” de los tramos y conectores. En la Figura 10 se aprecian las dos presentaciones.

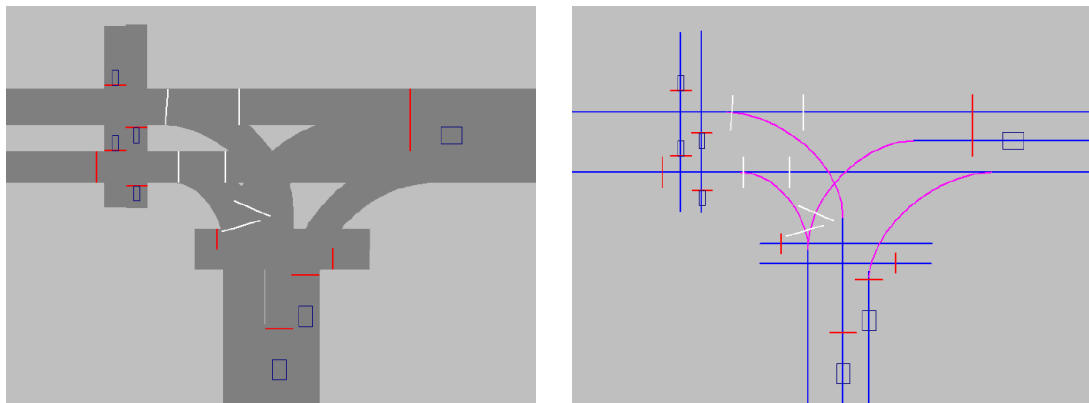


Figura 10. Tipos de presentación: *normal* (izquierda) y por *eje de tramo* (derecha)

Fuente: Manual de usuario PTV VISSIM 10.

3.3.3.5 Elementos de red adicionales

Existen otros elementos situados en una posición dentro de los tramos o conectores. Algunos elementos recolectan información y otros regulan la distribución de velocidad de los vehículos que atraviesen el link o conector. Se exponen brevemente a continuación:

■ Elementos de evaluación:

- **Contadores de cola:** con este elemento las colas son medidas a partir de la ubicación del contador de cola sobre el tramo o conector aguas-arriba hacia el último vehículo que está en condición de cola. Se registra longitud de cola promedio, longitud de cola máxima y número de detenciones de los vehículos dentro de la cola. En cuanto a su ubicación en intersecciones semaforizadas, se deben disponer a la altura de la línea de detección semafórica.
- **Nodos:** este tipo de evaluación recolecta información para un área definida por el usuario dentro de la red de VISSIM®. Las evaluaciones se recolectan de forma automática considerando los límites o lados del nodo como segmentos de evaluación. Entre los varios parámetros que evalúa, se encuentran demoras,

detenciones, colas, conteo de vehículos, consumo de combustible, emisiones, entre otras.

- **Puntos de recolección de datos:** definiendo puntos de recolección de datos sobre secciones transversales de la red, se recopila principalmente información de la cantidad de vehículos que ha cruzado el punto de recolección, además de su velocidad, aceleración y longitud.
- **Secciones de tiempo de viaje:** consisten en una marca transversal de inicio y una de fin ubicadas sobre links o conectores. El tiempo de viaje promedio (incluyendo los tiempos de espera o detención) es determinado como el tiempo requerido para que un vehículo cruce la primera y segunda marca transversal.

▪ **Cambios de velocidad deseada:**

- **Áreas de reducción de velocidad:** generan un cambio temporal de la distribución de velocidad. Son requeridos para modelar el cambio de velocidad en curvas y carriles de giro en intersecciones.
- **Decisiones de velocidad deseada:** generan un cambio permanente de la distribución de velocidad. Son requeridos para establecer límites de velocidad y asemejar el comportamiento en cuellos de botella.

3.3.3.6 Control del tráfico

- **Intersecciones no-semaforizadas:** En VISSIM®, este tipo de intersecciones, así como las configuraciones viales de convergencia y divergencia, pueden ser modeladas a través de reglas de prioridad, áreas de conflicto y señales de pare.
 - **Reglas de prioridad:** consiste en una línea de pare y una o más marcas de conflicto que están asociadas. Modelan el derecho de vía para movimientos conflictos no regulados por semáforo.
 - **Áreas de conflicto:** son un elemento de red que ayuda a regular conflictos entre vehículos en dos tramos o conectores diferentes. Es una alternativa a las reglas de prioridad para la definición de prioridades en intersecciones, modelando de forma inteligente y con facilidad los conflictos.
 - **Señales de pare:** la señal de pare fuerza los vehículos a parar por al menos un paso de tiempo sin considerar la presencia del conflicto de tráfico mientras que la regla de prioridad trata con el tráfico conflictivo. Son usados para controlar los accesos y salidas a intersecciones.
- **Intersecciones semaforizadas:** Para este tipo de intersecciones se emplean controladores semaforicos (CS). Los CS tienen como unidad de control los grupos de señales referidos también como fases semaforicas con los cuales se crean los planes de señales. Para el control físico en las vías del modelo se utilizan cabezas de semáforo, las cuales, asociadas a los grupos de señales, asemejan el control semaforico en la intersección.

3.3.3.7 Tráfico vehicular

La modelación del tráfico vehicular puede ser hecha por asignación estática o dinámica. La asignación estática emplea rutas estáticas por medio de decisiones de rutas. La asignación dinámica emplea matrices origen-destino (OD). De igual modo, varía la forma en que los vehículos son ingresados al modelo.

- **Composiciones vehiculares:** representan la mezcla de tipos de vehículo. Consisten en una lista de uno o más tipos de vehículos, para los cuales un porcentaje de flujo y una distribución de velocidad son asignados.
- **Entrada de vehículos:** los volúmenes de tráfico son definidos para cada tramo y cada intervalo de tiempo en vehículos por hora (veh/h) teniendo en cuenta las composiciones vehiculares. Cuando se usa asignación dinámica los flujos de entrada no requieren ser definidos dado que los datos de flujo están contenidos en las matrices OD.
- **Decisiones de ruta:** las decisiones de ruta guían a los vehículos a partir de rutas. Una ruta es una secuencia fija de tramos y conectores que tiene como inicio una sección transversal y como fin por lo menos otra sección transversal aguas abajo. Cada punto de decisión o inicio puede tener múltiples destinos asemejándose a un árbol con múltiples ramas. Las decisiones de ruta solo afectan a los vehículos de la clase que está especificada en la decisión de ruta y que no está afectada previamente por otra decisión de ruta.

3.3.3.8 Transporte público

Los vehículos de transporte público (TP) se definen separadamente del resto de tráfico permitiéndoles operar con el tráfico mixto, así como en vías exclusivas o pistas. Se requiere dos pasos para modelar el transporte público: paradas TP y líneas TP. Las paradas TP se crean sobre carriles y se visualizan como un área rectangular. Pueden representar paradas en vía o bahías para buses, según como se dispongan en la red. Las líneas TP se conforman por buses que siguen una secuencia fija de paradas TP de acuerdo con una distribución de tiempos como el tiempo de despacho, desfases de tiempo entre paradas y el tiempo de espera por parada TP.

3.3.3.9 Simulación

Todas las calibraciones deben considerar además el número de corridas y el tiempo de precarga:

- **Periodo de simulación:** El periodo de simulación se puede componer de un periodo de precarga y de un periodo de evaluación. El tiempo de precarga, debe permitir al vehículo ir desde cualquier origen a cualquier destino. Este tiempo va desde 900 segundos (15 minutos) hasta 1,800 segundos (30 minutos). Tiempos más largos deben ser considerados para redes excesivamente largas o con alta congestión. En cuanto al periodo de evaluación, depende del usuario; aunque generalmente se tiene como unidad de evaluación los 3600 segundos.
- **Resolución y velocidad de simulación:** estas dos variables están asociadas al tiempo real que necesita VISSIM© para realizar la simulación del modelo. La resolución de simulación es el número de veces que la posición del vehículo será calculada dentro de un segundo de simulación. VISSIM©, en su manual de usuario recomienda utilizar 10 pasos de tiempo por segundo de simulación.
La velocidad de simulación es el número de segundos de simulación en un segundo del tiempo real. Si se considera la velocidad *máxima*, la simulación se ejecutará tan rápido como sea posible, sin afectar los resultados de la simulación.
- **Semilla de aleatoriedad y número de corridas:** Al modelar en VISSIM©, se debe tener en cuenta la aleatoriedad de la *semilla*, la cual influye en muchos aspectos del modelo. La semilla cambia los valores de entrada usados internamente dentro del modelo. Estos cambios de valores influyen en los tiempos de arribo del vehículo a la red, la variabilidad estocástica del comportamiento vehicular y también una selección de

valores de distribución como la velocidad, colores, tiempos de demora, etc. No existe semilla que replique la “vida real” mejor que otra, esto es comparable con los cambios diarios de las condiciones de movilidad de una misma localidad, zona o red.

De acuerdo con Collins, P. (2009), para asegurar que un modelo sea estable, se debe correr un mínimo de 5 veces con semilla variable, aunque para modelos más complejos, más de 5 corridas pueden ser requeridas. Los resultados finales u *output* son los promediados entregados por VISSIM®, sin embargo, se debe revisar si existen valores promedio atípicos, lo que podría significar la necesidad de mayor cantidad de corridas.

3.3.3.10 Calibración y validación

Aunque los modelos de simulación de tráfico han llegado rápidamente a ser el estándar para la evaluación y el desarrollo de estudios de movilidad alrededor del mundo, existe escepticismo respecto a la validez de sus resultados producto de la pobre calibración de los modelos. Debido a la complejidad del tráfico mixto, tráfico característico identificado para este estudio. Se presentan dificultades en la recolección de información, además de la ausencia de procedimientos de calibración de este tipo de modelos. La calibración de un modelo de micro simulación requiere procedimientos especiales en la representación de vehículos, geometría, y tráfico. (Woody, T., 2006).

De acuerdo con el departamento de Transporte del estado de Maryland (2017), dos calibraciones métricas son requeridas para los modelos VISSIM®: tiempo de viaje y/o velocidad, y rendimiento de vehículos.

- **Tiempo de viaje y/o velocidad:** Para realizar la calibración por tiempo de viaje y/o velocidad, es necesario tener información externa de estas variables. En campo, se deben obtener la velocidad y tiempo de viaje ya sea de un tramo, o de un punto específico la velocidad instantánea. En VISSIM®, estas variables deben ser comparadas a partir de la ubicación en red de *puntos colectores de información y colectores de viaje de vehículos*, para luego, a partir de cálculos de comparación que involucren porcentaje de error entre el valor real y el modelado, se evalúe y calibre la velocidad y tiempos de viaje para los tramos en la red. Esto último se logra a partir de parámetros de control de flujo vehicular como reductores de velocidad y velocidad deseada, pares, aceleración, entre otras.
- **Volúmenes:** La validación y calibración de volúmenes puede ser hecha a partir de metodologías estadísticas como el *GEH* (New Zealand Transport Agency (2014)). Este indicador estadístico consiste en una fórmula matemática que permite comparar dos conjuntos de volúmenes de tránsito vehicular, en este caso, el volumen real o medido en campo y el volumen registrado en el modelo. La expresión estadística *GEH* se calcula como sigue:

$$GEH = \sqrt{\frac{(E - V)^2}{\left(\frac{E + V}{2}\right)}} \quad (6)$$

Donde:

GEH = indicador estadístico

E = Volumen registrado en modelo

V = Volumen medido en campo

Los criterios de evaluación se presentan en la siguiente Tabla 10:

Tabla 10. Criterios de comparación de volúmenes horarios por GEH.

COUNT COMPARISON	MODEL CATEGORY						
	A: REGIONAL	B: STRATEGIC NETWORK	C: URBAN AREA	D: NZ TRANSPORT AGENCY PROJECT	E: SMALL AREA/CORRIDOR	F: INTERSECTION / SHORT CORRIDOR	G: HIGH FLOW, SPEED, MULTI LANE
TOTAL DIRECTIONAL COUNT ACROSS SCREENLINES:							
GEH <5,0 (% OF SCREENLINES)	>60%	>75%	>85%	>90%	NA	NA	NA
GEH,0 (% OF SCREENLINES)	>75%	>85%	>90%	>95%	NA	NA	NA
GEH,0 (% OF SCREENLINES)	>90%	>95%	>95%	>100%	NA	NA	NA
INDIVIDUAL DIRECTIONAL LINK COUNT ON SCREENLINES:							
GEH <5,0 (% OF COUNTS)	>65%	>80%	>85	>87,5%	NA	NA	>90%
GEH <7,5 (% OF COUNTS)	>75%	>85%	>90%	>92,5%	NA	NA	>95%
GEH <10,0 (% OF COUNTS)	>85%	>90%	>95%	>97,5%	NA	NA	>100%
GEH <12,0 (% OF COUNTS)	>95%	>95%	>100%	>100%	NA	NA	>100%
INDIVIDUAL TURNING MOVEMENTS AND/OR DIRECTIONAL LINK COUNTS:							
GEH <5,0 (% OF TURNS)	NA	>75%	>80%	>82,5%	>85%	>95%	>85%
GEH <7,5 (% OF TURNS)	NA	>80%	>85%	>87,5%	>90%	>100%	>90%
GEH <10,0 (% OF TURNS)	NA	>85%	>90%	>92,5%	>95%	>100%	>95%

Fuente: Adaptado de New Zealand Transport Agency (2014).

La categoría de los modelos que se desarrollaron en este proyecto de investigación corresponde a 'Área pequeña/Corredor' (Categoría E: SMALL AREA/CORRIDOR) y a la categoría 'Intersección/Corredor corto' (Categoría F: INTERSECTION/SHORT CORRIDOR). La categoría E representa un área urbana con limitadas rutas de decisión, corredores viales, pequeños pueblos y áreas rurales. La categoría F representa una sola intersección o un corredor corto con alrededor de 3 intersecciones. De acuerdo a la Tabla 10, se expone en la Tabla 11 los criterios para evaluar los volúmenes en los giros de las intersecciones para las categorías de modelo E y F.

Tabla 11. Criterios de comparación de volúmenes horarios para categorías de modelo E y F.

Categoría del modelo	Criterios
E: Área pequeña/corredor vial	El 85% de los valores de $GEH < 5.0$
	El 90% de los valores de $GEH < 7.5$
	El 95% de los valores de $GEH < 10.0$
F: Intersección/Corredor corto	El 95% de los valores de $GEH < 5.0$
	El 100% de los valores de $GEH < 7.5$
	El 100% de los valores de $GEH < 10.0$

Fuente: Adaptado de New Zealand Transport Agency (2014).

Adicional a la validación operativa se debe realizar una inspección visual al modelo, revisando que la presencia de colas y su longitud, la congestión y condiciones de operación general de la red, reflejen las condiciones reales características de la zona de estudio. (Maryland Department of Transportation State Highway Administration, 2017).

La validación de volúmenes y la inspección visual del modelo puede llegar a convertirse en un proceso iterativo, de ensayo y error en el que se varíen parámetros de entrada al modelo o parámetros propios de la configuración del software asociados a la definición de los tipos de vehículos y el comportamiento vehicular. Respecto a la configuración del tipo de vehículos, es importante asemejar la realidad de los vehículos modelados a partir de sus variables físicas y operativas; físicas como el largo y el ancho y operativas como la aceleración y la desaceleración. En cuanto a los parámetros de calibración del comportamiento vehicular, es importante definir para cada tipología vehicular las características de comportamiento asociadas al seguimiento y sus factores de seguridad, el movimiento lateral, la separación de cada tipo de vehículo respecto a otros vehículos, la ubicación en el carril, entre otras. Estos parámetros y características se definen en la sección 3.3.3.3.

4 METODOLOGÍA

El proceso metodológico para llevar a cabo la investigación se muestra en la Figura 11, el cual menciona los pasos para el desarrollo de cada uno de los objetivos planteados en el proyecto, reflejados en los siguientes capítulos.

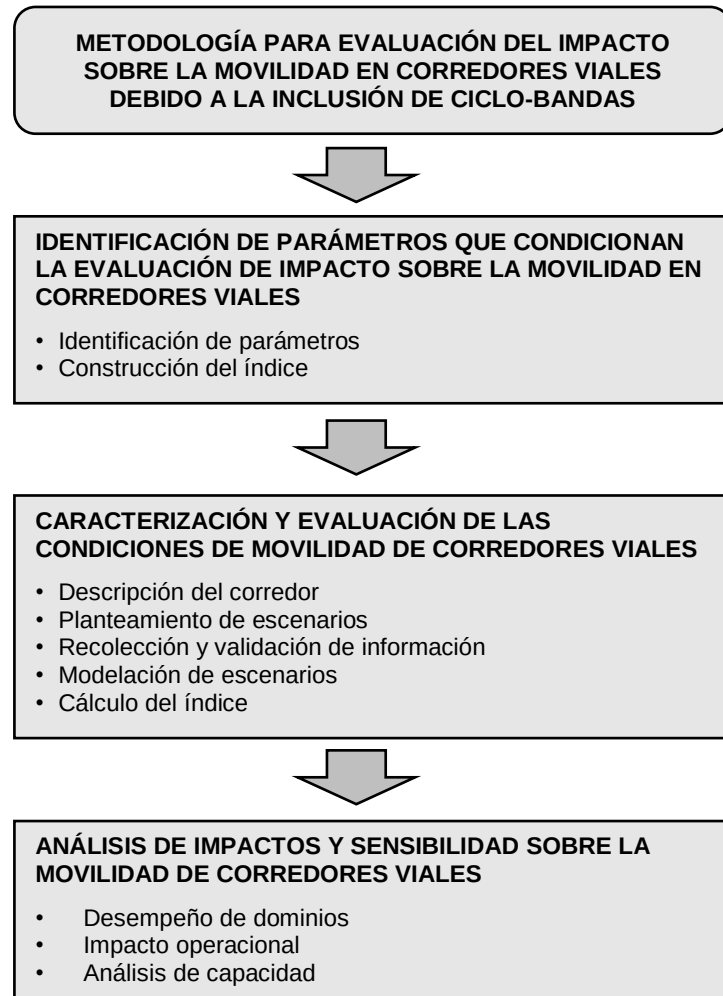


Figura 11. Metodología del proyecto.

Fuente: elaboración propia.

5 IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS QUE CONDICIONAN EL IMPACTO SOBRE LA MOVILIDAD EN CORREDORES VIALES

La inclusión de la ciclo-banda implica un impacto a la movilidad que podrá verse asociado a aspectos ambientales, sociales, políticos, e infraestructura de transporte para los diferentes modos participantes. Los fenómenos de impacto a la movilidad asociada a estos aspectos, pueden ser descritos y explicados por medio de indicadores o parámetros, que en conjunto permiten evaluar la movilidad en corredores viales.

En el presente capítulo se desarrolla la identificación de parámetros que permitan evaluar el impacto sobre la movilidad en corredores viales y posteriormente, a partir de la agregación de los parámetros, se construye un índice de movilidad sostenible para la evaluación, análisis y monitoreo de la movilidad en corredores viales.

5.1 IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS

Para la identificación de los aspectos y parámetros que condicionarán la evaluación del impacto sobre la movilidad se debe realizar una revisión bibliográfica de varios índices de movilidad. Esta revisión comprende guías, metodologías y políticas que proporcionan lineamientos para el diseño, análisis y evaluación de calles y corredores bajo el discurso de la movilidad sostenible, basados en principios, metas y criterios los cuales se pueden asociar por aspectos.

Posterior a la revisión e identificación, se realiza un análisis a los parámetros o indicadores específicos asociados a la operación de la movilidad en el corredor, obteniendo correlaciones entre estos debido a su comportamiento durante la evaluación de inclusión de ciclo-banda.

5.1.1 Revisión de literatura

Como se mencionó en el capítulo 3.1.1.1, las calles pueden clasificarse en dos tipos según su función: como un espacio o lugar y como un link o arco. Al igual que una ciudad, la calle considerada como un área implica un análisis a nivel espacial, que para su óptima evaluación requiere de criterios más complejos. En cambio, la calle pensada como un link, como un elemento longitudinal con nodos representativos de las intersecciones y con arcos representando los segmentos, posibilita un análisis menos complejo en comparación a la consideración espacial. Además, en general en la ingeniería de tránsito se describe y evalúa al corredor a partir de indicadores y parámetros cuyas unidades de medición están asociadas a la dimensión longitudinal del corredor.

La revisión de literatura se realizó tomando como referencia el índice *IMUS* (Costa, 2008) y su metodología de construcción. Partiendo de la estructura base de tres niveles del *IMUS*, se realizó una revisión de documentos que relataran índices, modelos, metodologías, guías y esquemas de diseño para la evaluación y análisis de corredores viales, apoyados en el concepto de movilidad sostenible. En total, se consideraron cuatro publicaciones para el desarrollo de la selección de criterios, estos se listan en la Tabla 12, detallando el año, autor y ubicación de la publicación. Las cuatro publicaciones corresponden a guías y políticas de diseño y modelos de sostenibilidad de calles.

Los documentos fueron revisados para identificar criterios de desempeño de una movilidad sostenible en calles (análogamente igual para corredores). Si bien, no se encontró en todas las publicaciones dominios, temas e indicadores explícitos para la evaluación de la movilidad en corredores viales, sí se reconocieron principios, metas y estrategias que posteriormente

fueron asociadas a los niveles presentes en el índice *IMUS*. En la Tabla 12 se expone también la cantidad de Dominios, Temas e Indicadores identificados para cada publicación. En la sección de antecedentes del presente documento se describe cada documento y sus criterios de desempeño de movilidad sostenible.

Tabla 12. Revisión bibliográfica de metodologías de evaluación de desempeño de calles.

Metodología	Año publicación	Autor	Ubicación	Dominios	Temas	Indicadores
Guía de diseño de calles urbanas	2013	Asociación Nacional de Oficiales de Transporte de la Ciudad	Norte América	5	-	-
Políticas de diseño de calles	2015	Departamento de transporte de New York	New York, Estados Unidos	6	22	-
Calles arteriales para la gente	2004	Comisión europea para el proyecto "Calles arteriales hacia la Sostenibilidad"	Europa	3	6	6
Modelo de Sostenibilidad en corredores integrados	2013	Lei Zhang, et al	Maryland, Estados Unidos	6	-	17

Fuente: Elaboración propia.

De la revisión de las publicaciones se reconoció que no todos los dominios presentes en el índice *IMUS* mostraban participación en el contenido de las publicaciones seleccionadas. Entre los documentos también se revisó las similitudes entre sus criterios identificados, cuidando en realizar comparaciones de criterios del mismo nivel. En la Tabla 13 se observa el ejercicio de identificar a nivel de dominio o principio, los criterios considerados por Costa (2008) en el *IMUS* y por los autores u organizaciones para la construcción de las cuatro guías.

Tabla 13. Dominios o principios identificados.

Publicación	Dominios										
	Accesibilidad	Aspectos ambientales	Aspectos sociales	Aspectos económicos	Aspectos políticos	Infraestructura	Modos no motorizados	Planeamiento integrado	Modos motorizados	Sistemas de transporte	Seguridad
Guía de diseño de calles urbanas	-	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	✓	-	✓
Políticas de diseño de calles	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	✓	-	✓
Calles arteriales para la gente	-	✓	-	-	-	-	✓	-	✓	-	✓
Modelo de Sostenibilidad en corredores integrados	-	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	✓	-	✓

Fuente: Elaboración propia.

Este proceso de comparación para la reunión de los criterios se realiza pensando en la construcción de un índice para la evaluación de la movilidad en corredores viales, categorizándolos por niveles y asociándolos a modo de lograr la jerarquía *Dominio-Tema-Indicador*. Todos los criterios fueron considerados para su agregación destacando su relevancia en la evaluación de la movilidad en corredores viales, conservando los esquemas de modelo y diseño presentes en las cuatro guías mencionadas. En la Tabla 14 se presenta los criterios identificados: 5 *Dominios*, 11 *Temas* y 20 *Indicadores*.

Tabla 14. Parámetros identificados para la evaluación de la movilidad en corredores viales.

DOMINIOS	TEMAS	INDICADORES
- Aspectos ambientales - Aspectos socio-políticos - Infraestructura - Tráfico y circulación urbana - modos no motorizados. - Tráfico y circulación urbana - modos motorizados	- Control de los impactos en el medio ambiente - Consumo de recursos naturales - Calidad de vida - Aspectos sociales - Aspectos políticos - Provisión y mantenimiento de la infraestructura de transporte - Transporte ciclo-viario - Fluidez y circulación de ciclo-usuarios - Desplazamientos a pie - Fluidez y circulación del tráfico mixto - Calidad y diversificación modal del transporte público	- Emisiones NOx y CO - Nivel de ruido equivalente - Consumo de combustible - Siniestros viales - Mortalidad por accidentes de tránsito - Aspectos sociales - Aspectos políticos - Estado de superficie de aceras peatonales - Estado de superficie de ciclo-infraestructura - Estado de superficie de infraestructura vial - Señalización Vial - Extensión y conectividad de ciclo-infraestructura - Velocidad media de viaje de ciclo-usuarios - Intersecciones semaforizadas con fases peatonales - Nivel de servicio - Longitud de cola - Paradas - Velocidad media de viaje del tráfico mixto - Velocidad comercial del transporte público

Fuente: Elaboración propia.

De los indicadores identificados se reconocen algunos relacionados con la operación de movilidad en el corredor. Estos indicadores dependen de la interacción infraestructura-modos, por lo tanto, serán impactados de forma directa al modificar condiciones físicas o de demanda-capacidad del corredor vial. Una modificación de la sección transversal de los carriles que componen el corredor, producto de la inclusión de la ciclo-banda, significa que los indicadores de carácter operacional se puedan ver impactados en diferentes escalas de acuerdo al ancho de la ciclo-banda incluida. Se hace evidente la importancia de realizar un ejercicio que permita evaluar los indicadores de tipo operacional considerando las condiciones físicas, geométricas y de demanda-capacidad de los elementos que componen el corredor vial.

5.1.2 Parámetros que condicionan el impacto en la operación del corredor

En la ciudad de Cali, los corredores viales se componen principalmente de intersecciones y segmentos de calles. En la presente sección se realiza un análisis al elemento *segmento vial*, el cual es equivalente a los accesos de salida y entrada de las intersecciones que componen el corredor vial típico en la ciudad de Cali. Este elemento, el cual será referido desde este punto como *acceso*, será impactado al incluir la ciclo-banda reduciéndose el ancho de los carriles que componen la calzada, presentando cambios en las condiciones de su operación. Para realizar el análisis, se consideraron corredores viales con diferentes características físicas y geométricas, posteriormente, se delimita el corredor vial a partir de *gates* o puertas de entrada y salida, tal como se mencionó en la sección 3.1.1. A estas puertas,

que para el caso de los corredores viales analizados corresponden a accesos a las intersecciones a los extremos del corredor (intersecciones acotadoras), se le realizó un análisis de sensibilidad variando el ancho de los carriles cuando se implementa ciclo-bandas de diferentes anchos. El análisis de las puertas del corredor permite establecer condiciones de demanda y capacidad de tráfico al interior del corredor, además de identificar correlaciones a partir de las condiciones de demanda-capacidad del acceso o puerta para el caso.

5.1.2.1 Selección de corredores e intersecciones

Inicialmente se realizó la identificación de corredores viales con diferentes características, considerando la cantidad de carriles, cantidad de sentidos viales, presencia de carril de uso exclusivo del Sistema Integrado de Transporte Masivo (SITM-MIO), presencia de ciclo-infraestructura, entre otras. Para la selección de los corredores también fue considerado la Resolución 4132.010.21-182 (Departamento Administrativo de Planeación de Cali, 2017), en la que se establecen sobre qué corredores viales se proyecta la inclusión de la ciclo-banda y otras ciclo-infraestructuras. Los cinco corredores seleccionados para el análisis, representan las condiciones físicas comunes de los corredores viales existentes en la ciudad de Santiago de Cali. En la Tabla 15, se listan y describen sus características generales.

Tabla 15. Corredores viales seleccionados y sus características.

ID	Corredor	Características generales
C1	Carrera 1	Corredor vial con dos calzadas bidireccionales divididas por un separador. Cada calzada cuenta con un carril de uso exclusivo del SITM-MIO y tres carriles para el tránsito mixto.
C2	Calle 16	Corredor vial con dos calzadas bidireccionales divididas por un separador. Cada calzada cuenta con tres carriles para el tránsito vehicular mixto.
C3	Calle 18	Corredor vial compuesto de dos calzadas bidireccionales divididas por un separador. Cada calzada cuenta con dos carriles para el tránsito vehicular mixto.
C4	Calle 6	Corredor vial compuesto de una calzada unidireccional de cinco carriles para el tránsito vehicular mixto.
C5	Calle 5	Corredor vial compuesto de dos calzadas bidireccionales divididas por un separador. Cada calzada cuenta con carriles de uso exclusivo del SITM-MIO y dos carriles para el tránsito mixto.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, para la selección de las intersecciones viales acotadoras se revisó que correspondieran a nodos que representasen para el corredor un inicio o fin (de acuerdo con la cantidad de sentidos) en términos de operación, es decir, intersecciones viales que condicionaran las circunstancias del flujo de tránsito dentro del corredor. Esto con el fin de lograr inferir impactos en el corredor en función de la entrada del flujo vehicular a partir de nodos claves en la operación de estos.

En la Tabla 16 se listan el par de intersecciones consideradas para cada corredor y sus accesos de entrada a la intersección (equivalentes a accesos de entrada y salida al corredor). De manera esquemática se presenta la ubicación espacial de los corredores en la ciudad de Cali, en la Figura 12.

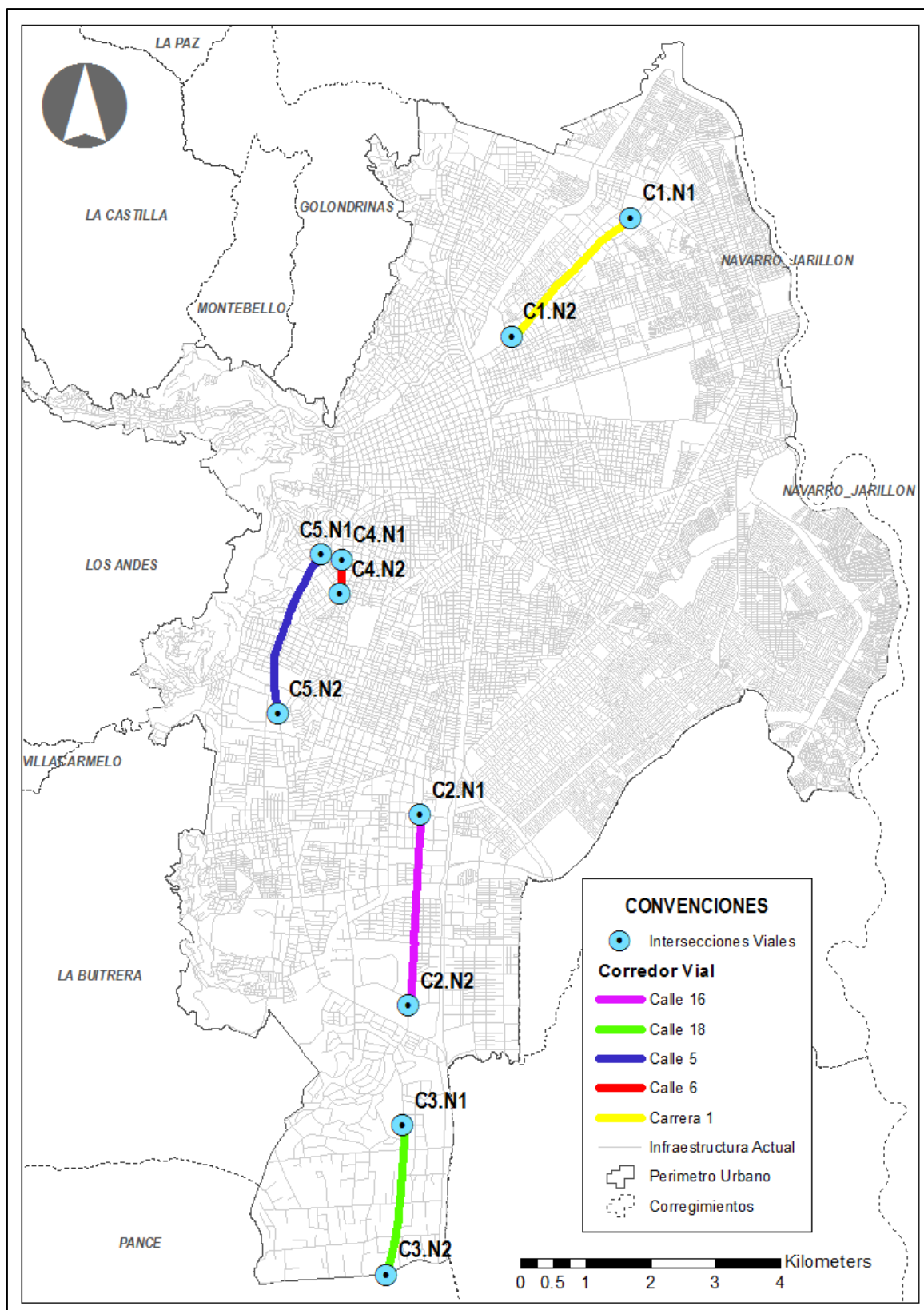


Figura 12. Localización de corredores viales.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 16. Intersecciones para acotación de corredores y sus accesos para evaluación.

ID	Intersección	Acceso/Segmento de entrada	Salida/Segmento de salida
C1.N1	Carrera 1 con Calle 62N	Calle 62AN - Calle 62N	Calle 56N - Calle 62N
C1.N2	Carrera 1 con Calle 34N	Calle 30N - Calle 34N	Calle 39N - Calle 34N
C2.N1	Calle 16 con Carrera 66	Carrera 60 - Carrera 66	Carrera 69 - Carrera 66
C2.N2	Calle 16 con Carrera 98	Carrera 100 - Carrera 98	Carrera 86 - Carrera 98
C3.N1	Calle 18 con Carrera 115	Carrera 105 - Carrera 115	Carrera 118 - Carrera 115
C3.N2	Calle 18 con Carrera 127	Carrera 146 - Carrera 127	Carrera 125 - Carrera 127
C4.N1	Calle 6 con Carrera 27	Carrera 24A - Carrera 27	Carrera 27 - Carrera 29
C4.N2	Calle 6 con Carrera 34	Carrera 29 - Carrera 34	Carrera 34 - Carrera 36
C5.N1	Calle 5 con Carrera 27	Carrera 24 – Carrera 27	Carrera 34 – Carrera 27
C5.N2	Calle 5 con Calle 6	Carrera 56 – Calle 6	Carrera 52 – Calle 6

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.2 Planteamiento de escenarios

Posterior a la selección de corredores e intersecciones, se procedió a plantear escenarios con la inclusión de diferentes secciones transversales de ciclo-bandas. De acuerdo a la literatura y las referencias bibliográficas, se definió un límite inferior de 0.80 metros y un límite superior de 2.00 metros de ancho de ciclo-banda. Con una diferencia de ancho de bici-carril de 20 centímetros, se definieron escenarios comprendidos en el rango de anchos definido. A continuación, se enlista en la Tabla 17 los escenarios considerados para cada uno de los corredores e intersecciones a evaluar.

Tabla 17. Relación de escenarios de corredores viales.

Escenario	ID	Ancho de ciclo-banda (m)
Situación base	CB = 0.0	0.0
Situación base con ciclo-banda	CB = 0.8	0.8
	CB = 1.0	1.0
	CB = 1.2	1.2
	CB = 1.4	1.4
	CB = 1.6	1.6
	CB = 1.8	1.8
	CB = 2.0	2.0

Fuente: Elaboración propia.

Cabe anotar que la variación del ancho de ciclo-banda incluida en la calzada, se ve evidenciada en la disminución del ancho de sus carriles. Que, además, esta reducción del ancho del carril está relacionada a la cantidad de carriles existentes en la calzada, presentándose reducciones más amplias por carril para calzadas con pocos carriles y menor disminución del ancho del carril para calzadas con mayor cantidad de carriles.

5.1.2.3 Modelación de escenarios en PTV VISSIM©

La inclusión de ciclo-bandas implica la reducción del ancho de la sección transversal de la calzada o bien, la reducción del ancho de sección transversal de cada uno de los carriles dentro de la calzada. Basados en el estudio del análisis integral de la red de infraestructura vial para la movilidad motorizada en el municipio de Cali (Universidad del Valle, 2015), se construyeron tablas de cálculo de los anchos de calzada y carriles intervenidos respecto a cada uno de los escenarios con diferentes anchos de ciclo-banda incluido, los cuales se documentan en el Anexo A para cada uno de los modelos de micro simulación.

Para realizar el análisis operacional de cada acceso, se utilizó el software de micro modelación PTV VISSIM®. En las secciones siguientes se describe las consideraciones realizadas en cada uno de los procesos para la construcción de los modelos.

La construcción de los modelos de micro simulación de cada una de las intersecciones viales considerados se realizó en dos pasos. El primer paso consistió en construir el modelo de la situación base y como segundo paso, se construyeron los modelos con la inclusión de ciclo-bandas. De esta forma, sólo se necesitó construir el modelo de cada intersección una sola vez, para posteriormente realizar la modificación de los anchos de las calzadas o de los carriles.

Para la construcción del modelo base o modelo de situación actual, se realizó la recolección de toda la información pertinente que permitiera llegar a las condiciones operativas y geométricas actuales. La construcción del modelo, mencionando también su proceso de calibración y validación se resume en las siguientes secciones:

5.1.2.3.1 Tipo de vehículo

Los tipos de vehículos definidos para la simulación vehicular corresponden a los vehículos predeterminados en VISSIM®: autos, motos, autobuses, camiones y bicicletas. Para los tipos de vehículo asociados al SITM MIO, se crearon copias de la tipología de autobuses, mientras que el bus articulado fue creado a partir de modelos de vehículos dispuestos en la base de datos del software.

5.1.2.3.2 Comportamiento de conducción

Para la configuración del comportamiento de conducción se realizaron modificaciones a los parámetros predeterminados por VISSIM® para los diferentes estados de comportamiento para cada tipo de vehículo. La modificación de los parámetros hizo parte del proceso de calibración de los volúmenes del modelo tomando como medida de control valores de *GEH* de acuerdo a la sección 3.3.3.10. Se menciona de forma general las modificaciones realizadas a los parámetros predeterminados por VISSIM®.

- Respecto a los parámetros del modo de conducción tipo seguimiento, se empleó el modelo Wiedemann 74, el cual es un modelo idóneo para el tráfico urbano y zonas de entrecruzamiento.
- A los parámetros del estado de conducción, cambio de carril, se definió un comportamiento general de libre selección de carril, permitiendo a los vehículos adelantar en cualquier carril.
- Del comportamiento lateral se definió la posición deseada en el carril a flujo libre y las distancias laterales mínimas para cada tipología vehicular. A las tipologías auto, autobús y camiones se le definió la posición al centro de carril, a las motos, cualquier posición del carril y a las bicicletas el costado derecho del carril extremo derecho. Las distancias laterales mínimas fueron definidas de acuerdo con observaciones generales del comportamiento vehicular y con el apoyo de un técnico con conocimiento en temas de comportamiento vehicular.
- Las funciones de aceleración y desaceleración fueron modificadas para representar de forma aproximada el arranque diferencial que existe por tipología vehicular, definiendo por ejemplo tasas de aceleración de arranque más altas que los autos.

Las mencionadas configuraciones tuvieron como fin replicar en general y de forma aproximada el comportamiento vehicular que normalmente se evidencia en la ciudad de

Santiago de Cali, caracterizado por ser un comportamiento agresivo. Para realizar las configuraciones fueron considerados parámetros de comportamiento de conducción adoptados en modelos VISSIM© desarrollados en estudios de tránsito en la ciudad de Cali por grupos consultores de tránsito y el grupo de investigación de la Universidad del Valle Grupo de Investigación en Transporte, Tránsito y Vías - GITTV. Los resultados de estas configuraciones se evidencian en la sección 5.1.2.3.10 a través del indicador estadístico GEH.

5.1.2.3.3 Links y conectores

La red vial de cada intersección fue construida a partir de los elementos *links* y *conectores*. De acuerdo con el estudio del *Análisis integral de la red de infraestructura vial para la movilidad motorizada en el municipio de Cali* (Universidad del Valle, 2015), en el cual se realizó un inventario de secciones transversales de las principales vías de la ciudad, se editó de cada link la cantidad y anchos de carriles. Las intersecciones y accesos fueron dibujados sobre los mapas georreferenciados ofrecidos por VISSIM©. En adición a esto, se revisaron y ajustaron detalles geométricos a partir de visualizaciones 3D y 2D de Google Earth© para incluir todos los tipos de configuraciones viales existentes en la intersección.

En la Figura 13 se muestra la red de los modelos de las intersecciones consideradas para el análisis de los corredores, haciendo en ellas una diferenciación visual entre el link (en negro) y el conector (en rojo). Las intersecciones Calle 5 con Carrera 27 y Calle 5 con Calle 6 hacen parte de modelos desarrollados en posteriores capítulos.



Figura 13. Intersecciones modeladas visualizando links (en negro) y conectores (en rojo).

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.3.4 Elementos de red adicionales

Posterior a la construcción de la red vial del modelo, se incluyeron los elementos de red adicionales. Estos elementos adicionales, ubicados transversalmente en los links y conectores – de forma perpendicular al eje, recolectan información y regulan parámetros operativos del flujo vehicular.

- **Recolectores de información:** Los puntos de recolección de datos y las secciones de tiempo de viaje se dispusieron en los tramos de entrada y salida de los accesos correspondientes al corredor. Los nodos se dispusieron de modo que ‘encerraran’ los accesos a la intersección.
- **Reguladores de parámetros:** Se ubicaron áreas de reducción de velocidad para replicar la reducción de velocidad en los movimientos con giro en la intersección.

5.1.2.3.5 Control del tráfico

Para representar el control semafórico se crearon controladores semafóricos (CS) de tiempo fijo de acuerdo con los datos obtenidos de recolección de información primaria y secundaria (Universidad del Valle, 2017). Para los conflictos de convergencia en las intersecciones se configuraron las áreas de conflicto de modo que correspondiera a la realidad, pero también disponiéndolas para evitar el bloqueo y entorpecimiento de los vehículos cruzando la intersección.

5.1.2.3.6 Balanceo

El balanceo, un proceso para hacer igual los volúmenes de entrada y salida al corredor, no fue realizado para los modelos de las intersecciones debido a que las rutas de los viajes de acceso a la intersección se componen solamente de dos calles, la calle de entrada y la calle de salida.

5.1.2.3.7 Tráfico vehicular

El tráfico vehicular fue modelado a través de rutas y volúmenes estáticos, por lo tanto, fueron definidas variables de composición vehicular, entrada de vehículos y decisiones de rutas.

- **Composición vehicular:** las composiciones vehiculares creadas corresponden a las tipologías vehiculares: autos, motos, bicicletas, busetas, buses y camiones.
- **Entrada de vehículos:** la entrada de vehículos se estableció al inicio de los accesos a la intersección. Los volúmenes de los tipos de vehículos mencionados fueron ingresados en vehículos por hora correspondientes a los volúmenes de entrada obtenidos de la identificación de horas de máxima demanda de días típicos.
- **Decisiones de ruta:** dado que las redes de las intersecciones son sencillas, sólo fue necesario ubicar puntos de decisión en los accesos y los múltiples destinos en las salidas de la intersección para conseguir la distribución de volúmenes.

5.1.2.3.8 Transporte público

El transporte público modelado a través de las intersecciones corresponde al Masivo Integrado de Occidente, MIO. Se identificó para cada intersección la presencia de líneas de transporte y paradas MIO, revisando: ubicación y asignación de paradas para cada línea, y frecuencia de paso en paradas. En cuanto a los buses de transporte público colectivo, fueron modelados

como vehículos por hora de acuerdo con la sección anterior.

5.1.2.3.9 Simulación

Para la apropiada simulación de cada modelo se revisaron los parámetros de periodo, resolución, velocidad, número de corridas y semilla de aleatoriedad de simulación.

- **Periodo de simulación:** el periodo de simulación se definió en 4500 segundos – (1 hora 15 minutos). Los primeros 15 minutos corresponden al periodo de precarga, que posibilita que la red sea alimentada por los flujos vehiculares. Los siguientes 60 minutos corresponden al periodo de evaluación.
- **Resolución y velocidad de simulación:** la resolución de la simulación se definió en 10, esto permitió que las posiciones de los vehículos se calcularan 10 veces por segundo de simulación, haciendo el proceso microscópico más detallado. En cuanto a la velocidad de simulación se estableció en *máxima capacidad*, ejecutando la simulación a su máxima velocidad posible. Cabe anotar que esta velocidad no afecta los resultados de la simulación.
- **Número de corridas y semilla de aleatoriedad:** cada modelo fue corrido 10 veces conforme a recomendaciones de Collins, P. (2009). En cuanto a la semilla, parámetro de aleatoriedad del modelo, se configuró para que cada corrida tuviera una semilla distinta. Las semillas de cada corrida fueron las mismas para las múltiples simulaciones de todos los modelos, para poder obtener resultados comparables en cuanto a simulación.

5.1.2.3.10 Calibración y validación

La calibración del modelo tuvo dos componentes: validación visual del modelo a partir de la calibración de parámetros del comportamiento vehicular y, validación del modelo a partir de la comparación de los volúmenes modelados y los registrados en campo.

- **Validación visual:** se realizó una validación visual del comportamiento vehicular logrado en el modelo. Para esta validación se revisaron aspectos como el movimiento lateral por tipo de vehículo, el despeje de la intersección, la congestión, la existencia de conflictos, entre otros. Se contó con el apoyo de un especialista en ingeniería de tránsito y con conocimiento de las zonas de estudio para realizar la validación visual.
- **Comparación de volúmenes (GEH):** para realizar la validación de volúmenes se registraron volúmenes de autos y motos en los enlaces de las intersecciones, para posteriormente calcular el GEH para cada uno de los movimientos existentes en la intersección. De acuerdo con la sección 3.3.3.10, fueron considerados los criterios de *GEH* para la categoría de modelo tipo F, de acuerdo con la Tabla 11. A continuación, en la Tabla 18, se resumen los resultados de valores de *GEH* obtenidos para los movimientos de motos y autos de las intersecciones modeladas.

Tabla 18. Resultados calibración *GEH*.

Intersección	No. de movimientos	<i>GEH</i> < 5%	<i>GEH</i> < 7.5%	<i>GEH</i> < 10%
Calle 16 con Carrera 66	24	100%	100%	100%
Calle 16 con Carrera 98	14	100%	100%	100%
Calle 34N con Carrera 1	16	100%	100%	100%
Calle 62N con Carrera 1	20	95%	100%	100%
Calle 6 con Carrera 27	8	100%	100%	100%
Calle 6 con Carrera 34	14	100%	100%	100%
Calle 18 con Carrera 115	12	100%	100%	100%
Calle 18 con Carrera 127	28	100%	100%	100%
Calle 5 con Carrera 27	10	100%	100%	100%
Calle 5 con Calle 6	16	100%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 18, todos los resultados de *GEH* cumplen con los porcentajes mínimos definidos para una categoría de modelo tipo F, evidenciados en la Tabla 11 del capítulo 3.3.3.10.

5.1.2.4 Análisis y discusión de resultados

Para realizar el análisis de sensibilidad a los accesos de las intersecciones consideradas, se realizó una comparación de porcentajes de cambio de medidas de desempeño respecto a resultados de la situación actual escenario CB=0,0. Esta comparación se usó para realizar una normalización de valores de cada parámetro respecto de su valor máximo, es decir, respecto del máximo cambio presentado para la medida de desempeño. Con este procedimiento matemático se buscó identificar patrones de cambio respecto de una condición inicial con relación al ancho promedio de carril de un acceso.

Las medidas de desempeño consideradas corresponden a medidas de evaluación disponibles en el software VISSIM®. Las variables que se tuvo en cuenta para realizar el análisis de cambio fueron: volumen, velocidad, longitud de cola (L. Cola), paradas, emisiones de CO, emisiones de NOx, demoras por parada (D. Parada) y combustible. A continuación, en la Tabla 19, se muestra un ejemplo del ejercicio de realizar el cálculo de los porcentajes de cambio para los mencionados criterios de evaluación, correspondientes al Acceso Sur-Norte de la intersección Calle 16 con Carrera 98. Los porcentajes se presentan en forma absoluta, para así posteriormente realizar el proceso de normalización.

Tabla 19. Porcentajes de cambio para el Acceso S-N de la Calle 16 con Carrera 98.

Escenario	Volumen	Velocidad	L. Cola	Paradas	CO	NOx	D. Parada	Combustible
CB=0.0	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
CB=0.8	3%	4%	8%	19%	8%	8%	5%	8%
CB=1.0	3%	8%	16%	31%	15%	15%	11%	15%
CB=1.2	3%	15%	34%	56%	28%	28%	23%	28%
CB=1.4	3%	23%	62%	94%	49%	49%	39%	49%
CB=1.6	3%	34%	106%	153%	81%	81%	67%	81%
CB=1.8	3%	43%	161%	217%	115%	115%	99%	115%
CB=2.0	4%	52%	258%	317%	169%	169%	148%	169%

Fuente: Elaboración propia.

Posterior al cálculo de los porcentajes de cambio, se procedió a normalizar los valores de cada medida de desempeño en función del máximo valor presentado. Con este paso se busca identificar en un rango de 0,0 a 1,0 (expresado en porcentaje) cómo se comportan los porcentajes de cambio respecto a los valores de las medidas de desempeño para el escenario

CB=0,0. En la Tabla 20 se muestran los cálculos realizados para el acceso mencionado.

Tabla 20. Porcentajes de cambio ponderados para el Acceso S-N de la Calle 16 con Carrera 98.

Escenario	Volumen	Velocidad	L. Cola	Paradas	CO	NOx	D. Parada	Combustible	NDS
CB=0.0	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	4
CB=0.8	63%	7%	3%	6%	5%	5%	4%	5%	4
CB=1.0	67%	14%	6%	10%	9%	9%	7%	9%	4
CB=1.2	70%	28%	13%	18%	17%	17%	15%	17%	4
CB=1.4	70%	44%	24%	30%	29%	29%	26%	29%	5
CB=1.6	77%	65%	41%	48%	48%	48%	45%	48%	5
CB=1.8	86%	82%	62%	68%	68%	68%	67%	68%	5
CB=2.0	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	6

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los datos normalizados se obtienen gráficos que relacionan los porcentajes de cambio normalizados y el ancho del carril para tráfico motorizado, de acuerdo al ancho de la ciclo-banda. El análisis de estos gráficos tiene como variable moderadora (variable que altera el efecto que una variable independiente tiene sobre la variable dependiente) el Nivel De Servicio (NDS). Esta variable se presenta en las gráficas como un eje vertical secundario. En adición, se complementa el análisis asociando las tendencias observadas en las gráficas al volumen que transitó por el acceso. A continuación, se detallan gráficos de accesos específicos identificados y seleccionados para explicar las tendencias y patrones descritos a seguir. Las tendencias identificadas se presentan de igual modo para los restantes accesos de las intersecciones, cuyas graficas se pueden apreciar en el Anexo A.

En la Figura 14 se relacionan los porcentajes de diferencia normalizados para el Acceso Oriente-Occidente de la intersección Calle 34N con Carrera 1. Se mencionan inicialmente dos datos: el NDS para el escenario base CB=0,0 (ancho de carril de 3,05 m) es 3 (NDS = C) y, la diferencia de volúmenes entre el escenario con un ancho de carril de 3,05 (escenario CB=0,0) y un ancho de carril de 2,38 (escenario CB=2,0), fue de 27 vehículos mixtos partiendo de un volumen inicial de 2152 vehículos mixtos. En términos generales se observa que el NDS se mantuvo a pesar de reducir los anchos de los carriles para el tráfico mixto, sin embargo, se observa una tendencia de incremento progresivo del cambio de las medidas de desempeño para escenarios de anchos de carril reducido a partir de valores de ancho de carril menores a los 2,58 metros (escenario CB=1,4).

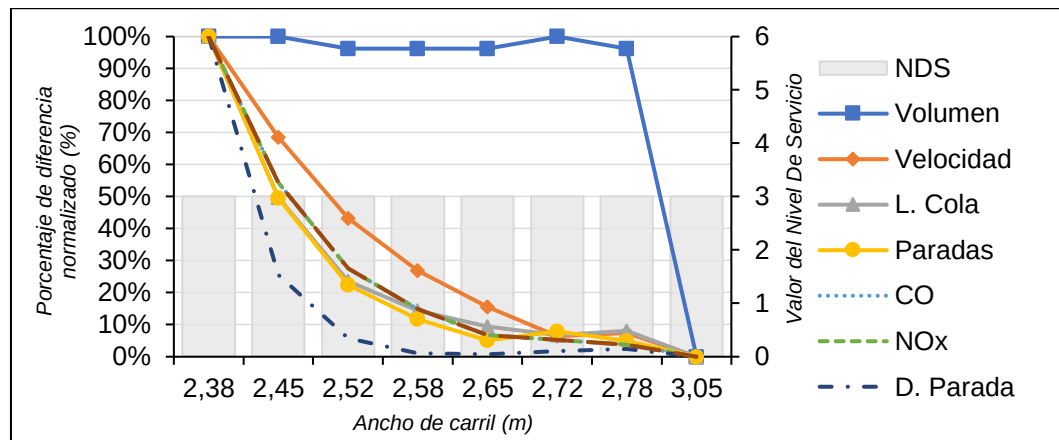


Figura 14. Porcentajes de diferencia normalizados para el Acceso Oriente-Occidente de la intersección Calle 34N con Carrera 1.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 15 se muestra la gráfica para el Acceso Sur-Norte de la intersección Calle 16 con Carrera 98. Las diferencias de volúmenes entre el escenario sin inclusión de ciclo-banda y el escenario CB=2,0 (ancho de carril de 2,33 m) es de 57 vehículos mixtos, partiendo de un volumen de 2569 vehículos mixtos en el escenario CB=0,0 (ancho de carril de 3,0 m). Se observa que el nivel de servicio empeora a medida que el ancho del carril se reduce. A diferencia de la Figura 14, el cambio de volumen aumenta cada vez que el ancho del carril se reduce. En cuanto a las medidas de desempeño, se observa que las diferencias respecto de los resultados del escenario CB=0,0, empiezan a ampliarse a medida que el ancho de carril disminuye.

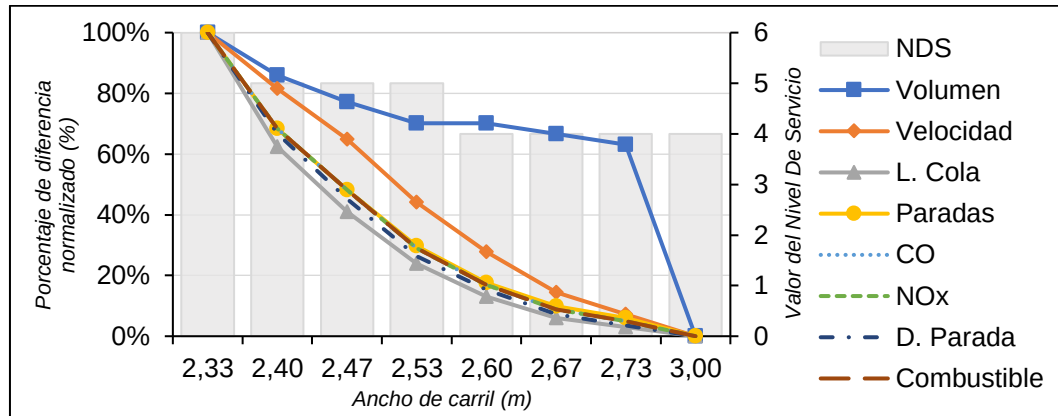


Figura 15. Porcentajes de diferencia normalizados para el Acceso Sur-Norte de la intersección Calle 16 con Carrera 98.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 16 se muestran los datos obtenidos para el Acceso Occidente-Oriente de la intersección Calle 34N con Carrera 1. Para este caso, el nivel de servicio se encontraba inicialmente en F y así se mantuvo al implementar la ciclo-banda con diferentes anchos. Con respecto a los volúmenes, se registró un cambio de los volúmenes que atraviesan el acceso partiendo de 4109 vehículos mixtos en escenario CB=0,0 (ancho de carril de 3,05 m) y disminuyendo a 3406 vehículos mixtos para el escenario CB=2,0 (ancho de carril de 2,33 m). Gráficamente, se observa que las diferencias de los resultados de las medidas de desempeño en relación con el escenario inicial son más amplias que los escenarios posteriores, en los cuales, se evidencia que las diferencias aumentan proporcionalmente.

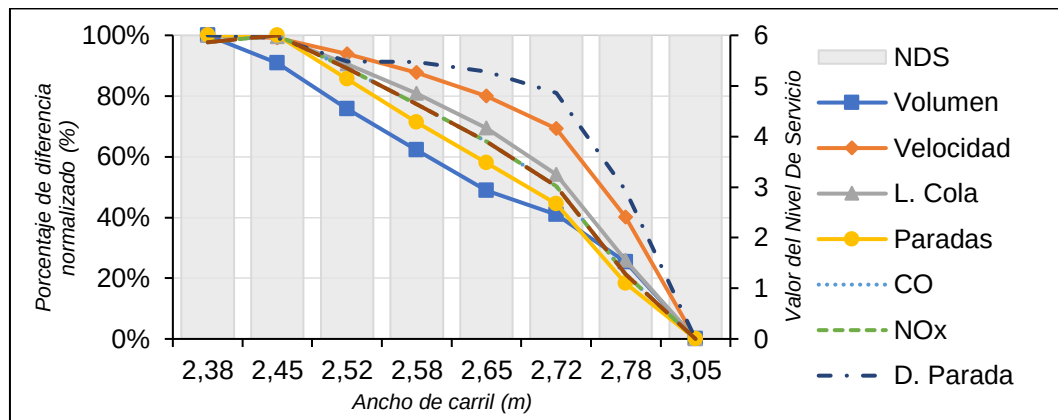


Figura 16. Porcentajes de diferencia normalizados para el Acceso Occidente-Oriente de la intersección Carrera 1 con Calle 34N.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, se muestra en la Figura 17 los resultados para el Acceso Norte-Sur de la intersección Calle 5 con Carrera 27. Para el caso, la diferencia de volúmenes fue de 1487 vehículos mixtos, partiendo de un volumen inicial del escenario CB=0,0, de 2744 vehículos mixtos. En cuanto al nivel de servicio, se mantuvo en F para todos los escenarios. Gráficamente se observa que las longitudes de cola aumentaron en un 70% (en relación con la máxima longitud de cola presentada) para el primer escenario con ciclo-banda. Las demás medidas de desempeño presentan un comportamiento similar al mencionado, pero en menor cuantía. Se identifica una tendencia al aumento de los valores de las diferencias de las medidas a partir de anchos de carril de 2,90 m. Cabe resaltar de la Figura 16 y Figura 17 que el comportamiento de la línea de porcentajes del volumen se comporta de forma similar a las demás medidas de tendencia, diferente a las demás gráficas.

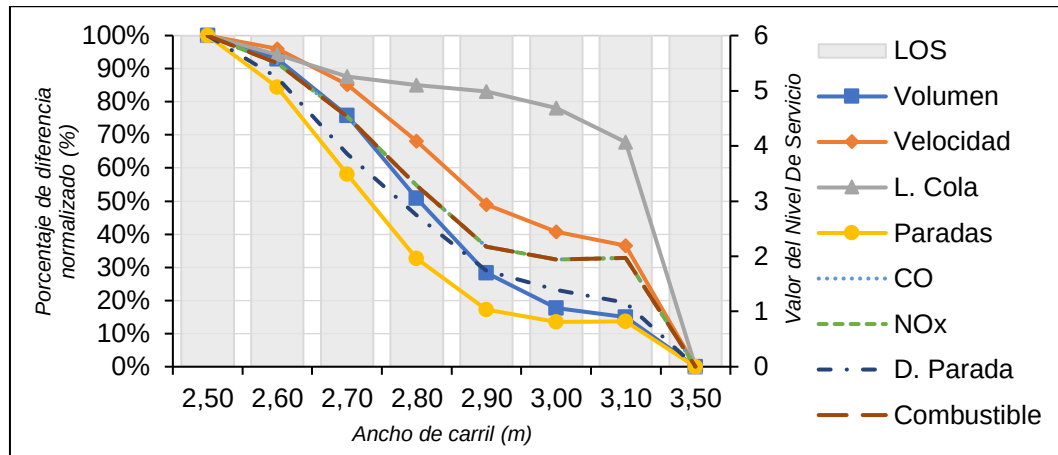


Figura 17. Porcentajes de diferencia normalizados para el Acceso Norte-Sur de la intersección Calle 5 con Carrera 27.

Fuente: Elaboración propia.

Se resumen en los siguientes puntos los resultados obtenidos:

- Se observa que las medidas de desempeño presentan un patrón de comportamiento de cambio en cada acceso analizado, es decir, están correlacionadas y aunque presenten distintas magnitudes de medición, la sensibilidad a la reducción del ancho de carril marca una tendencia.
- Se identifica que la calidad del flujo vehicular (NDS) está asociada al comportamiento de los cambios de las medidas de desempeño en relación con un escenario de situación inicial. De las gráficas se observa que cuando el nivel de servicio es bueno o regular, los impactos de la reducción de los anchos de carril se exteriorizan en los porcentajes de cambios de forma creciente exponencial o lineal, es decir, el NDS en las condiciones mencionadas, se va afectando en mayor medida cada vez que se reduce el ancho de carril.

En los casos en los que el NDS del acceso era deficiente, el impacto evidenciado en las medidas de desempeño se observa inmediato y sostenido, es decir, el acceso no posee una tolerancia o bien, es sensible a una intervención al ancho del carril sin importar el ancho de la ciclo-banda incluida. Diferente a como sucede en casos donde el acceso posee un NDS aceptable, o sea, existe una tolerancia del NDS a la reducción del ancho del carril.

Complementando el punto anterior, es observado en cuanto al volumen que las diferencias de vehículos mixtos registrados en los modelos de los diferentes escenarios se amplían de acuerdo con el NDS inicial o del escenario sin ciclo-banda. Se observa

de las gráficas que entre más desfavorable sea el NDS inicial, mayores son los cambios de volumen del tránsito mixto que transita por el acceso.

- Por último, en relación con los anchos de carril para el tráfico mixto y su incidencia en los comportamientos de cambio de las medidas de desempeño presentes en las gráficas, pueden mencionarse que de nuevo el NDS influencia los impactos a las variables de operación. Se reconocen dos estados, uno en que el impacto al acceso es provocado por la reducción del ancho del carril y otro en que el impacto al acceso es provocado inmediatamente por la inclusión de la ciclo-banda, sin importar su ancho. Del primer caso (observado mayormente en la primera gráfica), se observa un alza de los porcentajes de cambio entre anchos de carril de 2,50 y 2,60 metros. Del segundo caso (observado en las dos últimas gráficas) no es identificable un punto de inflexión en cuanto al ancho del carril, el impacto inmediato sucede cuando se incluye la ciclo-banda.

Aunque el análisis realizado solo corresponde a accesos de intersecciones al inicio y final del corredor, el ejercicio realizado en el presente capítulo puede ayudar a inferir cómo internamente en el corredor los impactos en cada acceso de sus intersecciones pueden comportarse. Sin embargo, este procedimiento resultaría en un análisis de elementos aislados y no como un sistema, la cual es la dimensión en la que se ubica un corredor vial urbano. Es importante reconocer que, a partir de las gráficas analizadas, se observa cómo la cantidad de vehículos motorizados entregados por el acceso al corredor disminuye y que, por lo tanto, las condiciones de operación al interior del corredor van a cambiar debido a la reducción de capacidad tanto en los accesos y salidas como en los propios accesos que conforman el corredor.

El análisis realizado permite validar los indicadores de tipo operacional identificados. Sin importar las condiciones de operación de los accesos o segmentos que componen el corredor, los indicadores analizados se muestran pertinentes para la realización de una evaluación global del estado de la movilidad sostenible en corredores viales.

5.2 EVALUACIÓN DE IMPACTOS SOBRE LA MOVILIDAD EN CORREDORES VIALES

En el desarrollo de la metodología para evaluar el impacto a la movilidad de corredores viales debido a la inclusión de ciclo-bandas se hace necesario contar con una herramienta que permita realizar el diagnóstico y monitoreo de la movilidad en corredores viales y posteriormente realizar su validación por medio de su aplicación a un corredor vial en la ciudad de Cali. El proceso de construcción del índice se realizó a partir del conjunto de parámetros o indicadores identificados de la revisión de literatura en la sección 5.1.1.

5.2.1 Construcción del índice de movilidad

El Índice de Movilidad Sostenible para Corredores Viales (*IMCV*) construido y descrito en el presente capítulo, está constituido por criterios organizados jerárquicamente en 5 dominios, 11 temas y 20 indicadores. Su método de agregación permite la compensación entre criterios de desempeño favorable y desfavorable. El índice presenta además escalas de evaluación para cada indicador, permitiendo verificar el desempeño en relación con metas preestablecidas y realizar análisis comparativos entre diferentes corredores viales.

5.2.1.1 Metodología base

La primera etapa para la construcción de un método de evaluación de la movilidad sostenible en corredores viales consistió en definir la metodología. De la revisión de

antecedentes y del marco teórico del tema de movilidad sostenible se reconoció que integra de forma interdisciplinaria diversos aspectos. El concepto de movilidad sostenible va más allá de la común definición operacional; esta engloba aspectos ambientales, sociopolíticos y aspectos relacionados con los sistemas de transporte e integra los modos no motorizados como componente fundamental.

La principal referencia bibliográfica para la construcción de la metodología para la evaluación de la movilidad sostenible fue la propuesta por Costa (2008) en su trabajo investigativo “Un índice de movilidad urbana sostenible - *IMUS*” (en portugués, *Um índice de mobilidade urbana sustentável - IMUS*). En su tesis PhD, construye un índice de movilidad urbana sostenible con aplicación a ciudades brasileñas a partir de la identificación de los conceptos que estructuran la referencia de la movilidad sostenible. El índice *IMUS* tiene una estructura de evaluación Multicriterio de Apoyo a la Decisión - Constructivista (en inglés, *Multicriteria Decision Aid – Constructivist* o MCDA-C), que consiste en una técnica de evaluación que lleva en consideración aspectos estimados importantes por el usuario. Tanto el índice como la metodología de su construcción fueron abordados en la sección 3.2.2.

5.2.1.2 Jerarquía

La construcción se realizó tomando como modelo la estructura del índice desarrollado por Costa (2008). Esta estructura y sus principios de asociación de criterios fueron considerados como plantilla para la construcción del Índice de Movilidad sostenible para Corredores Viales (*IMCV*).

La estructura de la jerarquía de criterios que representa las relaciones entre los elementos que componen el índice es mostrada en la Figura 18. En el nivel superior o nivel de dominios se encuentran un grupo de alternativas o principios que reflejan grandes áreas de evaluación; estos son los criterios *tipo Dominio*. En el siguiente nivel se ubican metas que reflejan temas específicos asociados a las alternativas; estos son los criterios *tipo Tema*. En el último nivel se encuentran los indicadores, equivalentes a estrategias de monitorización de los temas; estos son los criterios *tipo Indicador*.

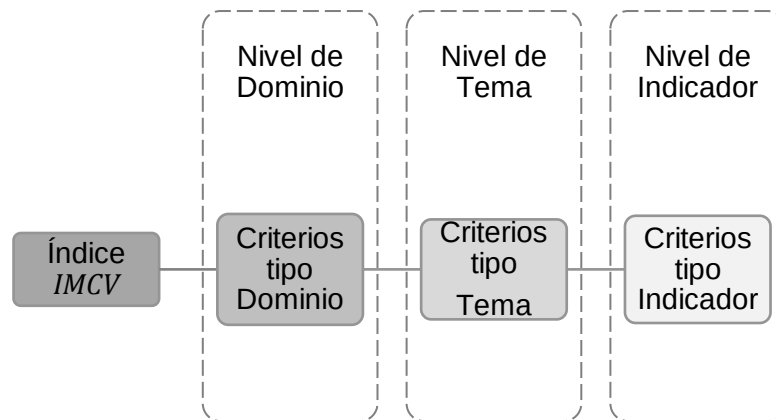


Figura 18. Niveles jerárquicos de los criterios del *IMCV*.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 19 se presenta la estructura final del *IMCV*, construido a partir de los indicadores obtenidos del proceso de comparación en la sección 5.1.1, considerando la estructura jerárquica de tres niveles en la Figura 18.

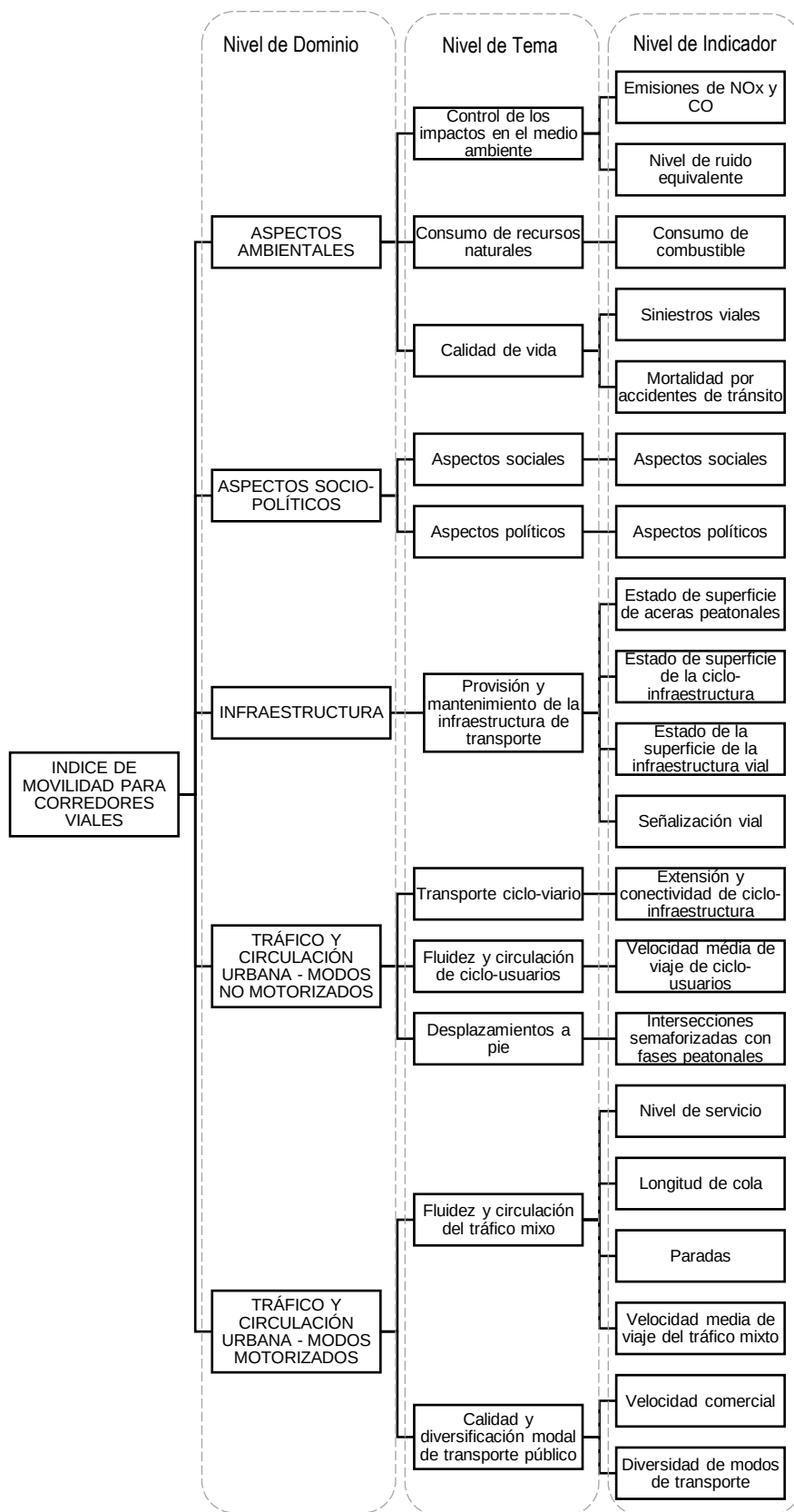


Figura 19. Estructura jerárquica de Dominios, Temas e Indicadores del IMCV.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.1.3 Pesos

Los pesos para los criterios que componen el *IMCV* fueron obtenidos y definidos a través de una encuesta realizada a un panel de especialistas colombianos en áreas de planeamiento urbano, transporte y movilidad. La selección de los especialistas fue hecha con base en su experiencia previa en trabajos desarrollados en áreas relacionadas a temas de infraestructura vial, planeamiento urbano e ingeniería de tránsito. La intención fue involucrar investigadores con conocimiento en diferentes campos, permitiendo un análisis comparativo de los criterios que componen el índice y la determinación de su importancia relativa para la sostenibilidad urbana en corredores viales. En este sentido, fueron convocados a participar especialistas que han desarrollado trabajos e investigaciones relevantes en áreas como: estudios de tránsito de corredores viales, políticas de movilidad sostenible en calles y/o corredores, investigaciones y políticas relacionadas con modos no motorizados, entre otras.

La consulta a los especialistas se realizó mediante una encuesta en formato digital, la cual estuvo disponible durante treinta días para su diligenciamiento. El formulario de la encuesta se presenta en el Anexo B.

En la encuesta se buscó organizar el proceso de evaluación de modo que los especialistas no tuvieran que digitar ningún valor, facilitando el proceso de evaluación. Sin embargo, al final de la encuesta se dispuso de un espacio opcional para realizar comentarios, dudas y sugerencias.

Primero se realizó una introducción para contextualizar el objeto de estudio y un breve marco teórico. En las siguientes secciones, se solicitaba al encuestado validar la importancia relativa de los *Temas* y los *Dominios* respecto al índice *IMCV*. Esta evaluación fue hecha atribuyendo una puntuación variable de 1 a 5, variando de ‘insignificante’ a ‘extremadamente importante’, conforme a la Figura 20.

Insignificante	1	2	3	4	5	Extremadamente importante
----------------	---	---	---	---	---	---------------------------

Figura 20. Escala de evaluación de criterios de *IMCV*.

Fuente: Elaboración propia.

Un ejemplo de una tabla de evaluación para los temas del dominio *Aspectos Ambientales* se muestra en la Figura 21.

En total, diez especialistas participaron del proceso de evaluación. Al cierre de los treinta días disponibles para el desarrollo de la encuesta, fue hecha una verificación de la consistencia de las evaluaciones, revisando que no faltara ninguna tabla de evaluación por responder y que las respuestas no sugirieran que los resultados no debían tomarse en cuenta. Los resultados de la evaluación por especialista, así como los pesos obtenidos para cada criterio se agrupan en el Anexo B.

Los pesos de los temas y dominios fueron obtenidos directamente de los resultados del panel de especialistas. Se calculó la media aritmética de los valores definidos por los participantes, expresados en la escala de evaluación de 1 a 5. Posteriormente estos valores fueron normalizados para el intervalo entre 0,00 y 1,00 de acuerdo con los grupos de *Temas* y grupos de *Dominios*, obteniendo los pesos finales para cada *Tema* y *Dominio*. De esta forma, si se suman los pesos de los *Temas* por *Dominio* resultan en un valor igual a 1,00. También, si se suman los pesos de los *Dominios* del índice resultan en un valor igual a 1,00.

SECCIÓN 3: TEMAS

Valide a continuación cada *Tema* a partir de una puntuación numérica del 1 al 5, variando desde "insignificante" hasta "extremadamente importante", conforme a la figura mostrada a continuación:

Insignificante 1 2 3 4 5 Extremadamente importante

Tema: Aspectos ambientales *

¿Cuál considera usted que es el nivel de importancia de los siguientes Temas para el Dominio **Aspectos Ambientales**?

Control de los impactos al medio ambiente:

Niveles de ruido y emisión de gases contaminantes provocados por el tráfico vehicular motorizado.

Recursos naturales:

Consumo de combustible por vehículos motorizados.

	1	2	3	4	5
Control de los impactos al medio ambiente	☐	☐	☐	☐	☐
Recursos naturales	☐	☐	☐	☐	☐

Figura 21. Ejemplo de tabla de evaluación de los temas del *IMCV*.

Fuente: Elaboración propia.

Con relación a los indicadores, se les asignaron pesos iguales para los indicadores integrantes de cada tema, normalizados también para el intervalo de 0,00 a 1,00. Al realizar la distribución de pesos de indicadores de esta forma, es posible substituir indicadores o insertar nuevos indicadores para la evaluación del *IMCV* sin necesidad de proceder a un panel de especialistas para la definición de pesos.

En efecto, el ejercicio de insertar nuevos indicadores fue hecho después de realizar la encuesta. De las encuestas fueron obtenidos comentarios con sugerencias en cuanto a los criterios del índice. Por mencionar, se recibió la sugerencia de considerar indicadores para desplazamientos a pie e indicadores asociados a la accidentalidad vial. Después de revisar y considerar las sugerencias, se efectuaron los cambios pertinentes, reflejándose en el contenido de los criterios referidos en la encuesta.

La adición de indicadores fue hecha como se describió anteriormente. Fueron añadidos a los correspondientes *Temas* los nuevos *Indicadores*, cuidando en redistribuir los pesos de los *Indicadores* existentes de modo que la suma final de los pesos de los *Indicadores* se mantuviera en 1,00.

Para la inclusión de *Temas* se realizó un procedimiento diferente al de los indicadores. Por ejemplo, el *Tema Desplazamientos a pie* no estaba inicialmente en el índice. Para su inclusión se revisó en la bibliografía, específicamente en el índice *IMUS*, la presencia del tema para posteriormente a partir de las proporciones de peso existentes en el índice *IMUS* calcular el peso del tema a incluir en el índice, siempre manteniendo la proporción de los pesos calculados a partir de las encuestas. Los resultados obtenidos después de efectuar las recomendaciones consideradas se muestran en la Tabla 21, presentando la estructura completa del *IMCV* con sus *Dominios*, *Temas* e *Indicadores*, con los respectivos pesos.

Tabla 21. Estructura jerárquica de criterios de *IMCV* y respectivos pesos.

IDd	DOMINIO	PESOd	IDt	TEMA	PESOt	IDI	INDICADOR	PESOi
1	Aspectos Ambientales	0,192	1.1	Control de los impactos en el medio ambiente	0,36	1.1.1	Emisiones NOx y CO	0,50
						1.1.2	Nivel de ruido equivalente	0,50
			1.2	Consumo de recursos naturales	0,28	1.2.1	Consumo de combustible	1,00
			1.3	Calidad de vida	0,36	1.3.1	Siniestros viales	0,50
						1.3.2	Mortalidad por accidentes de tránsito	0,50
2	Aspectos Sociopolíticos	0,188	2.1	Aspectos Sociales	0,54	2.1.1	Aspectos sociales	1,00
			2.2	Aspectos Políticos	0,46	2.2.1	Aspectos políticos	1,00
3	Infraestructura	0,221	3.1	Provisión y mantenimiento de la infraestructura de transporte	1,00	3.1.1	Estado de superficie de aceras peatonales	0,25
						3.1.2	Estado de superficie de ciclo-infraestructura	0,25
						3.1.3	Estado de superficie de infraestructura vial	0,25
						3.1.4	Señalización Vial	0,25
4	Tráfico y Circulación Urbana - Modos No Motorizados	0,211	4.1	Transporte ciclo-viario	0,33	4.1.1	Extensión y conectividad de ciclo-infraestructura	1,00
			4.2	Fluidez y circulación de ciclo-usuarios	0,30	4.2.1	Velocidad media de viaje de ciclo-usuarios	1,00
			4.3	Desplazamientos a pie	0,37	4.3.1	Intersecciones semaforizadas con fases peatonales	1,00
5	Tráfico y Circulación Urbana - Modos Motorizados	0,188	5.1	Fluidez y circulación del tráfico mixto	0,43	5.1.1	Nivel de servicio	0,25
						5.1.2	Longitud de cola	0,25
						5.1.3	Paradas	0,25
						5.1.4	Velocidad media de viaje del tráfico mixto	0,25
			5.2	Calidad y diversificación modal del transporte público	0,57	5.2.1	Velocidad comercial del transporte público	0,50
						5.2.2	Diversidad de modos de transporte	0,50

Fuente: Elaboración propia.

5.2.1.4 Normalización de los criterios

Una vez consolidada la jerarquía de criterios del *IMCV* y definidos sus respectivos pesos, la etapa posterior consistió en la definición del proceso de normalización de las *puntuaciones* para los indicadores, de modo que puedan ser comparables y posibles de ser agregados a través de un modelo matemático o reglas de decisión.

El proceso de cálculo del *IMCV* consiste en la obtención de una *puntuación* normalizada para los valores de los indicadores, definida entre los límites mínimos y máximos de 0,00 y 1,00, respectivamente. Para eso es determinada una *Escala de Evaluación* para cada indicador, donde son asociados a los valores mínimo y máximo y valores de referencia, valores de referencia para la *puntuación* del indicador. Las escalas de evaluación para todos los indicadores que componen el *IMCV* son presentadas en el Anexo C.

Las escalas de evaluación fueron definidas conforme a la tipología del indicador, pudiendo ser cuantitativos y cualitativos. Los indicadores cuantitativos se tratan de medidas calculadas

a partir de datos cuantitativos con origen en bases de datos y levantamientos de información en campo, entre otras fuentes. Para estos indicadores son definidas escalas de evaluación basadas en su mayoría en funciones matemáticas lineales. Así, la normalización de la *puntuación* es hecha a través de la verificación del valor de referencia correspondiente directamente en la escala, o en el caso de valores intermedios a los disponibles en la escala, a través de interpolación.

La relación entre la puntuación y el valor de referencia puede ser directa o indirectamente proporcional, dependiendo del tipo de contribución a la movilidad sostenible, por ejemplo, una contribución negativa indica que entre mayor es el valor de referencia, menor es el valor de la puntuación. Ejemplos de las escalas de evaluación para los indicadores cuantitativos son mostrados en las Tabla 22 y Tabla 23.

Tabla 22. Escala de evaluación para el indicador 1.1.2 – Nivel de ruido equivalente.

Puntuación	Valores de referencia
	Promedio de valores de referencia resultantes de comparar niveles de ruido equivalente y niveles de ruido permisibles
1,00	Promedio de valores de referencia = 1,00: el promedio de valores de referencia indica que el ruido equivalente de tráfico vehicular es menor que los niveles de ruido permisibles.
0,00	Promedio de valores de referencia = 0,00: el promedio de valores de referencia indica que el ruido equivalente de tráfico vehicular es mayor a 85 db(A).

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23. Escala de evaluación para el indicador 4.2.1 – Velocidad media de ciclo-usuarios

Puntuación	Valores de referencia
	Velocidad media de ciclo-usuarios
1,00	≥ 18 km/h
0,80	15 km/h
0,60	12 km/h
0,40	9 km/h
0,20	6 km/h
0,00	≤ 3 km/h

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los indicadores cualitativos no fueron construidas escalas de evaluación con valores de referencias de cualidad, sin embargo, en algunos casos estos valores de referencia sí se valen de valores cualitativos para su valoración. Estos casos se presentaron cuando se usó más de un criterio cualitativo, volcando la valoración de referencia a un promedio de puntuaciones.

Algunos aspectos fundamentales deben ser destacados en relación con las *Escalas de Evaluación* propuestas basadas en el trabajo de Costa (2008). Estas escalas fueron propuestas con base en la revisión de la literatura, en patrones nacionales e internacionales y en experiencias ajenas en el desarrollo de índices e indicadores urbanos con aplicabilidad a corredores viales.

En situaciones de inexistencia o disponibilidad de datos que impidan el cálculo preciso del indicador, la puntuación del indicador puede ser hecha mediante la evaluación de un profesional o gestor con amplio conocimiento en temas de sistemas de movilidad urbana. En este caso, el profesional o gestor puede tomar como referencia la escala de evaluación para indicar la puntuación del indicador o el valor de referencia para posteriormente realizar el proceso de normalización y obtener la puntuación.

5.2.1.5 Agregación de los criterios

Después de normalizar los valores de referencia de los indicadores entre 0,00 y 1,00, se agregaron las puntuaciones de los indicadores para obtener los valores para el cálculo del valor global de los Temas, Dominios y del *IMCV*. Este cálculo de agregación se realizó por medio del método descrito en el numeral 3.2.2.3, que consiste en una combinación lineal ponderada, donde los criterios son combinados a través de una media ponderada, permitiendo la compensación de pesos. La combinación fue hecha a través de la Ecuación (5), aplicada para obtener el valor global del *IMCV* considerando el peso de los *Indicadores*, *Temas* y *Dominios* expuestos en la Tabla 21.

Como paso previo al cálculo del valor global del índice *IMCV*, se revisó la posibilidad del cálculo de cada uno de los indicadores, para que en caso de no ser posible calcular algún indicador, su puntuación se dejara *vacío* y los pesos de los demás indicadores del mismo tema se recalcularan para conservar la sumatoria igual a 1,00. Bajo estas circunstancias los pesos de los dominios y los temas no se afectan o cambian de alguna forma.

En la Tabla 24 se muestran los valores globales para todos los pesos sin importar su nivel de criterio. Los valores de $IMCV_d$, $IMCV_t$ y $IMCV_i$ representan el valor global que representa el criterio para el valor global del índice *IMCV*. Estos valores también representan la capacidad de participación o aporte del criterio para el cálculo final del *IMCV*, cuyo valor o puntuación global, $IMCV_g$, se calcula de acuerdo a la Ecuación (10), o bien, representan los valores globales de los indicadores para un corredor con condiciones de movilidad sostenible óptimas. Como segunda apreciación se tiene que la sumatoria de los valores de cada columna de valores globales de los criterios dan un resultado igual a 1,00. A partir de esta relación matemática se puede analizar el aporte individual que realiza cada criterio respecto al índice, sin importar su ubicación dentro de la estructura jerárquica. Por último, cabe anotar que existe también una relación entre los valores globales de diferentes niveles de criterio. Por ejemplo, la suma de los valores globales de los indicadores del tema 'Fluidez y circulación del tráfico mixto' es igual al valor global del tema. De forma análoga sucede entre los *Temas* de un *Dominio*. Las ecuaciones (7), (8) y (9) mostradas a continuación y deducidas a partir de la ecuación (5), permiten calcular los valores globales de cada criterio según el nivel donde se encuentre. Los valores de la Tabla 24 se calculan a partir de las mismas ecuaciones, considerando $Puntuación_i$ igual a 1,00 para todos los indicadores.

$$IMCV_i = PESO_d * PESO_t * PESO_i * Puntuación_i \quad (7)$$

$$IMCV_t = \sum_{i=1}^n IMCV_i^t \quad (8)$$

$$IMCV_d = \sum_{t=1}^n IMCV_t^d \quad (9)$$

$$IMCV_g = \sum_{i=1}^n PESO_i^D * PESO_i^T * PESO_i^I * Puntuación_i \quad (10)$$

Donde:

$IMCV_i$: valor global del Indicador i ;
 $IMCV_t$: valor global del Tema t ;
 $IMCV_d$: valor global del Dominio d ;
 $PESO_i$: peso del indicador i ;

$PESO_t$: peso del tema t ;
 $PESO_d$: peso del dominio d ;
 $Puntuación_i$: puntuación del indicador i ;
 $IMCV_t^t$: peso del tema al que pertenece el indicador i ;
 $IMCV_t^d$: peso del dominio al que pertenece el tema t ;
 $IMCV_g$: valor global del índice.

Tabla 24. Valores globales de los criterios y del índice $IMCV$.

DOMINIO	TEMA	INDICADOR	<i>IMCV_d</i>	<i>IMCV_t</i>	<i>IMCV_i</i>
Aspectos ambientales	Control de los impactos en el medio ambiente	Emisiones NOx y CO	0.192	0.070	0.035
		Nivel de ruido equivalente			0.035
	Consumo de recursos naturales	Consumo de combustible		0.053	0.053
	Calidad de vida	Siniestros viales		0.070	0.035
		Mortalidad por accidentes de tránsito			0.035
Aspectos sociopolíticos	Aspectos sociales	Aspectos sociales	0.188	0.101	0.101
	Aspectos políticos	Aspectos políticos		0.087	0.087
Infraestructura	Provisión y mantenimiento de la infraestructura de transporte	Estado de superficie de aceras peatonales	0.221	0.221	0.055
		Estado de superficie de ciclo-infraestructura			0.055
		Estado de superficie de infraestructura vial			0.055
		Señalización Vial			0.055
Tráfico y circulación urbana - modos no motorizados	Transporte ciclo-viario	Extensión y conectividad de ciclo-infraestructura	0.211	0.070	0.070
	Fluidez y circulación de ciclo-usuarios	Velocidad media de viaje de ciclo-usuarios		0.063	0.063
	Desplazamientos a pie	Intersecciones semaforizadas con fases peatonales		0.078	0.078
Tráfico y circulación urbana - modos motorizados	Fluidez y circulación del tráfico mixto	Nivel de servicio	0.188	0.081	0.020
		Longitud de cola			0.020
		Paradas			0.020
		Velocidad media de viaje del tráfico mixto			0.020
	Calidad y diversificación modal del transporte público	Velocidad comercial del transporte público		0.107	0.053
		Diversidad de modos de transporte			0.053
		<i>IMCV_g</i>	1.000	1.000	1.000

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2 Guía para la evaluación del índice

A fin de orientar el cálculo del $IMCV_g$, fue elaborada una guía con información para la elaboración de los veinte indicadores que lo componen, los procedimientos de normalización de los criterios incluyendo las escalas de evaluación. La información para cada uno de los indicadores se presenta organizada conforme a la estructura que se indica a continuación.

- Dominio: conforme la estructura del $IMCV$.
- Tema: conforme la estructura del $IMCV$.
- Indicadores: conforme la estructura $IMCV$.

A. Definición

Definición y descripción del indicador.

B. Unidad de medida

Unidad del valor de referencia del indicador.

C. Referencias

Sistemas nacionales e internacionales de referencia para el desarrollo del indicador, fuentes de información complementarios y ejemplos de aplicación.

D. Relevancia

Contextualización e importancia del indicador para la evaluación de la Movilidad Sostenible en Corredores Viales.

E. Información

Datos necesarios para el cálculo del indicador y sus respectivas definiciones y unidades de medida.

F. Fuente de información

Indicación de fuentes probables de datos necesarios para el desarrollo del indicador. Identificación de sistemas nacionales, estatales y municipales, agencias, instituciones, órganos de investigación, entre otros, responsables de la recolección y divulgación de datos estadísticos y demás información útil para el cálculo del indicador.

G. Método de cálculo

Instrucciones para el cálculo del indicador, incluyendo fórmulas matemáticas, herramientas de apoyo, e instrucciones para el tratamiento de los datos, siempre que sean necesarios. Incluyen procedimientos para evaluaciones cualitativas conforme a la tipología del indicador.

H. Normalización

En este ítem es presentada la *Escala de Evaluación* para el indicador, con los respectivos valores de referencia.

En caso de la evaluación directa, sin que sea hecho el cálculo efectivo del indicador, la evaluación debe ser hecha por un profesional o gestor con conocimiento sobre el sistema corredor vial analizado. Los resultados obtenidos a través de la evaluación directa sustituyen por tanto los valores de los indicadores que no pudieron ser obtenidos por el método sugerido en el ítem G.

6 CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE MOVILIDAD DEL CORREDOR VIAL CALLE 5 ENTRE CARRERA 56 Y CARRERA 15

En este capítulo se presenta la validación del *IMCV* evaluando las condiciones de movilidad en el corredor vial Calle 5 entre la Carrera 56 y la Carrera 15 de la ciudad de Santiago de Cali. La validación realizada contempla la caracterización y evaluación del mencionado corredor para diferentes escenarios con inclusión de ciclo-banda de diferentes anchos, además del escenario de situación base. Inicialmente son presentadas algunas características generales del corredor y la justificación de su selección para la evaluación del índice *IMCV*. Posteriormente es discutida la etapa de recolección de datos. En la etapa siguiente se realiza el cálculo de los indicadores que componen el índice para cada escenario.

6.1 CORREDOR VIAL CALLE 5

El Corredor vial de la Calle 5 es un eje tradicional y emblemático de la ciudad en diferentes ámbitos. Este corredor atraviesa la ciudad en sentido noroccidente-sur. Desde la intersección con la carrera 27 hasta la intersección con la carrera 56, la Calle quinta tiene una longitud de 2,97 kilómetros. El corredor se conforma por 2 calzadas bidireccionales compuestas de 2 carriles cada una. En materia de transporte público, el corredor es actualmente una de las troncales que conforman el SITM-MIO. Aunque al inicio del desarrollo del presente trabajo de grado, no existía ciclo-infraestructura en el corredor, la ciclo-banda fue incluida en la sección transversal de los carriles mixtos durante el desarrollo de la investigación. Sin embargo, las condiciones físicas y operativas mencionadas en los siguientes capítulos corresponden a condiciones sin inclusión de ciclo-banda.

6.2 PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS

Los escenarios considerados para realizar el análisis de sensibilidad corresponden a los mencionados en la Tabla 17. Estos escenarios hacen referencia al ancho de la ciclo-banda incluida.

6.3 RECOLECCIÓN Y VALIDACIÓN DE DATOS PARA LOS ESCENARIOS PLANTEADOS

El proceso de cálculo del *IMCV_g* fue precedido por la recolección de datos, incluyendo: entrevistas con técnicos y grupos consultores especialistas en áreas de tránsito y transporte, consultas en bases de datos de organizaciones gubernamentales y de estadísticas locales, además de estudios desarrollados en el ámbito académico para la ciudad.

Del Departamento Administrativo de Planeación Municipal (DAPM) de la Ciudad, fueron consultados la Secretaría de Movilidad, Secretaría de Infraestructura, Sistema Integrado de Transporte Masivo, Plan Integral de Movilidad Urbana (PIMU), el Observatorio de Movilidad Sostenible MOVIS, Departamento Administrativo de Gestión Medio Ambiente (DAGMA), entre otros, las cuales son responsables de criterios contemplados en el *IMCV*.

Se recolectaron bases georreferenciadas, informes y bancos de datos desde las secretarías mencionadas. La recolección de datos consideró la información entre los años 2013 y 2018. A pesar de no considerarse una situación ideal, la posibilidad de recopilar información de un rango más amplio de tiempo permite la evaluación de un mayor número de indicadores, proporcionando una visión más amplia de la movilidad urbana sobre el Corredor Vial de la Calle 5.

La información recolectada fue organizada y posteriormente evaluada en función de la disponibilidad y calidad de los datos base para el cálculo de los indicadores. El resultado de este ejercicio evidenció que dada la cantidad de indicadores que dependen de variables de tipo operacional (9 en total), es necesario que se realice un estudio de tránsito para poder evaluar estos indicadores. Por tal motivo, se realiza el cálculo de los indicadores a partir de la modelación del corredor vial Calle 5 en el software de micro simulación VISSIM®. Estos modelos permitieron además realizar el análisis de sensibilidad operacional del corredor en relación con la inclusión de la ciclo-banda.

6.4 MODELACIÓN DE ESCENARIOS PLANTEADOS EN PTV VISSIM® PARA LOS ESCENARIOS PLANTEADOS

De los 20 indicadores que componen el *IMCV*, 9 fueron calculados con la ayuda de la herramienta de micro simulación VISSIM®. Como se comentó en la sección 3.3.3, el software permite obtener una amplia salida de información o resultados a partir de nodos evaluadores y elementos recolectores de información ubicados transversalmente en la red. A continuación, en la Tabla 25, se mencionan los indicadores cuyos valores de referencia fueron calculados a partir de los diferentes elementos de evaluación ofrecidos por VISSIM®.

Tabla 25. Elementos de evaluación de VISSIM® para cálculo de indicadores.

ID	Indicador	Elemento de evaluación
1.1.1	Emisiones de NOx y CO	Nodos
1.1.2	Nivel de ruido equivalente	Puntos de recolección de datos
1.2.1	Consumo de combustible	Nodos
4.2.1	Velocidad media de viaje de ciclo-usuarios	Secciones de tiempo de viaje
5.1.1	Nivel de servicio	Nodos
5.1.2	Longitud de cola	Contadores de cola
5.1.3	Paradas	Nodos
5.1.4	Velocidad media de viaje del tráfico mixto	Secciones de tiempo de viaje
5.2.1	Velocidad comercial del transporte público	Secciones de tiempo de viaje

Fuente: Elaboración propia.

Para desarrollar los diferentes tipos de evaluaciones, se construyeron modelos de tráfico vehicular en VISSIM®. Los modelos de la Calle 5 significan un importante producto para este trabajo investigativo, ya que además de permitir la evaluación de los indicadores mencionados en la Tabla 25, elabora una representación a nivel microscópico de la operación del corredor y sus escenarios con implantación de la ciclo-bandas. A continuación, se aborda el procedimiento constructivo y evaluativo del modelo del corredor en el software de micro simulación.

El desarrollo de los modelos de micro simulación del corredor vial Calle 5, se abordó construyendo primero un modelo base, el cual corresponde al modelo de situación base. A partir de este modelo, se construyeron los demás modelos con las situaciones de escenarios considerados. Se hicieron copias del archivo del modelo de situación actual y sobre estos modelos, se realizaron las modificaciones geométricas de carriles e inclusión de ciclo-bandas para obtener los modelos con la intervención de ciclo-infraestructura.

6.4.1 Tipo de vehículo

Se consideraron las mismas tipologías vehiculares descritas en el numeral 5.1.2.3.1.

6.4.2 Comportamiento de conducción

La configuración del comportamiento de conducción definido para los modelos de la Calle 5 corresponde a las modificaciones de parámetros de conducción para los modelos de las intersecciones analizadas en el Capítulo 4 y mencionadas en el numeral 5.1.2.3.2. Se usó la misma configuración de comportamiento de conducción ya que las redes modeladas y sus flujos vehiculares se ubican en una misma localidad o ciudad, por lo tanto, se esperó que, bajo las mismas configuraciones de comportamiento, los valores de *GEH* se mantuvieran dentro de los rangos requeridos para la validación del modelo.

6.4.3 Links y conectores

Se usaron links y conectores para la construcción de la red vial del modelo. Los links, se usaron para dibujar todos los tramos con información geométrica de sección transversal, existentes en el estudio del *Análisis integral de la red de infraestructura vial para la movilidad motorizada en el municipio de Cali* (Universidad del Valle, 2015). La información suministrada en los links dibujados en el modelo corresponde a nomenclatura, cantidad y anchos de carril, número de calzadas y sentido vial.

Sobre la base georreferenciada que proporciona VISSIM© se dibujó el corredor vial. Al dibujar la red, se revisaron enlaces en intersecciones, existencia de bahías, existencia de ciclo-infraestructura, longitudes de segmentos, espaciamiento entre calzadas, ubicación de las paradas y estaciones para buses del SITM-MIO, entre otras. Con mayor precisión, se revisó en visores 3D como Google Earth©, la disposición de líneas de pare y de detención en intersecciones y la disposición de líneas de demarcación horizontal como reguladores del comportamiento lateral.

En la Figura 22 se muestra la red construida a partir de links y conectores y la asignación de tipología de vía que se le dio a cada elemento de red. En las figuras inferiores se muestra el detalle visual dado a cada tipo de vía, haciéndose evidente la disposición de las vías para ciclo-usuarios, tráfico mixto motorizado y carril exclusivo MIO.

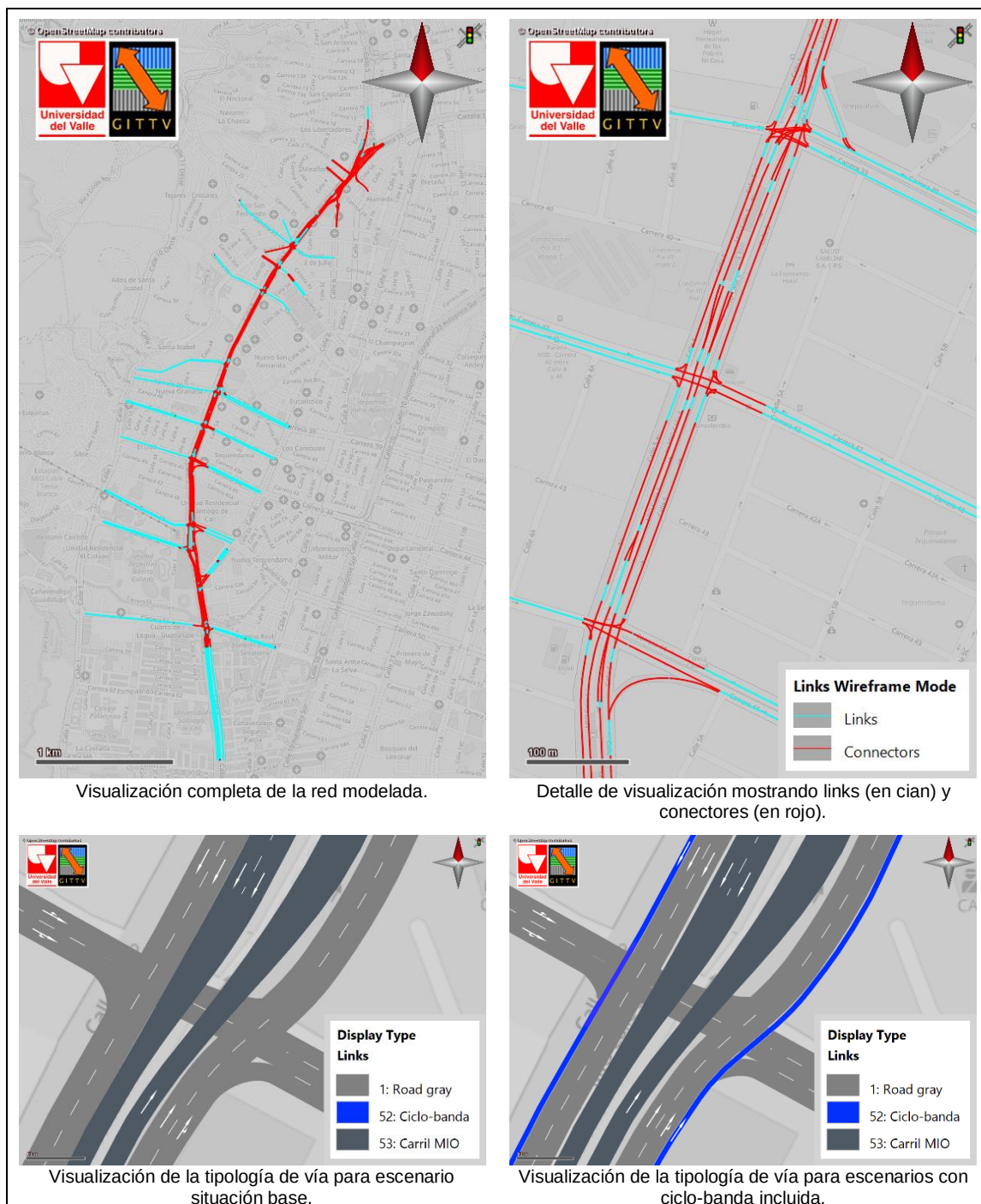


Figura 22. Visualización de red, links, conectores y tipos de vía modelados.

Fuente: Elaboración propia.

6.4.4 Elementos de red adicionales

Posterior a la construcción de la red vial del modelo, se incluyeron elementos adicionales. Estos elementos adicionales, ubicados transversalmente en los links y conectores de forma perpendicular al eje, recolectan información y regulan parámetros operativos del flujo vehicular.

- **Elementos de evaluación:** En total se definieron en la red 234 elementos de evaluación. Se ubicaron en la red 50 contadores de cola, 11 nodos, 115 puntos de recolección de datos y 57 secciones de tiempo de viaje. Estos elementos de evaluación posibilitaron el cálculo de los indicadores mencionados en la Tabla 25.
- **Cambios de velocidad deseada:** Se ubicaron sobre la red 66 áreas de reducción de velocidad para replicar la reducción de velocidad en giros. Las decisiones de velocidad *deseada* no fueron incluidas ya que la velocidad deseada, igual a la velocidad máxima permitida en el corredor, fue definida para cada tipo de vehículo.

6.4.5 Control del tráfico

Las intersecciones semaforizadas fueron modeladas por medio de controladores semafóricos (CS) de tiempo fijo. Los controladores fueron creados en el software de acuerdo con la información secundaria del estudio *Diseño del Planeamiento de Tráfico en 56 intersecciones semaforizadas de la red de vías arteriales principales y secundarias del Municipio de Santiago de Cali* (Universidad del Valle, 2017). En total fueron creados 11 CS para representar las intersecciones semaforizadas del corredor vial de la Calle 5 entre la Carrera 27 y 56.

En la modelación no se hizo uso de líneas de pare, en cambio, se simularon los derechos de vía para movimientos conflictivos no regulados por semáforo a partir de reglas de prioridad, sobre todo en puntos de conflicto por convergencia de movimientos. Las reglas de prioridad fueron también usadas en intersecciones para evitar su entorpecimiento cuando se alcanzaba la capacidad de segmentos o tramos, manteniendo limpia la intersección y posibilitando el flujo vehicular a través de esta.

6.4.6 Balanceo

El proceso de balanceo logra como su nombre lo indica, balancear los volúmenes en la red, tomando como puntos de control las intersecciones sobre el corredor. Dado que la modelación de rutas de vehículos se realizó por medio de rutas estáticas, fue necesario realizar un tratamiento a los volúmenes de los movimientos en las intersecciones registrados en campo. Con el balanceo, se logra un modelo coherente en cuanto a la cantidad de vehículos que entran y salen de la red, los cuales deben ser iguales.

El balanceo se realizó para las tipologías vehiculares de autos, motos, buses, camiones y bicicletas en el software de macro modelación PTV VISTRO®, de la familia PTV Group. Si bien, este software es de amplio uso en temas de análisis de tráfico vehicular, su uso se limitó al balanceo de volúmenes a partir de la construcción de una red básica de la Calle 5. En la Figura 23 se muestra la interfaz gráfica de VISTRO® evidenciando la construcción de la red del modelo para realizar el proceso de balanceo.

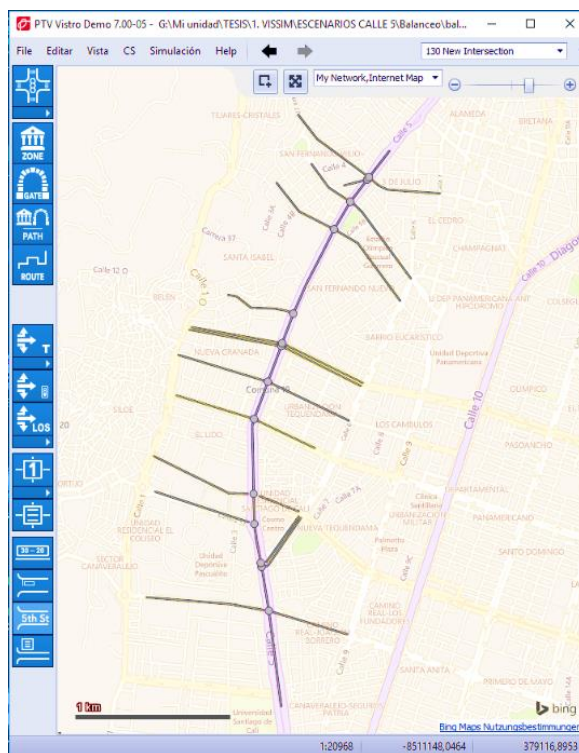


Figura 23. Red Corredor Calle 5 dibujada en VISTRO© para balanceo.

Fuente: Elaboración propia.

6.4.7 Tráfico vehicular

El tráfico vehicular fue modelado a través de rutas y volúmenes estáticos, por lo tanto, fueron definidas variables de composición vehicular, entrada de vehículos y decisiones de rutas.

- **Composición vehicular:** Las composiciones de vehículos para el modelo corresponden directamente a las tipologías vehiculares. Los vehículos considerados en el modelo son autos, motos, bicicletas, autobuses, buses articulados y camiones.
- **Entrada de vehículos:** En el modelo se definió la entrada de vehículos en los tramos que dan ingreso al interior de la red. Los volúmenes de autos, motos, buses, camiones y bicicletas se ingresaron en vehículos por hora (veh/h) correspondiendo a los volúmenes de entrada obtenidos producto del balanceo. La definición de entrada de vehículos se mantuvo en todos los modelos de simulación salvo las bicicletas, las cuales, para los modelos con la inclusión de ciclo-banda, fueron reubicadas a la ciclo-infraestructura, cuidando en mantener el equilibrio de igual cantidad de vehículos entrantes y salientes.
- **Decisiones de ruta:** Conforme a los volúmenes definidos en el proceso de balanceo, se dibujaron rutas estáticas al inicio de cada segmento de vía y con destino a otros segmentos. El proceso consistió en “ir llevando” los vehículos de cada tipología a través del corredor, cuidando en siempre entregar y recibir los vehículos de acuerdo a los volúmenes balanceados en VISTRO©. La relación de flujo para grupos de rutas desde un punto de decisión se hizo indicando la cantidad de vehículos/hora correspondiente a cada una. Al igual que la entrada de bicicletas para los modelos con ciclo-bandas, las decisiones de rutas se reubicaron sobre estas.

6.4.8 Transporte público

El transporte público modelado en la Calle 5 corresponde al SITM-MIO. Para modelar el transporte público se realizó un inventario de rutas o líneas de transporte y paradas. Se revisó la ubicación y asignación de paradas para los diferentes buses y rutas dispuestas sobre el corredor; frecuencia de paso de rutas, prioridades de paso en intersecciones haciendo referencia al comportamiento entre buses padrones y articulados en las calzadas exclusivas. Sobre la red del modelo se dibujaron las rutas y se les definieron a estas sus paradas, frecuencia de paso y tipo de vehículo de servicio. La modelación del transporte público se mantuvo igual para todos los modelos. En la Tabla 26 se listan todas las líneas de transporte modeladas y el tipo de vehículo de servicio.

Tabla 26. Líneas de transporte público modeladas.

Línea	Tipo de vehículo modelado
T57A	Bus Articulado
T47B	Bus Articulado
T31	Bus Articulado
E41	Bus Articulado
E37	Bus Articulado
E31	Bus Articulado
E27	Bus Articulado
E21	Bus Articulado
A76	Bus Complementario
A75	Bus Complementario
A70	Bus Complementario
A04	Bus Complementario
A03	Bus Complementario
P71	Bus Padrón
P47C	Bus Padrón
P47B	Bus Padrón
P47A	Bus Padrón
P27D	Bus Padrón
P17	Bus Padrón
E27B	Bus Padrón

Fuente: Elaboración propia.

6.4.9 Simulación

Para la apropiada simulación del comportamiento vehicular en los modelos en cuanto al periodo de simulación, resolución y velocidad de simulación, número de corridas y semilla de aleatoriedad, se referencian las consideraciones mencionadas en el numeral 5.1.2.3.9

6.4.10 Calibración y validación

La calibración del modelo tuvo dos componentes: validación visual y validación del modelo a partir de la comparación de los volúmenes modelados y los registrados en campo por medio del indicador estadístico *GEH*. Este proceso de calibración y validación sólo se realizó para el modelo de situación actual, considerando que sólo este modelo representa las condiciones actuales en cuanto a operación y características físicas.

- **Validación visual:** se realizó la validación visual del comportamiento vehicular con la ayuda de un especialista en temas de ingeniería de tránsito y con conocimiento de la

zona de estudio y el corredor. Se revisó el comportamiento en cuanto al movimiento lateral por tipo de vehículos, despeje de la línea de detección semafórica, congestión, existencia de conflicto, entre otros.

- **Comparación de volúmenes (GEH):** la calibración y validación de volúmenes empleando el indicador estadístico *GEH*, se realizó para las tipologías auto y motos para cada movimiento vehicular de todas las intersecciones sobre la Calle 5. El criterio de *GEH* para los modelos de la Calle 5, se estableció para una categoría de modelo tipo E de acuerdo con la Tabla 11.

La comparación de volúmenes se realizó entre los volúmenes balanceados y los volúmenes detectados en red por medio de los puntos de recolección de datos. A continuación, en la Tabla 27, se resumen los resultados de los valores obtenidos de *GEH* para los movimientos de motos y autos de las intersecciones modeladas en la Calle 5.

Tabla 27. Resultados calibración *GEH*.

Intersección	No. de movimientos	<i>GEH</i> < 5%	<i>GEH</i> < 7.5%	<i>GEH</i> < 10%
Calle 5 con Carrera 27	18	100%	100%	100%
Calle 5 con Carrera 34	12	100%	100%	100%
Calle 5 con Carrera 36	12	100%	100%	100%
Calle 5 con Carrera 38D	10	100%	100%	100%
Calle 5 con Carrera 39	18	100%	100%	100%
Calle 5 con Carrera 42	16	100%	100%	100%
Calle 5 con Carrera 44	12	100%	100%	100%
Calle 5 con Carrera 50	18	100%	100%	100%
Calle 5 con Carrera 52	10	100%	100%	100%
Calle 5 con Calle 6	10	100%	100%	100%
Calle 5 con Carrera 56	16	100%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 27, todos los resultados de *GEH* están por encima de los porcentajes mínimos definidos para una categoría de modelo tipo E. Este resultado es producto de la calibración realizada al comportamiento vehicular para los modelos VISSIM®.

6.5 CÁLCULO DE ÍNDICE PARA LOS ESCENARIOS PLANTEADOS

De acuerdo con el HCM (2010), los procedimientos recomendados para la evaluación de corredores viales deben considerar la infraestructura vial, las intersecciones y los sentidos viales existentes. Por lo tanto, el cálculo del valor $IMCV_g$ para la Calle 5 se realiza para cada sentido del corredor considerando la guía construida para la evaluación del índice. Es importante recalcar la independencia del cálculo del índice respecto a las configuraciones viales que puedan presentarse en el corredor en estudio, ya que la evaluación individual de cada indicador se realiza para cada segmento que componga el corredor, sin importar condiciones geométricas como la cantidad de carriles, sus anchos, entre otras. Estas anotaciones se hacen evidentes en la *Guía para la evaluación del índice*.

Los resultados obtenidos de las puntuaciones normalizadas de los indicadores y los valores de $IMCV_g$ para cada escenario se muestran en la Tabla 28 y Tabla 29. Como se puede observar, fue posible calcular todos los indicadores para ambos sentidos del corredor, es decir, la información recopilada permitió realizar el cálculo de los indicadores. En cuanto a la información calculada y obtenida de los modelos de micro simulación de VISSIM®, se calcularon todos los indicadores mencionados en la Tabla 25, tanto para el escenario de situación base como para los escenarios con ciclo-banda incluida en situación base.

La calidad de los datos seleccionados para el cálculo de los indicadores es en general buena. La información recopilada corresponde a bases de datos, investigaciones, y estudios, de años no más atrás del año 2013. En cuanto a los datos ofrecidos por VISSIM®, el grado de confiabilidad es alto ya que a partir de distintas semillas de aleatoriedad y de múltiples corridas de simulación de los modelos, los valores finales para el cálculo de los indicadores corresponden a valores sin sesgo de casos atípicos de operación del tráfico vehicular, si no que más bien, corresponden a valores equivalentes a realizar estudios de tránsito en campo para diferentes días y en diferentes horarios. Las plantillas de cálculo de los indicadores para los escenarios considerados de la Calle 5, se presentan en el Anexo D.

Cabe anotar que los escenarios no son comparables en el tiempo, es decir, no corresponden a escenarios asociados a un horizonte de tiempo o periodo. Aunque el escenario de situación base represente una situación de las condiciones actuales, los escenarios con inclusión de ciclo-bandas representan situaciones base con modificaciones del corredor en su geometría, entendiéndose más bien como un análisis de sensibilidad y de hipótesis bajo unas condiciones iniciales. Es por ello que es posible que algunos indicadores presenten resultados estáticos en comparación con otros indicadores. Este comportamiento se debe a las condiciones de comparación de los escenarios. En el presente caso, la comparación no se realiza considerando la línea del tiempo, por lo tanto, es posible que algunos indicadores no varíen de forma significativa ya que su impacto estará asociado al transcurso del tiempo, mientras que otros indicadores, podrán variar de forma más dinámica según varíen las condiciones geométricas, físicas y de operación del corredor.

Tabla 28. Puntuaciones de indicadores y valores $IMCV_g$ para escenarios, sentido N-S.

IDd	IDt	Idi	CB = 0,0	CB = 0,8	CB = 1,0	CB = 1,2	CB = 1,4	CB = 1,6	CB = 1,8	CB = 2,0
1	1.1	1.1.1	0.50	0.51	0.46	0.36	0.26	0.22	0.20	0.20
		1.1.2	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.93	0.93	0.93
	1.2	1.2.1	0.50	0.52	0.49	0.36	0.10	0.00	0.00	0.00
		1.3.1	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
		1.3.2	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
2	2.1	2.1.1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	2.2	2.2.1	0.88	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3	3.1	3.1.1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
		3.1.2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
		3.1.3	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
		3.1.4	0.58	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88
4	4.1	4.1.1	0.25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	4.2	4.2.1	0.55	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	4.3	4.3.1	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
5	5.1	5.1.1	0.36	0.45	0.38	0.36	0.37	0.31	0.31	0.25
		5.1.2	0.73	0.74	0.71	0.64	0.50	0.44	0.42	0.43
		5.1.3	0.50	0.51	0.42	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
		5.1.4	0.19	0.27	0.23	0.19	0.18	0.17	0.16	0.14
	5.2	5.2.1	0.93	0.95	0.96	0.95	0.96	0.96	0.96	0.95
		5.2.2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	$IMCV_g$		0.705	0.819	0.811	0.791	0.770	0.760	0.759	0.758

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29. Puntuaciones de indicadores y valores $IMCV_g$ para escenarios, sentido S-N

IDd	IDt	Idi	CB = 0,0	CB = 0,8	CB = 1,0	CB = 1,2	CB = 1,4	CB = 1,6	CB = 1,8	CB = 2,0
1	1.1	1.1.1	0.50	0.63	0.63	0.64	0.62	0.60	0.52	0.30
		1.1.2	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
	1.2	1.2.1	0.50	0.62	0.62	0.62	0.61	0.58	0.48	0.16
	1.3	1.3.1	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
		1.3.2	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
2	2.1	2.1.1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	2.2	2.2.1	0.88	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3	3.1	3.1.1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
		3.1.2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
		3.1.3	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
		3.1.4	0.52	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
4	4.1	4.1.1	0.25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	4.2	4.2.1	0.88	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	4.3	4.3.1	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
5	5.1	5.1.1	0.71	0.79	0.79	0.79	0.77	0.76	0.73	0.60
		5.1.2	0.91	0.89	0.88	0.85	0.85	0.83	0.80	0.68
		5.1.3	0.50	0.62	0.62	0.61	0.60	0.56	0.41	0.00
		5.1.4	0.72	0.79	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.64
	5.2	5.2.1	0.88	0.88	0.88	0.88	0.89	0.90	0.89	0.90
		5.2.2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
		IMCV_g	0.739	0.843	0.843	0.842	0.840	0.837	0.824	0.785

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los datos obtenidos, es posible identificar algunos patrones. Se observa para ambos sentidos del corredor, los temas de *Calidad de vida*, *Aspectos sociales* y *Aspectos políticos*, presentan diferencias de valores nulas respecto al escenario de situación base, CB=0,0. Esto se puede deber a que las condiciones óptimas ya están alcanzadas (para el caso de los aspectos socio-políticos) y que las condiciones de calidad de vida como la mortandad y los accidentes de tránsito, no sean posibles de estimar debido a que los escenarios no representan escenarios en el tiempo, por lo tanto la calidad de vida, bajo los indicadores que le describen, se consideran constantes.

En contraste, los indicadores reconocidos de tipo operacional, presentan variaciones significativas y dinámicas de acuerdo al ancho de ciclo-banda incluida, es decir, responden a cambios de las condiciones físicas y geométricas del corredor. Por otra parte, los datos demuestran que los impactos son inmediatos en el sentido de que la reducción de anchos de carril representa un impacto operacional independiente del tiempo. Sin embargo, un análisis en el tiempo deberá considerar aspectos como la redistribución del tráfico vehicular, cambios en la atracción y generación de viajes al corredor para los diferentes modos de transporte, entre otras.

7 ANÁLISIS DE IMPACTOS Y SENSIBILIDAD SOBRE LA MOVILIDAD PARA EL CORREDOR VIAL CALLE 5 ENTRE CARRERA 56 Y CARRERA 15.

Los resultados globales $IMCV_g$ del Corredor Vial de la Calle 5, para los sentidos norte-sur (N-S) y sur-norte (S-N), se presentan nuevamente en la Tabla 30. Comparativamente, se observa que el estado de la movilidad sostenible del sentido S-N del corredor es mejor en comparación con la movilidad sostenible del sentido N-S para todos los escenarios.

Tabla 30. Resultados de $IMCV_g$ para la Calle 5.

Índice	Sentido	CB = 0,0	CB = 0,8	CB = 1,0	CB = 1,2	CB = 1,4	CB = 1,6	CB = 1,8	CB = 2,0
$IMCV_g$	N-S	0,705	0,819	0,811	0,791	0,770	0,760	0,759	0,758
	S-N	0,739	0,843	0,843	0,842	0,840	0,837	0,824	0,785

Fuente: Elaboración propia.

Para analizar el desempeño de cada dominio que constituye el $IMCV$ por sentido, fue hecha una comparación individual de los criterios.

7.1 DESEMPEÑO DE LOS DOMINIOS, SENTIDO N-S

Conforme a la Figura 24, se muestra que cuatro de los cinco dominios para cada evaluación de $IMCV$ de los escenarios considerados, presentaron desempeños superiores a 0,5. Solamente el dominio de aspectos ambientales para los escenarios con ancho de ciclo-banda superior a 1,0 metros, presentó puntuaciones normalizadas menores a 0,5. En lo que se refiere a los dominios con puntuaciones más altas, se destacan los Aspectos Sociales e Infraestructura para todos los escenarios considerados.

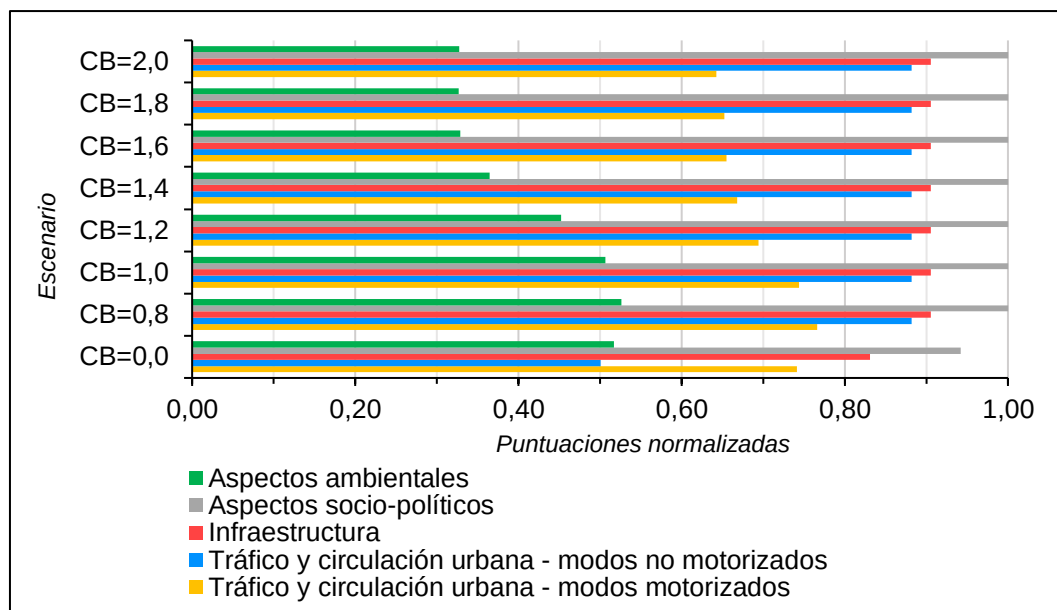


Figura 24. Desempeño de dominios del $IMCV$, sentido N-S.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se realiza un breve análisis de sensibilidad a la inclusión de ciclo-bandas de diferente ancho, a partir de las puntuaciones obtenidas para los dominios. En la Tabla 31, se muestran los porcentajes de diferencia de las puntuaciones obtenidas de los escenarios con ciclo-banda, en relación con el escenario de situación base. Las escalas de colores

asocian al color rojo impactos negativos, al color verde impactos positivos y al color amarillo inexistencia de impactos.

Tabla 31. Porcentajes de diferencia de $IMCV_d$ y $IMCV_g$ respecto a esc. CB = 0,0, sentido N-S.

Dominio	Porcentaje de diferencia						
	CB = 0,8	CB = 1,0	CB = 1,2	CB = 1,4	CB = 1,6	CB = 1,8	CB = 2,0
Aspectos ambientales	2%	-2%	-12%	-29%	-36%	-37%	-37%
Aspectos sociopolíticos	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%
Infraestructura	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%
Tráfico y circulación urbana - modos no motorizados	76%	76%	76%	76%	76%	76%	76%
Tráfico y circulación urbana - modos motorizados	3%	0%	-6%	-10%	-12%	-12%	-13%
$IMCV_g$	16%	15%	12%	9%	8%	8%	7%

Fuente: Elaboración propia.

- **Aspectos ambientales:** se observa una mejora del 2% para el escenario CB=0,8, pero a partir del siguiente escenario los impactos son negativos con tendencia de incremento cada vez que el ancho de la ciclo-banda aumenta.
- **Aspectos sociopolíticos:** se presenta una mejora del 6% para todos los escenarios con ciclo-banda, es decir, implantar la ciclo-banda genera un impacto positivo en el dominio el cual es independiente del ancho de la ciclo-banda incluida.
- **Infraestructura:** el dominio presenta una mejor del 9% producto de la mejora de la señalización vial al incluir la ciclo-banda. De nuevo, el impacto es independiente del ancho de la ciclo-banda incluida.
- **Tráfico y circulación urbana – modos no motorizados:** se registra un impacto positivo del 76% para todos los escenarios con ciclo-banda. Esto se debe debido al aumento de la oferta de ciclo-infraestructura y al aumento de la velocidad media de viaje de los ciclo-usuarios, la cual no aumenta conforme a la ampliación del bici-carril.
- **Tráfico y circulación urbana – modos motorizados:** se observa una mejora inicial del 3% (para el CB=0,0) que luego empieza a disminuir hasta convertirse en un cambio de puntuación del dominio del -13% (para CB=2,0). Este impacto negativo está en función del tema *fluidez y circulación del tráfico mixto*. En la sección 7.3 (Impacto operacional), se amplía el análisis a este tema.

7.2 DESEMPEÑO DE LOS DOMINIOS, SENTIDO S-N

En la Figura 25 se observa un comportamiento de puntuaciones similar al presentado para el sentido S-N. Se presentan puntuaciones altas para los aspectos sociopolíticos y la infraestructura para todos los escenarios, y puntuaciones cercanas a 0,5 para aspectos ambientales de todos los escenarios.

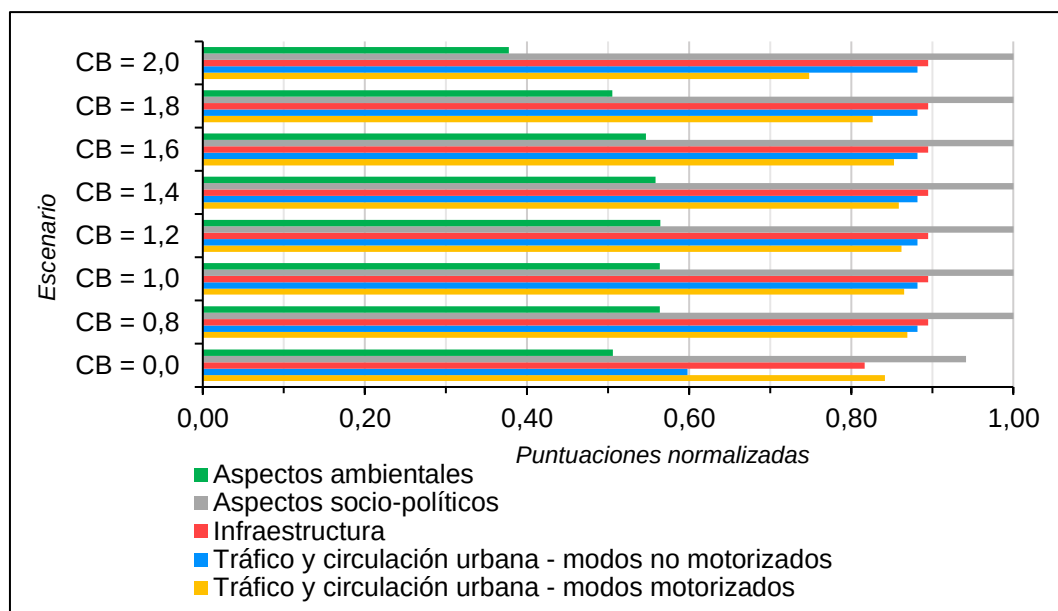


Figura 25. Desempeño de dominios del *IMCV*, sentido S-N.

Fuente: Elaboración propia.

Se realiza a continuación un breve análisis de sensibilidad a la inclusión de ciclo-bandas de diferente ancho, a partir de las puntuaciones obtenidas para los dominios. En la Tabla 32, se muestran los porcentajes de diferencia de las puntuaciones obtenidas de los escenarios con ciclo-banda, en relación con el escenario de situación base. Las escalas de colores cumplen la misma función que en la Tabla 31.

Tabla 32. Porcentajes de diferencia de *IMCV_d* y *IMCV_g* respecto a esc. CB = 0,0, sentido S-N.

Dominio	Porcentaje de diferencia						
	CB = 0,8	CB = 1,0	CB = 1,2	CB = 1,4	CB = 1,6	CB = 1,8	CB = 2,0
Aspectos ambientales	12%	11%	12%	10%	8%	0%	-25%
Aspectos sociopolíticos	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%
Infraestructura	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
Tráfico y circulación urbana - modos no motorizados	47%	47%	47%	47%	47%	47%	47%
Tráfico y circulación urbana - modos motorizados	3%	3%	2%	2%	1%	-2%	-11%
<i>IMCV_g</i>	14%	14%	14%	14%	13%	12%	6%

Fuente: Elaboración propia.

- **Aspectos ambientales:** se observa una mejora de los aspectos ambientales que a medida que aumenta el ancho de la ciclo-banda, disminuye hasta presentar un porcentaje de diferencia negativo del 25%. Al igual que en el sentido N-S del corredor, los impactos en el dominio se deben a los cambios en las puntuaciones de los temas asociados al medio ambiente y a los recursos naturales.
- **Aspectos sociopolíticos:** los cambios porcentuales son iguales a los presentados en el sentido N-S, debido a que, como tal, ambos sentidos conforman el corredor vial y es a este nivel que se realizan las políticas de movilidad sostenible.
- **Infraestructura:** se presenta un cambio porcentual del 10% independiente del ancho de la ciclo-banda incluida y en función de la mejora de la señalización vial.
- **Tráfico y circulación urbana – modos no motorizados:** se observa un incremento de la puntuación de 47% para todos los escenarios con ciclo-banda. Al igual que en el sentido N-S, el cambio porcentual se debe a la mejora del tema *transporte ciclo-viario*.

- **Tráfico y circulación urbana – modos motorizados:** se observa una mejora inicial del 14% (para el CB=0,0) que empieza a disminuir hasta presentar cambios porcentuales negativos, sin embargo, en este sentido vial, la aparición de estos casos se da a partir del escenario CB=1,8, diferente al sentido N-S en el cual aparecen en el escenario CB=1,2. En la sección 7.3 (Impacto operacional), se amplía el análisis a este tema.

En la siguiente sección se realiza un análisis al tema *Fluidez y circulación del tráfico mixto*, del dominio de *Tráfico y circulación urbana – modos motorizados*, describiendo los cuatro indicadores que le componen y sus valores y puntuaciones obtenidas de acuerdo con las escalas de evaluación.

7.3 IMPACTO OPERACIONAL, SENTIDO N-S

Como se observa en la Figura 26 y de acuerdo con la puntuación de los indicadores, la situación base del corredor (equivalente a una situación histórica sin ciclo-banda) en su sentido N-S se caracteriza por presentar colas que representan el 30% de la longitud de los segmentos de los accesos. Presenta velocidades medias de viaje bajas (18 km/h) y un nivel de servicio promedio en los accesos de tipo E, es decir, el corredor vial se caracteriza por un tránsito lento, con colas y con niveles de servicio negativos para la fluidez y circulación del tráfico motorizado mixto. Se anota que en la situación base, por el sentido N-S del corredor, transitan entre 1700 y 2750 vehículos mixtos por hora según el tramo vial.

Analizando las medidas de desempeño en los demás escenarios, se observa que inicialmente, en el escenario con un ancho de ciclo-banda de 0,8, las condiciones de movilidad operativa mejoran para todo el corredor en su sentido N-S. Sin embargo, los indicadores empiezan a bajar en sus puntuaciones a partir del escenario con ciclo-banda igual a 0,8 metros, dando a entender que el sentido N-S ‘toleró’ la inclusión de la ciclo-banda del mencionado ancho, pero después de reducir el ancho de los carriles aún más, las condiciones de operación empeoran haciéndose evidente en todos los indicadores del tema *Fluidez y circulación del tráfico mixto*.

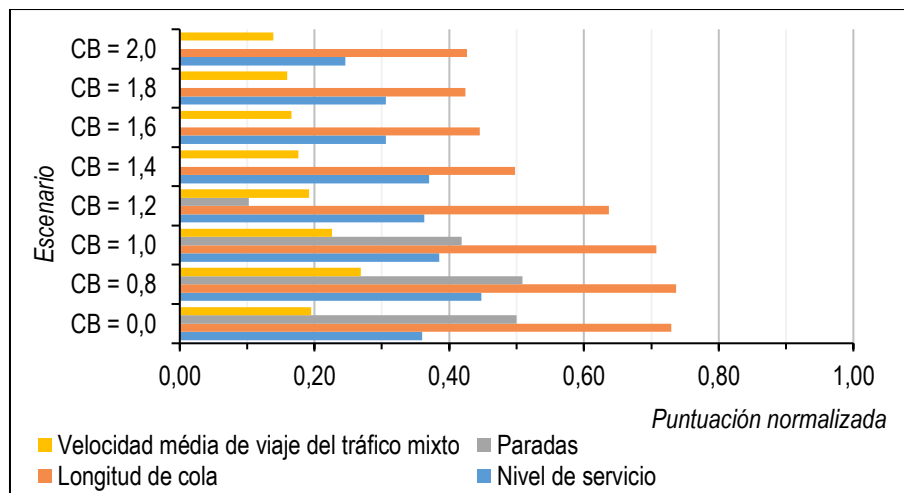


Figura 26. Desempeño de indicadores del tema *Fluidez y circulación del tráfico mixto*, sentido N-S

Fuente: Elaboración propia.

7.4 IMPACTO OPERACIONAL, SENTIDO S-N

Las condiciones de operación para el corredor vial de la Calle 5 en su sentido S-N son mejores que las presentadas en el sentido contrario. Como se observa en la Figura 27, el corredor en sus accesos en el sentido S-N presentan longitudes de cola cortas, una velocidad promedio de viaje en los segmentos del corredor de 36 km/h y un nivel de servicio promedio por acceso de tipo C, dando a entender que en general el flujo vehicular transita por el corredor de sur a norte sin grandes inconvenientes. Se anota que en situación base, por el sentido S-N del corredor, circulan entre 1300 y 2460 vehículos mixtos por hora según el tramo vial.

Respecto a la operación de los escenarios con ciclo-banda, se observan dos tendencias. Los indicadores velocidad, paradas y nivel de servicio mejoran al incluir ciclo-bandas de hasta 1,8 metros. Reducciones de anchos de carril producto de una inclusión de ciclo-banda de un ancho de 2,0 metros tiene como consecuencia puntuaciones de indicadores menores a los presentados para la situación base. La otra tendencia se observa para el indicador longitud de cola, para el cual se observa que su puntuación normalizada empieza a disminuir, dando a entender que las colas dentro de los segmentos empiezan a alargarse.

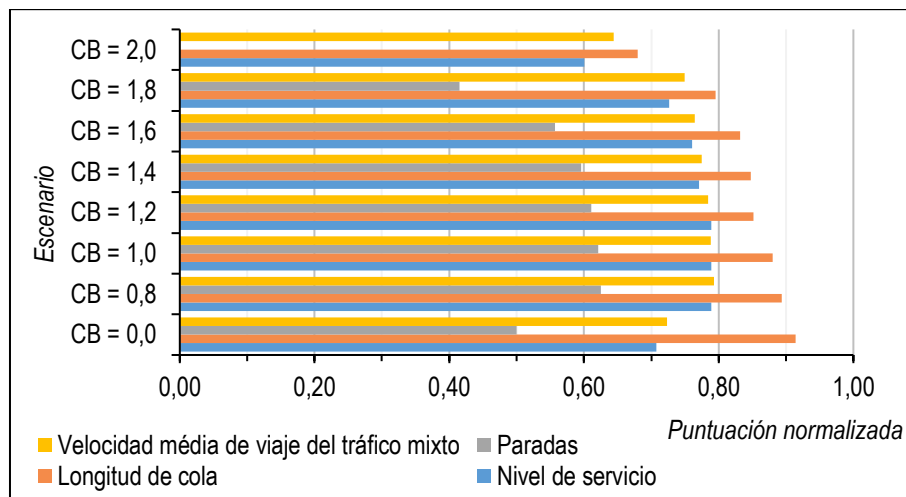


Figura 27 . Desempeño de indicadores del tema *Fluidez y circulación del tráfico mixto*, sentido S-N

Fuente: Elaboración propia.

7.5 ANÁLISIS DE CAPACIDAD

De acuerdo con el HCM (2010) un análisis de un corredor vial debe realizarse para los elementos que le componen, sin dejar a un lado la premisa de que los elementos se relacionan e interactúan entre sí y que hacen parte del sistema corredor vial. De acuerdo a la discusión de resultados realizada en el capítulo 4, se llevó a cabo un análisis de capacidad a partir del acceso de entrada del sentido vial N-S, que corresponde al Acceso Norte-Sur en la intersección de la Calle 5 con la Carrera 27. Este acceso es seleccionado para el objeto de estudio de la presente sección ya que corresponde al primer acceso de entrada del sentido cuyo ancho de carril es reducido debido a la inclusión de ciclo-bandas y, además, este acceso recibe una carga vehicular no controlada o con un estado ininterrumpido. En la Figura 28, se observan los cambios porcentuales normalizados de diferentes medidas de desempeño (velocidad media de viaje, paradas, longitud de cola, volumen que transita por el acceso y nivel de servicio) con relación a los resultados obtenidos para el escenario de la situación base o sin ciclo-banda.

De la Figura 28 se destacan dos hechos importantes. En primer lugar, se observa que el nivel de servicio es F para el escenario de situación inicial. Este nivel de servicio se mantiene al incluir las ciclo-bandas. Sin conocer los valores de velocidad, paradas y longitudes de cola, es posible afirmar que estos indicadores presentan condiciones de congestión vehicular, asociadas a velocidades bajas, alta cantidad de paradas y longitudes de cola extensas. En segundo lugar, la cantidad de vehículos que dejaron de ingresar al corredor tomando en comparación el escenario CB=0,0 y el CB=2,0, fue de 1487 vehículos. De la gráfica se puede inferir entonces que un 15% de esa cantidad de vehículos correspondió a la carga vehicular que no entró al corredor para el escenario CB=0,8, es decir, hay una reducción de capacidad no sólo al acceso, sino que también al corredor vial en su sentido N-S.

Estas implicaciones de capacidad vial controlada por los accesos de entrada al corredor, refuerza las recomendaciones realizadas por el HCM (2010) de realizar un análisis del corredor como un todo. Luego, cuando a un corredor vial se le modifican sus condiciones físicas como el ancho de carril de modo que pueda afectar la capacidad vial del corredor y sus accesos de entrada, se debe realizar un estudio técnico completo del corredor para obtener resultados coherentes con los impactos reales.

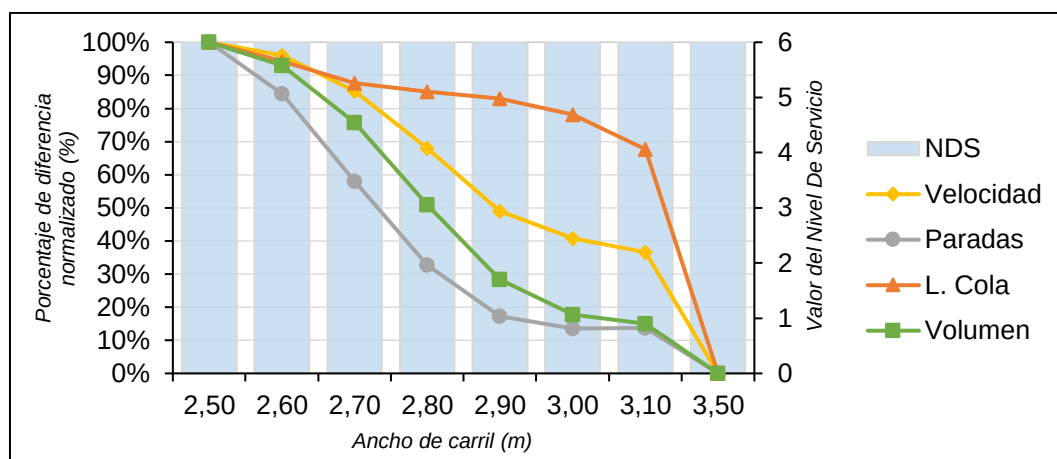


Figura 28. Porcentajes de diferencia normalizados para el Acceso N-S de la intersección Calle 5 con Carrera 27.

Fuente: Elaboración propia.

8 CONCLUSIONES

Los impactos y sensibilidad sobre la movilidad para los diferentes escenarios planteados para accesos de entrada a los distintos corredores considerados mostraron tendencias con relación al estado del nivel de servicio y al ancho de los carriles previo a la inclusión de ciclo-bandas. Los resultados sugieren que las condiciones iniciales de operación condicionan la dimensión de los impactos a las medidas de desempeño caracterizadoras de la operación del tráfico vehicular en el acceso.

El conjunto de criterios (dominios, temas e indicadores) identificados a partir de las metodologías, guías y recomendaciones que abarcan la concepción de la movilidad urbana sostenible sirvió como punto de partida para la estructuración y orientación del índice de movilidad en corredores viales como herramienta para el análisis y evaluación programas y proyectos de movilidad como la inclusión de ciclo-bandas.

A partir del conjunto de criterios identificados, los métodos de agregación y de jerarquización fueron apropiados para la construcción del índice. El *IMCV* posibilita la realización de análisis a diferentes niveles de evaluación de la movilidad del corredor, siempre en función de indicadores, los cuales son la medida descriptora y de análisis de los temas y dominios asociados. La jerarquía de tres niveles característica del *IMCV*, permite reconocer niveles de análisis, los cuales se pueden asociar a medidas y políticas de gestión a nivel de principios y estrategias.

La encuesta realizada a los especialistas en ingeniería de tránsito y movilidad urbana, con objeto de determinar los pesos de los dominios y temas que componen el *IMCV*, resaltaron la importancia de equilibrio de todos los aspectos propios de la movilidad.

La viabilidad de aplicación del índice construido fue validada a partir de su aplicación realizada al corredor de estudio, en la cual fueron verificados la disponibilidad y calidad de la información, dando a entender que los criterios y su forma de agregación para la construcción del índice son apropiados para describir el estado de la movilidad de un corredor vial urbano. Así mismo, se valida también la sensibilidad del índice y sus criterios frente a cambios y modificaciones del sistema corredor vial.

Si bien, las puntuaciones globales del índice para ambos sentidos del corredor vial estudiado son mayores que los valores del índice para la situación base, se identifica que los escenarios de los modelos con inclusión de ciclo-banda en un rango de ancho de 0,8 a 1,2 metros, se asocian a impactos positivos a la movilidad, reflejados en las puntuaciones de sus criterios.

La inclusión de las ciclo-bandas responde a políticas de movilidad sostenible que benefician principalmente a la movilidad en bicicleta. Sin embargo, la inclusión de la infraestructura trae consigo unas implicaciones a los principios o dominios que rigen la movilidad en un corredor vial. Estas implicaciones se reflejan de forma específica en cada criterio caracterizador de estos dominios, siendo esto evidente en los resultados obtenidos del cálculo del índice, en el cual se observó cómo dominios como la infraestructura y el tránsito de los modos no motorizados se ven beneficiados y dominios como el tránsito de los modos motorizados se pueden ver afectados negativamente.

La importancia de realizar la evaluación de la movilidad del corredor para una inclusión de ciclo-banda de diferentes anchos se evidencia en los comportamientos de impacto de los criterios, globalmente en los dominios. Aunque exista la idea de que la inclusión de la ciclo-

banda mejora las condiciones de movilidad sostenible en las calles, se obtuvieron resultados que indican que el ancho de la ciclo-banda impacta de forma significativa a los dominios que describen el índice, presentándose por ejemplo, un resultado contradictorio a lo que se puede esperar del impacto al medio ambiente, dominio negativamente afectado a medida que el ancho del carril mixto disminuía producto de la inclusión de ciclo-bandas cada vez más anchas.

El análisis de impacto a la movilidad en corredores viales debe tomar como referencia las condiciones de la ciclo-infraestructura a incluir, así como las condiciones de movilidad del corredor sin su implementación. Aunque existan recomendaciones nacionales e internacionales en cuanto al ancho de la ciclo-banda, se debe realizar un reconocimiento al corredor que permita conocer el estado de su movilidad, para luego considerar si la ciclo-banda a incluir aporta al corredor resultados exitosos a corto, mediano y largo plazo.

La concepción de movilidad sostenible en corredores viales en forma de índice se muestra como una herramienta fundamental que proporciona una perspectiva de los indicadores que pueden contribuir a la solución de problemáticas de movilidad, lo cual permitirá obtener mejores estrategias para dar solución y contribuir al uso adecuado y la suficiencia del espacio público para los distintos actores viales del corredor.

La metodología de evaluación de la movilidad en corredores viales, analizada a partir de los criterios que componen el índice *IMCV*, representa un instrumento idóneo para profesionales, investigadores y entidades tomadores de decisiones en materia de movilidad urbana, cuando estas deseen implementar medidas coherentes respecto a las necesidades del mejoramiento de la calidad de vida de los usuarios de los corredores viales.

La inclusión de la ciclo-banda debe considerar el grado de impacto que ocasione a los diferentes modos de transporte. Si la cantidad de bici-usuarios beneficiados son bajos y los modos motorizados se están viendo afectados negativamente, se deberían considerar rutas alternas para las bicicletas, pensando en la zona de influencia del corredor. Las rutas de ciclo-infraestructura deben diseñarse e implementarse de acuerdo a los volúmenes que puedan transitar por ellas, evitando ser implementadas ciclo-bandas en corredores viales que presenten bajos niveles de servicio.

Las limitaciones que se puedan presentar al evaluar la movilidad en corredores viales se asocian principalmente a calidad y existencia de información, de ello depende que el índice refleje con la puntuación una evaluación global de la movilidad. Cuando el uso del índice busque la comparación de escenarios o el análisis de un escenario hipotético, es importante considerar el tipo de comparación, si es en el tiempo o representa una situación inmediata. Dependiendo del modo de uso del índice, los resultados de los criterios del índice se verán afectados.

La evaluación de la movilidad en corredores viales a partir de criterios o indicadores, es una opción de análisis que desglosa la movilidad sostenible. Sin embargo, los indicadores identificados y las relaciones de jerarquía propias del *IMCV*, representan la descripción de aspectos ajustados a las condiciones locativas, de urbanismo, culturales, entre otras, de la ciudad de Cali, luego para trabajos futuros. Se recomienda revisar los indicadores identificados, considerar medidas de desempeño no solamente en función de los vehículos y la estructura física del corredor, sino que también considerar la posibilidad de describir el corredor de acuerdo a la percepción del usuario. Se sugiere revisar el índice desde su contenido, agregación, pesos y jerarquía, cada vez que se vaya a realizar el ejercicio de evaluar la movilidad en corredores viales en ciudades con características distintas a las de la ciudad de Cali.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcaldía de Santiago de Cali. (2005). Estudio plan maestro de ciclo-rutas (PLAMACIR).
- Brasil, B. (2007). Programa Brasileiro de Mobilidade por Bicicleta. Caderno de referência para elaboração de Plano de Mobilidade por Bicicleta nas Cidades. Brasília: Secretaria Nacional de Transporte e da Mobilidade Urbana.
- Chandra, S., & Kumar, U. (2003). Effect of lane width on capacity under mixed traffic conditions in india. *Journal of transportation engineering*, 129(2), 155-160.
- Collins, P. (2009). Paramics Microsimulation Modelling-RTA Manual. New South Wales Government. USA.
- Costa, M. D. S. (2008). Um índice de mobilidade urbana sustentável. *São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo*.
- Departamento Administrativo de Planeación de Cali (2017). Resolución 4132.010.21-182. Boletín oficial de publicaciones sentencias, acuerdos, decretos y resoluciones. Cali, Colombia, 9 de junio de 2017
- El Tiempo. (2017). *Bicicarriles, otro 'round' entre el carro y la cicla*. [online] El Tiempo. Available at: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16309155> [Accessed 17 Jun. 2017].
- Fellendorf, M., & Vortisch, P. (2010). Microscopic traffic flow simulator VISSIM. In *Fundamentals of traffic simulation* (pp. 63-93). Springer, New York, NY.
- Gleave, S. D. (2015). Indicadores Encuesta de Movilidad. Greibe, P., & Buch, T. S. (2016). Capacity and behaviour on one-way cycle tracks of different widths. *Transportation research procedia*, 15, 122-136.
- Gudmundsson, H. (2004). Sustainable transport and performance indicators. *Issues in environmental science and technology*, (20), 35-63.
- Guide, U. B. D. (2011). National Association of City Transportation Officials. *New York*, 8.
- Jensen, S. U. (2008, January). Bicycle tracks and lanes: A before-after study. In *Transportation Research Board 87th Annual Meeting* (pp. 1-13).
- Kraft, W. H., Homburger, W. S., & Pline, J. L. (2009). Traffic engineering handbook.
- Lewis-Evans, B., & Charlton, S. G. (2006). Explicit and implicit processes in behavioural adaptation to road width. *Accident Analysis & Prevention*, 38(3), 610-617.
- Litman, T. (2008). Sustainable transportation indicators: a recommended program to define a standard set of indicators for sustainable transportation planning.
- Litman, T. A. (2009). *Sustainable transportation indicators: a recommended research program for developing sustainable transportation indicators and data* (No. 09-3403).
- Magagnin, R. C., & da Silva, A. N. R. (2008). A percepção do especialista sobre o tema mobilidade urbana. *Transportes*, 16(1).
- Manjunatha, P., Vortisch, P., & Mathew, T. V. (2013, January). Methodology for the Calibration of VISSIM in Mixed Traffic. In *Transportation research board 92nd annual meeting* (Vol. 11).
- Manual, N. B. (2002). New York State Department of Transportation.

- Manual-HCM, H. C. (2010). Transportation research board. National Research.
- Maryland Department of Transportation State Highway Administration (2017). VISSIM Modeling Guidance.
- Ministerio de Transporte de Colombia. (2016). Despacio: Guía de ciclo-infraestructura para ciudades colombianas. (C. Pardo & A. Sanz, Eds.). Bogotá D.C.: Ministerio de Transporte de Colombia.
- Mitchell, G. (1996). Problems and fundamentals of sustainable development indicators. *Sustainable development*, 4(1), 1-11.
- Mueller, C., Torres, M., & Morais, M. (1997). Referencial básico para a construção de um sistema de indicadores urbanos. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA).
- New Zealand Transport Agency (2014). Transport Model Development Guidelines.
- Ortuzar, J., & Willumsen, L. G. (2008). *Modelos de transporte* (Vol. 1). Ed. Universidad de Cantabria.
- Potts, I. B., Harwood, D. W., & Richard, K. R. (2007). Relationship of lane width to safety on urban and suburban arterials. *Transportation Research Record*, 2023(1), 63-82.
- Prabhu, R., Colfer, C. J. P., & Dudley, R. G. (1999). *Guidelines for developing, testing and selecting criteria and indicators for sustainable forest management: a C&I developer's reference* (Vol. 1). CIFOR.
- PTV Group. (2013). PTV VISSIM 7 User Manual. PTV AG, 240
- Rafael Cal y Mayor R., & Cárdenas, J. (2010). Ingeniería de tránsito: fundamentos y aplicaciones. Editorial Félix Varela.
- Roess, R. P., Prassas, E. S., & McShane, W. R. (2004). Traffic engineering.
- Shields, D. J., Šolar, S. V., & Martin, W. E. (2002). The role of values and objectives in communicating indicators of sustainability. *Ecological Indicators*, 2(1-2), 149-160.
- Siche, R., Agostinho, F., Ortega, E., & Romeiro, A. (2007). Índices versus indicadores: precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. *Ambiente & sociedade*.
- Svensson, Å. (2004). Arterial streets for people: Guidance for planners and decision makers when reconstructing arterial streets. *European Commission Fifth Framework Programme*.
- Vissim, P. T. V. (2008). 5.10 User Manual. PTV Planung Transport Verkehr AG, Stumpfstraße, 1.
- Wiedemann, R. (1974). Simulation des Strassenverkehrsflusses.
- Woody, T. (2006). Calibrating freeway simulation models in VISSIM. University of Washington.
- Zhang, L., Ji, M., & Ferrari, N. (2011). Comprehensive highway corridor planning with sustainability indicators (No. MD-11-SP009B4E). Maryland. State Highway Administration.

ANEXOS

ANEXO A: RESULTADOS DE MODELOS PTV VISSIM©

ANEXO B: ENCUESTA PARA CÁLCULO DE PESOS

ANEXO C: GUÍA DE CÁLCULO PARA INDICADORES

ANEXO D: CÁLCULO DEL ÍNDICE PARA CORREDOR VIAL CALLE 5