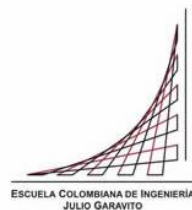


# **Maestría en Ingeniería Civil**

## **Estimación de Accidentes en Vías de Uso Exclusivo de BRT, según el Manual de Seguridad Vial de Estados Unidos, Estudio de Caso: Ciudad de Bogotá**

**Kelly Andrea Rodríguez Polo**

**Bogotá, D.C., 30 de mayo de 2018**



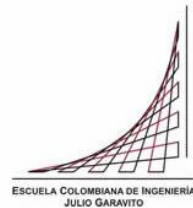
**Estimación de Accidentes en Vías de Uso Exclusivo de BRT,  
según el Manual de Seguridad Vial de Estados Unidos, Estudio de  
Caso: Ciudad de Bogotá**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con  
énfasis en Tránsito y Transporte**

**Ingeniero Santiago Henao Pérez**

**Director**

**Bogotá, D.C., 30 de mayo de 2018**



La tesis de maestría titulada “Estimación de Accidentes en Vías de Uso Exclusivo de BRT, según el Manual de Seguridad Vial de Estados Unidos, Estudio de Caso: Ciudad de Bogotá”, presentada por Kelly Andrea Rodríguez Polo, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Tránsito y Transporte.

Director de la tesis

Ingeniero Santiago Henao Pérez

Jurado

Ingeniera Mónica Suárez Pradilla

Jurado

Ingeniero Alberto Boada Rodríguez

Bogotá, D.C., 30 de mayo de 2018

## Dedicatoria

A mis hijas Daniela y Valeria que son la luz de mi vida y me motivan cada día, a mi madre Martha Polo quien me apoyo durante mis largos periodos de estudio y trabajo y, al que fue mi compañero de vida por muchos años Juan Manuel.

### *Poema*

*Si para recobrar lo recobrado  
debí perder primero lo perdido,  
sí para conseguir lo conseguido  
tuve que soportar lo soportado,*

*Sí para estar ahora enamorado  
fue menester haber estado herido,  
tengo por bien sufrido lo sufrido,  
tengo por bien llorado lo llorado.*

*Porque después de todo he comprobado  
que no se goza bien de lo gozado  
sino después de haberlo padecido.*

*Porque después de todo he comprendido  
por lo que el árbol tiene de florido  
vive de lo que tiene sepultado.*

*Francisco Luis Bernárdez.*

## Agradecimientos

A el ingeniero Santiago Henao, asesor y director de esta investigación, por el tiempo y apoyo que me brindó durante este proceso, a la ingeniera Maritza Villamizar quien con su colaboración y gestión me ayudo a dar cumplimiento a los requerimientos exigidos por la Escuela de Ingenieros Julio Garavito para culminar esta etapa, al ingeniero Lenin Bulla quien apporto la idea para este trabajo, a mi jefe el ingeniero Luis Ángel Moreno quien me permitió dedicarme a esta tesis en horas laborales y ante todo al doctor Carlos Andrés Gaviria por brindarme sus conocimientos con, profesionalismo y vocación en el desarrollo metodológico y matemático, de esta investigación lo que me permitió un desarrollo significativo en el campo profesional.

A mis compañeros de estudio, amigos y colegas que de una u otra forma me acompañaron en cada uno de los semestres. Mis más sinceros agradecimientos.

## Resumen

La seguridad vial es una preocupación global en la medida en que los accidentes de tránsito representan graves afectaciones temporales y/o permanentes a la salud de los involucrados. Por otra parte, los sistemas de buses de tránsito rápido (BRT) movilizan un gran volumen de pasajeros y durante su operación se ven involucrados dentro de esta problemática. Como una alternativa para evaluar las estrategias que permitan reducir los accidentes en este tipo de sistemas, en el presente trabajo se aplicó y calibró el modelo de predicción de accidentes para vías urbanas y suburbanas capítulo 12 implementado en el manual de seguridad de carreteras 2010 o HSM (2010) para los corredores de BRTs que están sobre las vías principales de la ciudad y usan un sistema de carril exclusivo de todos los demás sistemas de transporte (tanto público o privado) y de movilidad (ej. ciclorutas). Para el análisis se empleó los reportes de accidentalidad y volúmenes de tráfico suministrados por la secretaria de Movilidad de Bogotá. Se realizó la calibración del modelo usando las funciones de desempeño de la seguridad del HSM y se desarrollaron también las funciones específicas para las condiciones del BRT usando un modelo binomial negativo tanto en tramos de vía como en intersecciones. Mediante la validación se encontró que las funciones desarrolladas presentan un mejor ajuste. La aplicación de este modelo con algunas intervenciones en los tramos o intersecciones muestran que se pueden lograr reducciones de hasta un 35% en la accidentalidad total en las intersecciones del BRT. El modelo de predicción puede ser usado como una herramienta para definir lineamientos sobre las mejoras que se pueden implementar en el desempeño seguro del BRT de Bogotá en los próximos años.

Palabras Claves: Buses de tránsito rápido, Highway Safety Manual, Funciones de Desempeño de la Seguridad, Estimación de Accidentes

## Índice general

Introducción.....	13
Capitulo1. Descripción del problema.....	15
1.1 Justificación.....	16
1.2 Objetivos .....	17
1.3 Metodología .....	18
1.4 Alcance .....	21
1.5 Investigaciones Previas.....	22
1.6 Conclusiones y Recomendaciones Capítulo I .....	23
1.7 Organización del Trabajo de Grado .....	24
Capitulo 2. Clasificación de los Datos de Accidentalidad en el Sistema de Transporte Tipo BRT Transmilenio y Selección del Corredor .....	25
2.1 El Sistema TransMilenio.....	25
2.2 Operación Actual.....	26
2.3 Funcionamiento.....	29
2.4 Cobertura actual.....	29
2.5 Influencia del TransMilenio en la accidentalidad de la Ciudad de Bogotá	32
2.6 Conclusiones y Recomendaciones Capitulo II .....	42
Capitulo 3. Método Predictivo del Manual HSM 2010 para Vías Urbanas y Sub Urbanas .....	44
3.1 Resumen de la metodología general de predicción del Capítulo 12 del HSM. 44	
3.2 Pasos del método predictivo para las arterias urbanas y suburbanas .....	46
3.3 Estructura para desarrollar los pasos del modelo predictivo de Vías Urbanas y Suburbanas .....	49
3.4 Modelo predictivo de Tramos para vías urbanas y suburbanas .....	51
3.5 Modelo predictivo de Intersecciones para vías urbanas y suburbanas. ...	57
3.6 Conclusiones y Recomendaciones Capitulo III .....	65

Capitulo 4. Desarrollo de las Funciones de Desempeño de la Seguridad SPFs de las Condiciones Bases Av. Troncal Caracas. ....	66
4.1 Caracterización del Corredor Avenida Caracas .....	66
4.2 Condiciones base SPFs para Tramos e Intersecciones.....	71
4.3 Factores de Modificación de Accidentes CMFs para las condiciones locales. 72	
4.4 Participación de los diferentes actores de acuerdo con las condiciones locales .....	73
4.5 Metodología para el Cálculo de SPFs .....	74
4.6 Análisis del Cálculo de las SPFs para Tramos de Vía. ....	76
4.7 Análisis del Cálculo de las SPFs para intersecciones. ....	80
4.8 Conclusiones y Recomendaciones Capitulo IV .....	83
Capitulo 5. Aplicación y Evaluación del Modelo Predictivo de Accidentes del HSM 2010 Capitulo 12, para el Corredor del Trasmilenio de la Av. Troncal Caracas..	85
5.1 Metodología .....	85
5.2 Factores de Modificación de Accidentes CMFs para el modelo del HSM 2010 de Vías urbanas y Sub urbanas del Corredor Avenida Caracas.....	86
5.3 Incrementar en la fricción del pavimento en intersecciones .....	87
5.3.1 Señales de cuenta regresiva peatonal.....	87
5.3.2 Cámaras de Luz Roja .....	88
5.3.3 Otras medidas.....	88
5.4 Incrementar en la fricción del pavimento en tramos.....	89
5.5 Una discusión sobre los CMFs de algunas medidas implementas por Trasmilenio. ....	90
5.5.1 Volúmenes vehiculares usados para el análisis.....	91
5.6 Resultados y Análisis .....	91
5.6.1 Escenario 1. Sin ninguna mejora en Tramos .....	95
5.6.2 Escenario 2. Fricción del pavimento en Tramos Seleccionados .....	96
5.6.3 Escenario 2. Para todos los Tramos .....	97
5.6.4 Escenario 3. Para todas las Intersecciones sin mejoras solo el incremento del AADT.....	99



5.6.5	Escenario 4. En la Calle 6 aumentando la fricción del pavimento.....	100
5.6.6	Escenario7. Combinando los escenarios 3 a 6. ....	101
5.7	Conclusiones y Recomendaciones Capítulo V.....	102
	Conclusiones y Recomendaciones .....	103
	Bibliografía .....	106
	Anexos.....	109

## Índice de tablas

Tabla 1. Demanda de Pasajeros Diaria en Sistema TransMilenio por Troncal año 2015.	27
Tabla 2. Categorías de Tramos e Intersecciones para Vías Urbanas y Suburbanas HSM 2010.....	49
Tabla 3. Distribución del Tipo de Accidentes por Nivel de Gravedad. ....	50
Tabla 4. Coeficientes de regresión para Múltiples vehículos para Tramos de Vía.....	54
Tabla 5. Coeficientes de regresión para un solo vehículo .....	54
Tabla 6. Factor de Ajuste por tipo de Colisión Tramos para Múltiples vehículos .....	55
Tabla 7. Factor de Ajuste por tipo de Colisión en Tramos para un solo Vehículos .....	56
Tabla 8. Factor de ajuste para accidentes con peatones .....	56
Tabla 9. Factor de ajuste para accidentes con bicicleta en Intersecciones .....	57
Tabla 10. Coeficientes de regresión para Intercesión para Múltiples vehículos.....	59
Tabla 11. Coeficientes de regresión para Intercesión para un solo vehículo .....	60
Tabla 12. Factor de Ajuste por tipo de Colisión en Intersección para Múltiples vehículos	61
Tabla 13. Factor de Ajuste por tipo de Colisión en Intersección para un solo vehiculo....	62
Tabla 14. SPFs para Accidentes de Vehículo Peatón en Intersecciones SemafORIZADAS.	64
Tabla 15. Estimado de Volúmenes de Peatones.....	64
Tabla 16. Factor de ajuste para accidentes con bicicleta en Intersecciones .....	65
Tabla 17. Comparativo de las condiciones base del TransMilenio vs HSM (2010).....	71
Tabla 18. Factores de Modificación de accidentes utilizados cuando se emplean las SPFs del HSM. ....	72
Tabla 19. Variables Consideradas para generar SPFs para Tramo de vía.....	76
Tabla 20. Características de los datos de entrada para cálculo de SPFs.....	76
Tabla 21. SPFs para los segmentos del carril exclusivo del BRT.....	77
Tabla 22. Parámetros de calidad del ajuste (validación) .....	80
Tabla 23. Variables Consideradas para generar SPFs para Intersección .....	81
Tabla 24. Características de los datos de entrada para cálculo de SPFs en Intersecciones .....	81
Tabla 25. SPFs para las intersecciones del carril exclusivo del BRT .....	82
Tabla 26. Parámetros de calidad del ajuste de las SPFs para las intersecciones (validación).....	83
Tabla 27. CMFs para incremento en la fricción del pavimento en intersecciones.....	87
Tabla 28. Crecimiento de los volúmenes de vehículos estimados para el análisis. ....	91
Tabla 29. Intersección Calle 6. Accidentes por clase de 2012 a 2017.....	92
Tabla 30. Intersección Calle 51. Accidentes por clase de 2012 a 2017.....	93
Tabla 31. Intersección Calle 63. Accidentes por clase de 2012 a 2017.....	93

## Índice de figuras

Figura 1. Metodología propuesta para el desarrollo de la investigación. ....	20
Figura 2. Mapa de Troncales y Estaciones de TransMilenio. ....	28
Figura 3. Demanda de pasajeros diaria por Troncal de TransMilenio. ....	28
Figura 4. Mapa del Área Urbana de Bogotá con Troncales de TransMilenio.....	31
Figura 5. Cantidad de pasajeros lesionados en buses articulados y biarticulados. ....	34
Figura 6. Porcentaje de Accidentes Totales entre 2012 a 2017 por Troncales de TransMilenio. ....	35
Figura 7. Localización de accidentes en Troncales de Transmilenio.....	36
Figura 8. Porcentaje de Accidentes por Gravedad entre 2012 a 2017 .....	37
Figura 9. Accidentes por Gravedad entre 2012 a 2017 por Troncales de TransMilenio ...	37
Figura 10. Porcentaje de Accidentes por colisión por tipo de vehículo entre 2012 a 2017	38
Figura 11. Porcentaje de Accidentes por colisión por tipo de vehículo entre 2012 a 2017	39
Figura 12. Porcentaje de Accidentes por clase entre 2012 a 2017.....	39
Figura 13. Accidentes por clase entre 2012 a 2017 .....	40
Figura 14. Porcentaje de Accidentes por clase entre 2012 a 2017.....	40
Figura 15. Accidentes Tipo de víctima por Corredor entre 2012 a 2017 .....	41
Figura 16. Rango de Edad de Lesionado en TransMilenio 2012 a 2017 .....	41
Figura 17. Accidentes de Buses por colisión con objetos fijos 2012 a 2017 .....	42
Figura 18. Definición de Tramo de vía o Intersección. ....	47
Figura 19. Pasos del Método Predictivo HSM Capítulo 12 .....	48
Figura 20. Mapa de localización del Corredor de la Avenida Caracas. ....	67
Figura 21. Sección Transversal Típica con Estación Av. Caracas Troncal de TransMilenio. .....	69
Figura 22. Estaciones Av. Caracas Troncal de TransMilenio. ....	69
Figura 23. Troncal Av. Caracas, Intersecciones y Tramos evaluados con HSM 2010.....	70
Figura 24. Señales de cuenta regresiva peatonal .....	88
Figura 25. (a) Detector automático de peatones y (b) refugio para peatones .....	89
Figura 27. Tramo 1(Calle 6 – Diag. 7), (Tramo 2 Calle 51 – Calle 53).....	94
Figura 28. Escenario 1 y estimación de accidentes para Tramo 1(Calle 6 – Diag. 7), (Tramo 2 Calle 51 – Calle 53) .....	95
Figura 29. Escenario 2 y Evaluación de Escenario 1 para Tramo 1(Calle 6 – Diag. 7), (Tramo 2 Calle 51 – Calle 53) .....	96
Figura 30. Escenario 2, Escenario 1 para todos los tramos del corredor Av Caracas .....	97
Figura 31. Localización intersecciones, Av Caracas con Calle 6 y Av Caracas con Calle 63 .....	98
Figura 32. Escenario 3, intersecciones Av Caracas con Calle 6 y Av Caracas con Calle 63 .....	99
Figura 33. Escenario 4, intersección Av Caracas con Calle 6 .....	100
Figura 34. Escenario 7, para todas las intersecciones de la Av Caracas .....	101

## Índice de Anexos

Anexo 1. Base de Datos Secretaria de Movilidad 2012 a 2017 .....	109
Anexo 2. Accidentes en el Sistema TransMilenio por Distribución .....	109
Anexo 3. Corredores con Mayor Accidentalidad BRT .....	109
Anexo 4. Información Base para Tramos e Intersecciones .....	109
Anexo 5. Predicción de Accidentes HSM 2010 Capitulo 12 Tramos e Intersecciones...	109
Anexo 6. Algoritmo en Matlab para SPFs .....	109
Anexo 7. Volúmenes de Trafico para la Av. Caracas .....	109

## Introducción

Las lesiones por accidentes de tránsito representan un problema de salud pública. En los países desarrollados, éstos son la primera causa de muerte y la segunda carga de enfermedad (Peden et al. 2001, Lopez et al. 2001, Peden et al. 2004, Novoa et al.2009). Los tres factores principales relacionados con los accidentes son el conductor, la vía y el vehículo, donde la carretera genera el 34% de los accidentes (HSM, 2010). Muchos países adoptan como objetivo principal la reducción en los accidentes de tránsito y este objetivo puede ser alcanzado mediante estudios de seguridad vial (Mattar-Habib et al, 2008). La seguridad vial surge como un área que busca estudiar los factores que involucran los accidentes de tránsito y proponer medidas para mitigar este problema.

Por otra parte, el incremento en la densidad de ocupación urbana genera cambios en los modos de transporte, migrando del uso de vehículo particular hacia el servicio público, y otros medios como las bicicletas. Esto hace necesario realizar investigaciones en seguridad vial de manera periódica (Hakkert & Gitelman, 2014). Además, para solucionar la demanda de transporte en áreas urbanas, un gran número de ciudades están empezando a considerar el BRT (por sus siglas en inglés: Bus Rapid Transit) como una alternativa sustentable para atender las necesidades de transporte masivo (Hook, 2005). Sin embargo, es importante considerar que la industria del BRT y BHLS (por sus siglas en inglés: Bus of High Level of Service) se encuentra en una etapa en desarrollo, y por tanto, es necesario el trabajo coordinado hacia su consolidación. Considerando además que, en países como Colombia se tienen problemas de educación vial durante su implementación inicial (Hidalgo & Gutiérrez, 2013).

En este trabajo, se implementó la metodología del modelo predictivo de accidentes del manual HSM 2010 para vías urbanas y suburbanas es adaptado para estimar la frecuencia de accidentes de accidentes en vías troncales del tipo BRT en Bogotá. Para esto se inicia con una descripción del sistema de transporte Transmilenio y la valoración de los tipos y clase de accidentes presentado en todas las troncales. En segunda instancia, se ilustra el método predictivo del manual HSM 2010 Capitulo 12 para vías urbanas y suburbanas, y se explica el proceso de calibración de las SPFs incorporadas en el manual HSM (2010) y el desarrollo de las funciones de desempeño de seguridad SPFs específicas a las condiciones

bases de corredor la avenida troncal Caracas. En la capítulo V del estudio, se aplica el modelo general predictivo de accidentes del manual HSM 2010 capítulo 12, y la evaluación de los resultados de los accidentes estimados en escenarios futuros. Por último, se resumen las conclusiones y recomendaciones más importantes de la investigación.

## Capítulo I

### Descripción del problema

El manual de seguridad de carreteras o HSM (por sus siglas en inglés: *Highway Safety Manual, 2010*) es un compendio del conocimiento relacionado con la seguridad de las carreteras con el fin de que sea usado por profesionales de la transportación. Este manual reúne la información disponible y metodologías en la medición, estimación y evaluación de carreteras en términos de la frecuencia de accidentes y la severidad de los mismos. La frecuencia de accidentes por severidad y tipo se estima a través de las funciones de desempeño de la seguridad o SPFs (por sus siglas en inglés: *Safety Performance Functions*) desarrolladas para las carreteras norte americanas. Los SPFs que se encuentran en capítulo 12 (Parte C) del HSM, utilizan información conocida sobre una vía, como son la geometría y el tráfico diario promedio (AADT), para predecir el número de accidentes en un corredor en un periodo de 1 año. Los SPFs pueden usarse tanto para las condiciones existentes de la vía como para escenarios futuros con un volumen de tráfico promedio proyectado. Para predecir la cantidad de accidentes considerando los diferentes parámetros de la carretera y/o posibles modificaciones en la misma se utilizan los factores de modificación de accidentes o CMFs (por sus siglas en inglés: *Crash Modification Factor*).

The CMF Clearinghouse (2017) es un portal desarrollado por departamento de transporte y administración de carreteras de los Estados Unidos que busca tres aspectos importantes: presentar un compendio de los diferentes proyectos en los que se ha determinado los factores de modificación de accidentes (CMFs), formar a los usuarios de los mismos y facilitar los procesos de investigación de los mismos. En este portal se presentan algunos proyectos relacionados con modificaciones sobre el sistema del BRT donde se reporta los CMFs como son: el cambio del número de paradas de X a Y (*Change number of bus stations from X to Y*), la instalación de ciclorrutas (*Install bicycle tracks*), la implementación de tecnología de prioridad en las señales de tránsito (*Install transit signal priority (TSP) technology*) y, modificar el radio de las curvas horizontales y proveer una espiral de transición (*Modify horizontal curve radius and length and provide spiral transitions*).

## 1.1 Justificación

Los sistemas BRT están empezando a convertirse en una opción para suplir las necesidades de movilidad urbana en las grandes ciudades. Los beneficios en la seguridad vial de los sistemas de buses con carriles exclusivos para BRT han sido resumidos en varios trabajos recientes como cita Duduta et al. (2012) y Keong-Goh et al. (2013). Sin embargo, en la revisión de literatura no se ha encontrado una metodología específica para evaluar la seguridad de esta modalidad de transporte.

En cuanto a avances en la temática, en Bogotá para el año 2005 se publicó el manual de auditorías de seguridad vial con la finalidad de definir las estrategias para contribuir a la disminución de los índices de accidentalidad en la ciudad considerando todos los modos de transporte (Alcaldía mayor, 2005). No obstante, este contempla solo los primeros 5 años de experiencia en el uso del Transmilenio a la fecha de su publicación y no involucra modelos de predicción de accidentes. Aunque se han implementado algunos cambios en los corredores, no existe una clara evidencia que este tipo de cambios resulten en una mejora de la seguridad (ej. Duduta et al. 2012).

Para incrementar el desempeño en cuanto a seguridad vial del BRT se han propuesto diferentes soluciones, por ejemplo, para reducir el número de fatalidades en peatones que produce el BRT de Bogotá se redujo el límite de velocidad a 20 km/h (12.4 mph) en el corredor llamado “eje ambiental”, este corredor presenta tres veces más accidentes que involucran peatones comparado con el corredor más congestionado del BRT (i.e. Avenida Caracas). Esta medida evidenció una baja reducción en la severidad de los accidentes, el 80% de los choques peatón-BRT generaron lesiones o daños más severos en este corredor, mientras que en el resto de los corredores (donde no se tomó la medida) esta cifra llega al 90%. Por tanto, no existe una clara evidencia que este tipo de cambios resulten en una mejora de la seguridad del peatón (Duduta et al. 2012).

Los choques que afectan una mayor cantidad de personas y limitan la operación de los BRT por varias horas son generalmente entre sus propios buses que circulan a alta velocidad y que colisionan al ingresar a la misma línea de paradas en una estación (Duduta et al. 2012). Duduta et al. (2012) aproxima que las sumas de tres de estos accidentes suman más de 170 personas heridas en Bogotá. De acuerdo con este estudio, se propone evaluar medidas



como la instalación de señales de alerta en la proximidad a las estaciones, espejos en los buses y cámaras que permitan incrementar la visibilidad del conductor, al igual que reducir los límites de velocidad en las cercanías a las estaciones.

Para evaluar las diferentes alternativas presentadas por los investigadores previamente mencionados es necesario contar con metodologías que permitan estimar los accidentes en las vías troncales del BRT y que estén documentadas para su aplicación práctica. Sin embargo, En la revisión de literatura no se ha encontrado una metodología específica para esta modalidad de transporte.

## **1.2 Objetivos**

### **Objetivo general**

Adaptar el modelo predictivo de accidentes del HSM para vías troncales de BRT (TransMilenio), a las condiciones físicas y de infraestructura de la ciudad Bogotá para evaluar la reducción de los índices de accidentalidad de los próximos 6 años, tomando como año base el 2016.

### **Objetivos específicos**

- Analizar los datos de accidentes de las Troncales del TransMilenio para definir el corredor con el mayor índice de accidentalidad dentro de sistema.
- Aplicar, calibrar y validar el modelo general de predicción de accidentes del HSM (2010) Capítulo 12 para vías Urbanas y Suburbanas para esto se determinan los Factores de Modificación de accidentes (por sus siglas en inglés: Crash Modification Factors; abreviado CMFs) para las condiciones locales del corredor BRT seleccionado como se establece en el HSM junto con los Factores de Modificación de Accidentes CMFs, que permitirán estimar la frecuencia de accidentes, su distribución por gravedad y tipo de colisión del corredor BRT seleccionado.

- Estimar y validar las Funciones de Desempeño de la Seguridad (por sus siglas en inglés: Safety Performance Functions; abreviado SPFs) para las condiciones locales de las vías del corredor BRT seleccionado de manera paralela al objetivo anterior.
- Evaluar y analizar los resultados de la estimación de accidentes del proceso del modelo predictivo para recomendar cambios que permitan reducir los índices de accidentalidad del corredor BRT seleccionado.

### 1.3 Metodología

La metodología de investigación que se utilizó en este proyecto por su carácter investigación aplicada, documental y experimental, esta se muestra gráficamente en la figura No. 1 y se explican en las siguientes fases (adaptado de: Baamonde y Pérez, 2013):

**Fase 1.** Recolección de información sobre sistemas BRT y accidentalidad: con el propósito de fortalecer el marco teórico y estado del arte; ya sea mediante la consulta de información de acceso abierto en internet o la consulta de artículos de publicaciones especializadas usando las bases de datos compradas por la universidad.

Posteriormente, el reconocimiento de intersecciones viales del tramo en estudio, sección vial del tramo, andenes, ciclorrutas, etc., para el establecimiento de la geometría en el año base.

El modelo base propuesto en el HSM (2010) al considerar la naturaleza aleatoria de los accidentes se describe a través de una distribución binomial negativa. Estas funciones se denominan SPFs en el HSM (Estas funciones debido a la alta dispersión en los datos de accidentes y a las experiencias de los registros de accidentalidad de Estados Unidos son obtenidas a través de regresiones binomiales negativas que se ajustan mejor para describir este tipo de fenómenos).

**Fase 2.** Información para la distribución de accidentes: Este conjunto de datos ofrece la información general de distribución de accidentes en función de las estadísticas locales los

cuales deben ser detallados, y serán el resultado del total de accidentes para cada ítem de los años de los corredores en estudio, los cuales se definirán de la siguiente forma:

- Distribución general de accidentes
- Distribución por tipo de colisión
- Distribución de accidentes en intersecciones
- Distribución por tipo de colisión en intersecciones

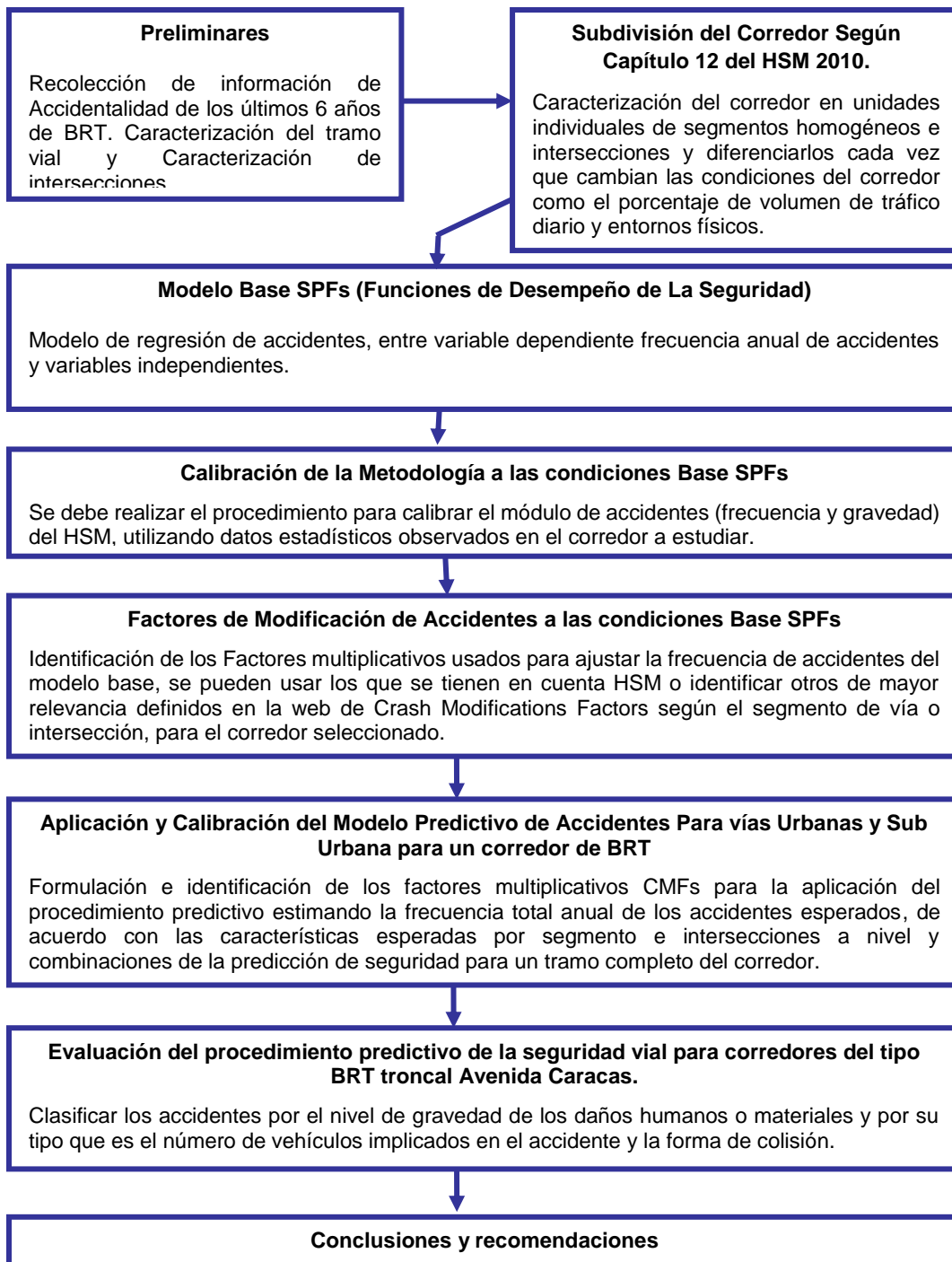


Figura 1. Metodología propuesta para el desarrollo de la investigación.  
Fuente: Elaboración propia.

**Fase 3.** Información para la obtención de los factores de modificación de accidentes (CMFs): El diseño geométrico y los controles de tránsito de una localidad afectan la accidentalidad, los CMFs permiten ajustar el promedio de accidentes esperados para las condiciones propias o base. Si una de estas característica genera una mayor frecuencia de accidentes, esta toma un valor mayor a 1 y viceversa (CMF Clearinghouse, 2017).

Esta investigación no pretende cambiar los coeficientes asociados a los CMFs para vías urbanas y suburbanas, ni las de sus intersecciones, debido a que se deben hacer investigaciones específicas para calibrarlos, aceptarlos o rechazarlos. El detalle del cálculo de los CMFs puede ser observado en el HSM – Capítulo 12.

**Fase 4.** Información para la calibración de accidentes (Cr): El factor de calibración de accidentes de tránsito estimados (Cr) permite llevar el modelo a las condiciones locales. El manual HSM menciona una muestra entre 30 y 50 sitios los cuales deben sumar por lo menos 100 accidentes por año y representar las condiciones físicas y de seguridad de la zona de estudio.

## **1.4 Alcance**

En esta investigación se implementó y calibró el modelo de predicción de accidentes presentado en el manual HSM (2010) Capítulo 12 para vías urbanas y suburbanas, adecuado a las condiciones de las vías troncales del sistema de Transmilenio, el corredor que se seleccionó para este estudio fue la Avenida Caracas debido a que presenta el mayor índice de accidentes (ver Capítulo 2). Los datos de accidentalidad corresponden a los años 2012 a 2016 suministrados por parte de la Secretaria Distrital de Movilidad, y fueron valorados de acuerdo con lo recomendado en el HSM (2010) Capítulo 12. Para finalmente evaluar las estrategias que permitan reducir los accidentes en este tipo de vías.

Es importante resaltar que en este estudio se calibran las SPFs del HSM 2010 y se desarrollan SPFs específicas para el corredor tanto en tramos de vía como en intersecciones. Los tramos e intersecciones no cumplen todas las condiciones establecidas

en el HSM, ni se cumplen todas las especificaciones para calcular SPFs debido a que no es práctico encontrar suficientes cantidades de tramos o intersecciones que tengan las mismas condiciones y/o número de accidentes mínimo recomendado.

## **1.5 Investigaciones Previas**

Las evaluaciones de seguridad vial pueden realizarse mediante estimación de accidentes, en esta medida, el manual de seguridad vial (HSM, 2010) presenta una metodología práctica y general, considerando dos elementos principales; factor de calibración y el modelo para unas condiciones base o SPFs. Aunque algunas SPFs son presentadas dentro del manual de seguridad, este sugiere el desarrollo de estas funciones de acuerdo a las condiciones locales de estudio.

Lu et al. (2014) uso la bondad de ajuste y cuatro años de datos de accidentes (2007-2010) del estado de la Florida para desarrollar las funciones de rendimiento de la seguridad (SPFs, por sus siglas en inglés) en tramos de vías para áreas urbanas y rurales. Estas fueron desarrolladas empleando modelo de regresión binomial negativo (NB, Negative Binomial). Los resultados de la bondad del ajuste mostraron que las SPF desarrolladas presentan un mejor ajuste que el modelo calibrado usando los SPFs del manual HSM (2010). Brimley et al. (2012) calibra las SPFs del HSM y desarrolla nuevos modelos para carreteras rurales de dos carriles en cada dirección en el estado Utah empleando 3 años de estadísticas de accidentes. Esta investigación determinó que las variables significativas son el volumen diario promedio anual (AADT), la longitud del segmento, límite de velocidad y el porcentaje del AADT compuesto de camiones.

Gómez & Bocarejo (2015) usaron un modelo binomial negativo, de Poisson y un modelo de redes Neuronales para estudiar el comportamiento de los accidentes en cada una de las estaciones del BRT de Bogotá. En su estudio se determinó que este comportamiento se puede definir en función de 11 variables de 35 estudiadas. Estas variables son el flujo de buses (por minuto), número de entradas de pasajeros, hora pico de la mañana, densidad de la población (por kilómetro cuadrado), número de accesos, proximidad a la vía principal, proximidad a una intercepción vehicular al mismo nivel, proximidad a uso institucional-recreacional de la tierra, proximidad a terrenos de uso industrial, proximidad a terrenos de

uso residencial, proximidad a zonas de estrato socio-económico 5 y proximidad a zonas de estrato socio-económico 1. Los resultados muestran que el diseño de acceso a las estaciones, la interacción con el tráfico en las intercepciones y el flujo de buses están estrechamente relacionados con el número de accidentes.

Ramírez y Ruiz (2016) realizaron la aplicación del modelo para predecir los accidentes en las vías multicarril del capítulo 11 del HSM (2010) en Bogotá y un análisis de sensibilidad, variando las condiciones geométricas actuales a características base y, comparando los resultados para determinar el porcentaje de reducción de accidentalidad. La calibración de los cinco corredores multicarril arrojó valores del coeficiente de calibración lejanos a 1.0 que se asocia a otros factores que no son considerados el modelo en la actualidad (es decir diferentes al ancho de carril, berma y separador, presencia de iluminación y control de velocidad automáticos) y los cuales afectan la accidentalidad.

## **1.6 Conclusiones y Recomendaciones Capítulo I**

- Los accidentes de tránsito se han convertido en una coyuntura de salud pública a nivel mundial y, por tanto, los estudios e investigaciones en seguridad vial son imperativos como herramienta para mitigar esta problemática al punto de hacer parte de las políticas y planes de gobiernos alrededor del mundo.
- El manual de seguridad vial HSM 2010 realizado por AASTHO en los Estados Unidos, es un compendio que congrega la documentación y practicas disponibles sobre metodologías en la medición, estimación y evaluación de vías en términos de la frecuencia de accidentes y la severidad de estos.
- La metodología del modelo predictivo de accidentes del manual HSM 2010 para vías urbanas y suburbanas es aplicado para encaminar la solución a la problemática de este trabajo de sobre la adaptación del método a vías troncales del tipo BRT en Bogotá considerando que tiene en cuenta los factores que diferencian el área urbana de la rural (es decir, interacción de vehículos con peatones y bicicletas).

## 1.7 Organización del Trabajo de Grado

De acuerdo con el objetivo general de esta investigación, el estudio se presenta en seis capítulos que se enumeran a continuación:

- El capítulo 1 contiene la descripción del problema el cual se expone en los siguientes partes: la introducción, la justificación, los objetivos, metodología el alcance de la investigación, las investigaciones previas, así como un resumen de la tesis.
- El capítulo 2 se realiza una descripción del sistema de transporte Transmilenio y además, se efectúa la valoración de los tipos y clase de accidentes presentado en todas las troncales con el fin de identificar el corredor al que se le aplicara la metodología del HSM 2010 Capitulo 12 para vías urbanas y suburbanas.
- El capítulo 3 ilustra el método predictivo del manual HSM 2010 Capitulo 12 para vías urbanas y suburbanas, mostrando los diferentes condiciones y elementos que hacen parte.
- El capítulo 4 explica el proceso de calibración de las SPFs incorporadas en el manual HSM (2010) y para las funciones de desempeño de seguridad de SPFs de las condiciones bases de corredor la avenida troncal Caracas. EL capítulo detalla las variables utilizadas y elementos considerados para definir las ecuaciones de las SPFs.
- El capítulo 5 presenta la aplicación del modelo general predictivo de accidentes del manual HSM 2010 capitulo 12, y la evaluación de los resultados de los accidentes estimados en escenarios futuros.
- Finalmente, se resumen las conclusiones y recomendaciones más importantes de la investigación sobre la aplicación del modelo predictivo del manual del HSM 2010 de vías urbanas y suburbanas para las troncales del tipo BRT, caso de estudio la ciudad de Bogotá, avenida Caracas.



## Capítulo II

### **Clasificación de los Datos de Accidentalidad en el Sistema de Transporte Tipo BRT Transmilenio y Selección del Corredor**

En este capítulo se realiza la caracterización de los componentes del sistema de transporte masivo del tipo BRT TransMilenio de la Ciudad. Además, se efectúa la clasificación de los tipos y clases de accidentes de cada uno de los corredores que hacen parte de la red vial, con el fin de identificar variables destinadas a proporcionar una visión de su comportamiento, ubicación de ocurrencia (es decir, tramo o intersección), el tiempo de ocurrencia, fecha, clase y tipo de accidente, tipo de vehículo implicado, las causas del accidente, los detalles del conductor y la clase de víctimas (es decir fatal y no fatal). Esta información usada para seleccionar la Troncal con mayor número de accidentes, que, para este caso en particular, son considerados solo los accidentes que están relacionados con los buses del TransMilenio. Los datos de accidentalidad fueron suministrados por la Secretaria de Movilidad y corresponden al periodo comprendido entre los años 2012 al 2017.

#### **2.1 El Sistema TransMilenio.**

El sistema TransMilenio de Bogotá - Colombia, del tipo BRT, es el tercero de este tipo desarrollado en Latinoamérica; el primero fue el de Curitiba en Brasil y el segundo el trolebús de Quito en Ecuador (Hook, 2009), el primero en Colombia y uno de los más exitosos debido a la gran densidad urbana que tiene Bogotá. Por lo anterior, ha sido tomado como modelo para algunos de los demás proyectos de este tipo que se están adelantando en algunos países de Hispanoamérica (Aparicio L 2010). En el Consejo Nacional de Política Económica y Social CONPES del año 2000, se estableció la estructuración del servicio público urbano del transporte masivo para la ciudad de Bogotá. Se definieron las etapas de construcción del sistema en cuatro fases del BRT para la ciudad (denominado TransMilenio), esta propuesta ha sido modificada de acuerdo con el progreso de la red y de los recursos utilizables, llegando a proponer 8 fases para su desarrollo (Hurtado et al.

2011). A partir del año 2001 entró en operación los primeros corredores del BRT en las principales vías de la ciudad, (Ardila, 2004) y, el Distrito es el ente encargado de la construcción y manteniendo de la infraestructura vial y de la operación de los centros de control. El sector privado provee los buses y equipos de recaudo mediante un contrato de concesión. La capacidad del sistema TransMilenio ha experimentado un gran crecimiento, reportando un número de personas movilizadas por hora por dirección para los años 2003, 2010 y 2013 de 25.000 (Levinson et al, 2003), 40.000 (Hidalgo & Carrigan 2010; Duduta et al. 2012) y 48.000 (Global BRT Data 2017) respectivamente.

La infraestructura del Sistema TransMilenio emplea los carriles centrales de algunas de las principales arterias de la ciudad, acondicionándolos para la circulación de buses articulados, y separándolos físicamente de los carriles de uso mixto (aquellos carriles disponibles para circulación de vehículos particulares, camiones y taxis). Adicionalmente, la infraestructura incluye estaciones sobre las troncales con elementos de acceso peatonal y otras facilidades (patios, talleres de mantenimiento, estacionamiento y el centro de control de operaciones). El acceso al sistema lo conforman estaciones cerradas a las que se accede por un paso peatonal a nivel o desnivel en el que se realiza el pago del tiquete.

En comparación con los servicios de transporte de pasajeros colectivos e individuales (taxis) existentes en la ciudad, el sistema ofrece mejoras en cuanto a velocidad de desplazamiento y seguridad de los usuarios; igualmente el sistema brinda mayor comodidad a las personas con movilidad reducida, ya que el abordaje y desembarco de los vehículos se realiza a nivel del piso del bus (no existen escaleras), con zonas específicas para el uso de estas personas y, a su vez, en el interior de los vehículos se dispone de sillas diferenciadas para el uso exclusivo de ellos.

## **2.2 Operación Actual**

Los elementos que conforman el sistema de BRT TransMilenio son: 114.4 Km de troncal correspondientes a 11 corredores viales en servicio, 9 portales con patios de garajes, 139 estaciones, 41 patios avalados, 7454 paraderos, 13 zonas de operación, 3758 ciclo-parqueaderos, 4315 puntos de recarga y un solo operador de recaudo, con un centro de control centralizado.

Desde el inicio de su operación en el año 2000 la demanda movilizada con el Sistema TransMilenio ha crecido sostenidamente, presentando incrementos propios a la entrada de cada troncal por la incorporación de nueva infraestructura, y por la maduración propia del sistema. La tabla 1 y figura 2 presenta la demanda discriminada por troncal y su tipo de ingreso al sistema para un total de 2, 213,236 pasajeros por día.

El servicio de operación de troncales y rutas alimentadoras está a cargo de empresas privadas bajo contratos de operación o concesión. Los buses troncales circulan por carriles exclusivos localizados en el carril izquierdo de la calzada (para cada sentido) y en función de la demanda y la disponibilidad de espacio; se ofrecen dos tipos de corredores o perfiles viales:

- Dos carriles exclusivos en cada sentido a lo largo de la troncal.
- Un carril exclusivo en cada sentido y en las estaciones dos carriles para permitir el sobrepaso de vehículos.

Tabla 1. Demanda de Pasajeros Diaria en Sistema TransMilenio por Troncal año 2015.

Corredor	Inicio	Fin	Número de estaciones	Longitud(K m)	Demanda Pasajeros Día
Calle 80	Portal e la 80	Polo	13	10.1	158,086
Caracas	Calle 76	Tercer Milenio	14	8.1	520,880
Caracas Sur	Hospital	Portal Usme	9	11.9	
Eje Ambiental	Museo del Oro	Universidades	3	1.9	
Norte	Terminal	Heroes	17	10.3	335,700
Americas	Portal Americas	Avenida Jimenez	18	13	282,051
NQS Central	La Castellana	San Jose	13	12.4	
NQS Sur	Comuneros	San Mateo	17	12.7	192,405
Suba	Portal Suba	San Martin	14	13	121,438
Calle 26	Portal dorado	Centro Memoria	13	12.2	104,180
Carrera 10	San Diego	Portal 20 Julio	10	7.3	256,970
<b>Total</b>					<b>2,213,236</b>

Fuente: Elaboración propia a partir de información de TransMilenio.



Figura 2. Mapa de Troncales y Estaciones de TransMilenio.  
Fuente: TransMilenio.com.

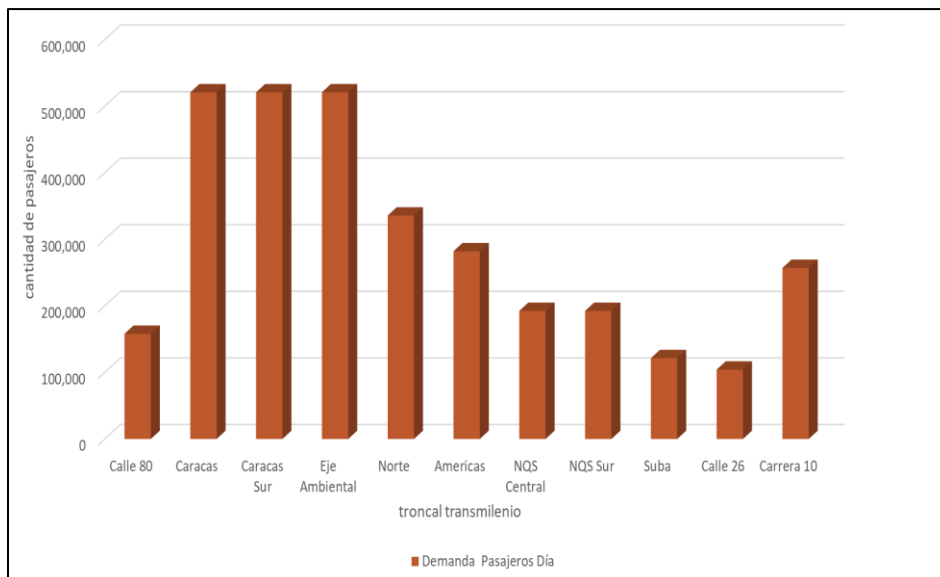


Figura 3. Demanda de pasajeros diaria por Troncal de TransMilenio.  
Fuente. Elaboración propia a partir de información de TransMilenio.

## **2.3 Funcionamiento**

El recaudo de la tarifa está a cargo de dos operadores privados contratados bajo la figura de concesión quienes tienen la función de vender tarjetas inteligentes que sirven para el pago del servicio y para el acceso a la “zona paga” del sistema.

El sistema de Buses es liderado por la empresa TransMilenio S.A. Los buses (incluyendo los alimentadores del sistema) prestan el servicio bajo el sistema de concesión y pertenecen a empresas privadas.

Los ingresos generados por este sistema de buses son destinados al pago de mantenimiento de estaciones, gastos de funcionamiento y operación del Centro de Control y, a las empresas transportadoras por kilómetro recorrido. En este caso, la empresa encargada del Centro de Control es TransMilenio S.A cuyos accionistas son entidades públicas del Distrito Capital.

La infraestructura del BRT es construida por el Instituto de Desarrollo Urbano, que es el ente encargado de construir y administrar el sistema vial y de espacio público.

Los componentes del sistema de Buses incluyen tanto las vías de circulación de los buses (troncales exclusivas para los buses articulados, carriles adyacentes para tráfico mixto, rutas alimentadoras), accesos y facilidades (estaciones, ciclo parqueaderos, puentes peatonales, patios) y los elementos urbanísticos (andenes, alamedas y plazoletas).

## **2.4 Cobertura actual**

Las rutas troncales cubren la ciudad transversal y longitudinalmente a través de los principales corredores de demanda, mientras que las rutas alimentadoras penetran en las vías de carácter secundario sirviendo en la actualidad a unos 302 barrios de la ciudad. Las troncales construidas en la Fase I unen los principales polos generadores y atractores de viajes de Bogotá, con la finalidad de facilitar la accesibilidad y movilidad desde y hacia las principales funciones urbanas (vivienda y empleo). Las troncales de la Fase II son la

solución a el centro expandido de Bogotá, donde se concentran las entidades financieras, instituciones públicas, educativas, culturales y de salud más significativas a nivel local, regional y nacional; igualmente con la segunda fase se dio cobertura a las localidades de Suba, Bosa y Kennedy, sectores de gran desarrollo residencial. La Fase III, incluye la Troncal Calle 26 que une el Aeropuerto Internacional El Dorado y sus barrios aledaños como Fontibón con el centro de la ciudad y la Troncal Carrera 10 que integra el sector del 20 de julio con el centro de la capital.

El sistema TransMilenio opera con buses articulados y biarticulados que circulan por 114.4 Km de troncal y buses alimentadores que movilizan a los pasajeros entre el corredor troncal y las zonas periféricas de la ciudad.

Los corredores troncales actualmente en operación son:

- Avenida Caracas (Fase I)
- Avenida Caracas Sur y Usme (Fase I)
- Autopista Norte (Fase I)
- Calle 80 (Fase I)
- Eje Ambiental (Fase I)
- Calle 13 entre Carrera 10 y Puente Aranda (Fase II)
- Avenida de Las Américas (Fase II)
- Avenida NQS (Fase II)
- Avenida Suba (Fase II)
- Avenida Calle 26 (Fase III)
- Avenida Carrera 10a (Fase III)

En la figura 3 se muestran los corredores troncales del sistema con sus portales (punto de inicio o final de viajes).la siguiente figura se muestran los corredores troncales del sistema con sus portales (punto de inicio o final de viajes).

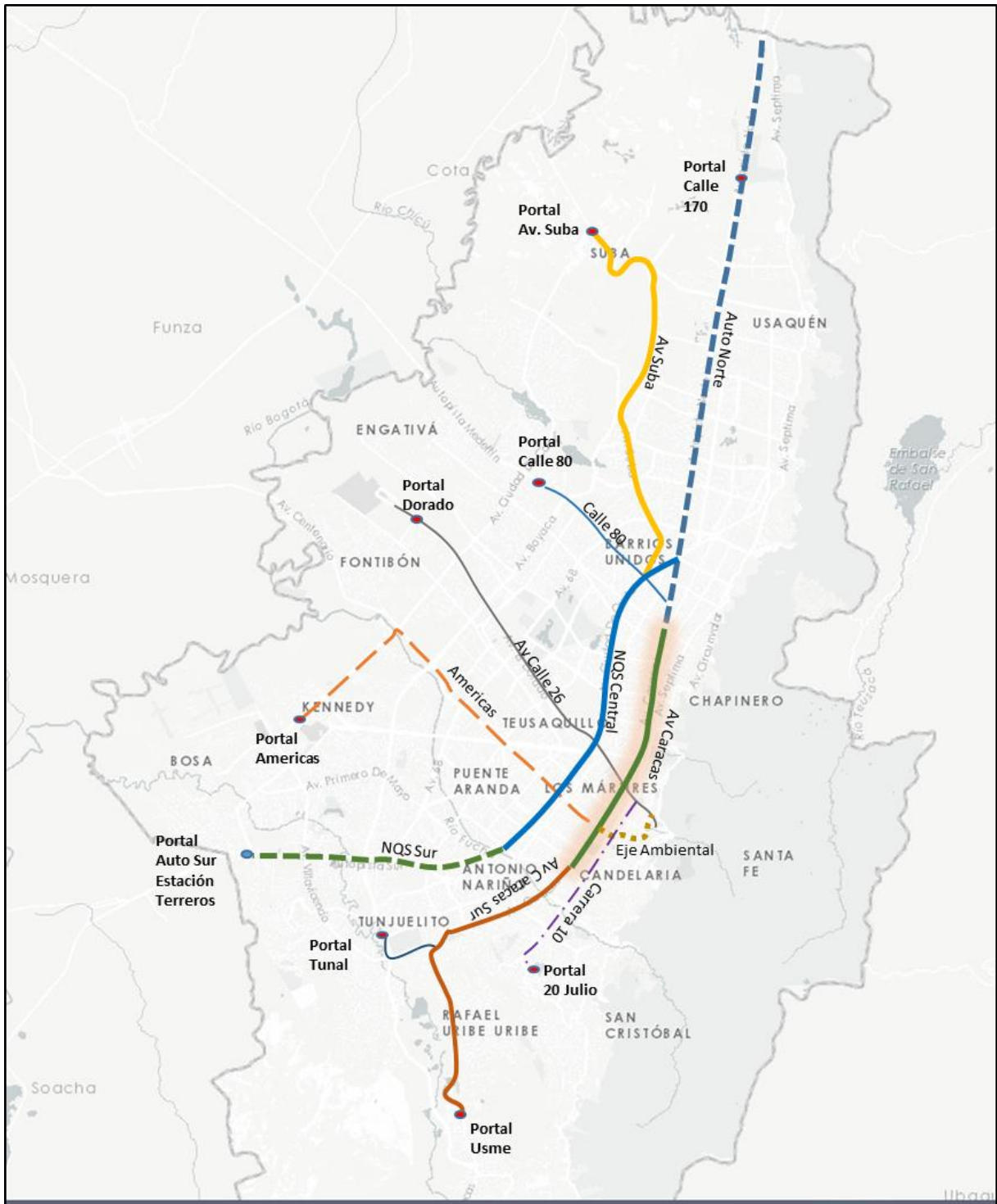


Figura 4. Mapa del Área Urbana de Bogotá con Troncales de TransMilenio.  
 Fuente. Elaboración propia a partir de imágenes /www.ideca.gov.co.

## **2.5 Influencia del TransMilenio en la accidentalidad de la Ciudad de Bogotá**

### **2.5.1 Recolección de información sobre accidentes BRT**

Los datos de accidentalidad relacionadas con el BRT fueron obtenidos mediante una solicitud a la Secretaria de Movilidad de Bogotá el día 12 de octubre del 2017 mediante una carta formal que se presenta en el anexo 1. De acuerdo con los objetivos de estudio y los estudios recientes en seguridad vial del BRT por Hidalgo & Gutiérrez (2013), Gómez & Bocarejo (2015) y Santos Reyes et al. (2014), los datos solicitados fueron los siguientes:

- Accidentes por tiempo de ocurrencia (año, mes).
- Tipo de accidente de tráfico (fatal y no fatal).
- Vehículo involucrado en colisión con BRT (livianos, motos, buses, camiones y bicicletas).
- Tipo de colisión (entre BRT y el automóvil, entre BRT y el peatón, entre BRT y la moto y entre BRT y el ciclista).
- Víctimas (conductor, pasajero, peatón y ciclista).
- Edad y sexo de las víctimas.
- Localización de los accidentes

Se recibió respuesta por parte de la Secretaria de Movilidad de Bogotá el día 28 de noviembre de 2017 a través de un correo electrónico firmado por la funcionaria Nancy Rocio Romero R con el cargo de Profesional Universitario. El cuerpo del correo se encuentra en el anexo 1, en este se indica que suministraron la siguiente información:

- Registro de siniestros viales para el periodo comprendido entre enero de 2012 y octubre de 2017.

Los datos de accidentalidad reportados por la Secretaria de Movilidad de Bogotá se presentan en el anexo 2 (solo disponible en medio digital). Estos datos fueron suministrados en un archivo de Excel para los años 2012 a 2017, y la información se encuentra fraccionada en 3 hojas diferentes; hoja de accidentes, hoja de conductores y hojas de víctimas. La hoja de accidentes contiene los detalles relacionados con la fecha, localización (dirección con nomenclatura), tipo de accidente, posibles causas, etc. Por otra parte, la hoja de conductores reporta los datos demográficos de todos los conductores y, marcas y



modelos de los vehículos involucrados en cada accidente. Finalmente, los datos demográficos de las víctimas relacionadas con los accidentes (heridos y muertos) son expuestos. En general, los datos contenidos en cada hoja se presentan a continuación:

- Hoja de accidentes: (Accidente, Fecha, Oficina, gravedad Código, clase Código, clase Nombre, Choque Código, Choque Nombre, ObjetoFijoCodigo, ObjetoFijoNombre, Latitud, Longitud, Dirección, TipoVia1, NumeroVia1, LetraVia1, CardinalVia1, TipoVia2, NumeroVia2, LetraVia2, CardinalVia2, Complemento, Municipio, Hora Ocurrencia, Área tránsito, Corredor Vial)
- Hoja de Conductores: (Accidente, Fecha, Vehículo, Edad, Sexo, Gravedad, Código marca Vehículo, Modelo Vehículo, Capacidad Carga, Cantidad Pasajeros, Color Vehículo, Clase Vehículo, Servicio Vehículo, Modalidad Vehículo, Nacionalidad Vehículo, PosseSeguroResponsabilidad, TipoFalla)
- Hoja de Víctimas: (¿Accidente, Fecha, Edad, Peatón-Pasajero?, Sexo, Gravedad).

### **2.5.2 Accidentes por tiempo de ocurrencia Año y Mes**

La conversión de las principales vías de la ciudad en troncales del sistema de transporte masivo TransMilenio ha hecho necesaria la modificación del plan vial de la ciudad; así como la reorganización de los planes de señales en las intersecciones y la generación de cruces peatonales seguros para facilitar el acceso a estaciones y demás instalaciones (Cendales, 2014). Sin embargo, es preocupante el aumento de personas lesionadas y de muertes reflejadas en los últimos 5 años para el sistema de transporte público de Bogotá, entre el 2012 y abril del 2016 se reportaron 11.144 accidentes en esta modalidad es decir a han aumentado en un 18,6 % los incidentes dentro de este periodo de tiempo (El Espectador, 2016). Estos valores se presentan en la figura 5.

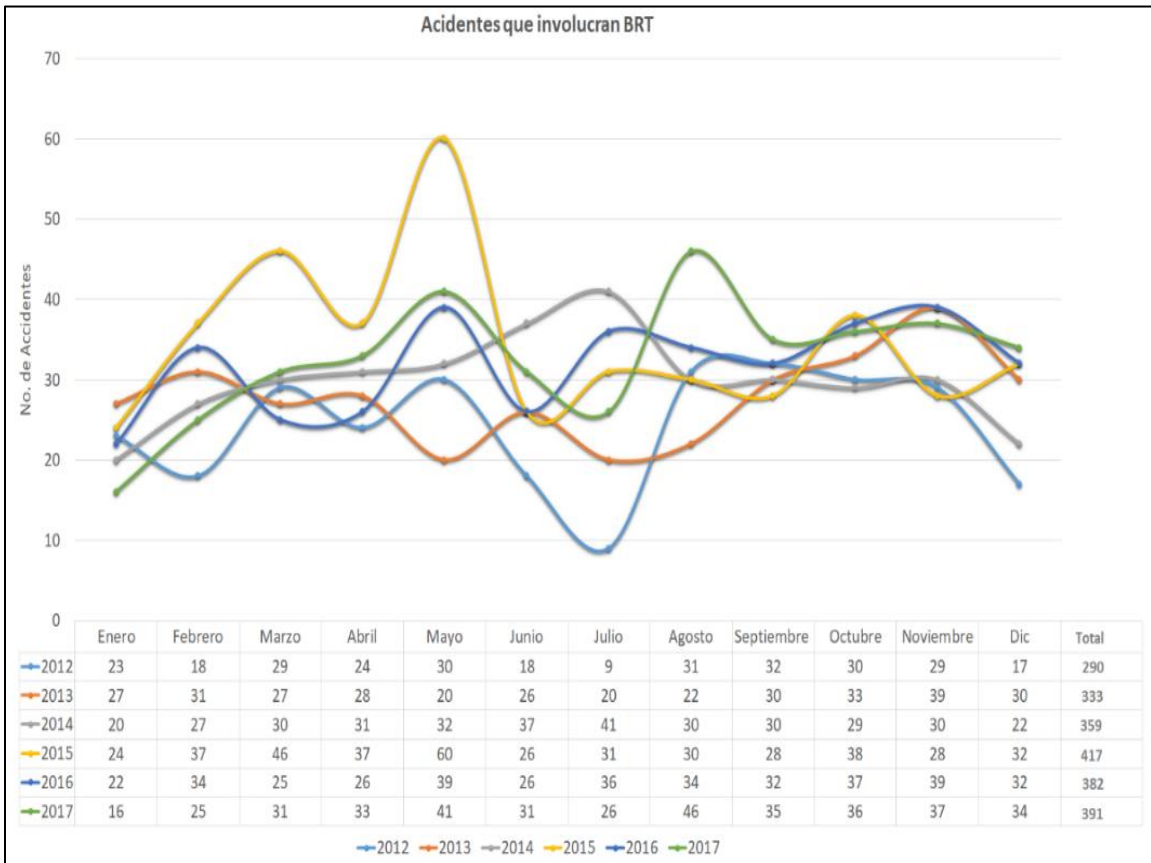


Figura 5. Cantidad de pasajeros lesionados en buses articulados y biarticulados.  
Fuente. Elaboración propia a partir de información de la Secretaría de Movilidad.

### 2.5.3 Accidentes Totales por Corredor

Los accidentes totales se discriminaron por trocales para el periodo estudio comprendido entre los años 2012 al 2017 en la figura 6, se puede observar que para todos los años la vía que más aporta accidentes al sistema es la avenida Caracas con un porcentaje del 22%, seguido de la avenida Américas con el 18% y el corredor Caracas sur Usme con el 13%, en el análisis muestra que el corredor con menores índices de accidentalidad es el de la avenida el Dorado.

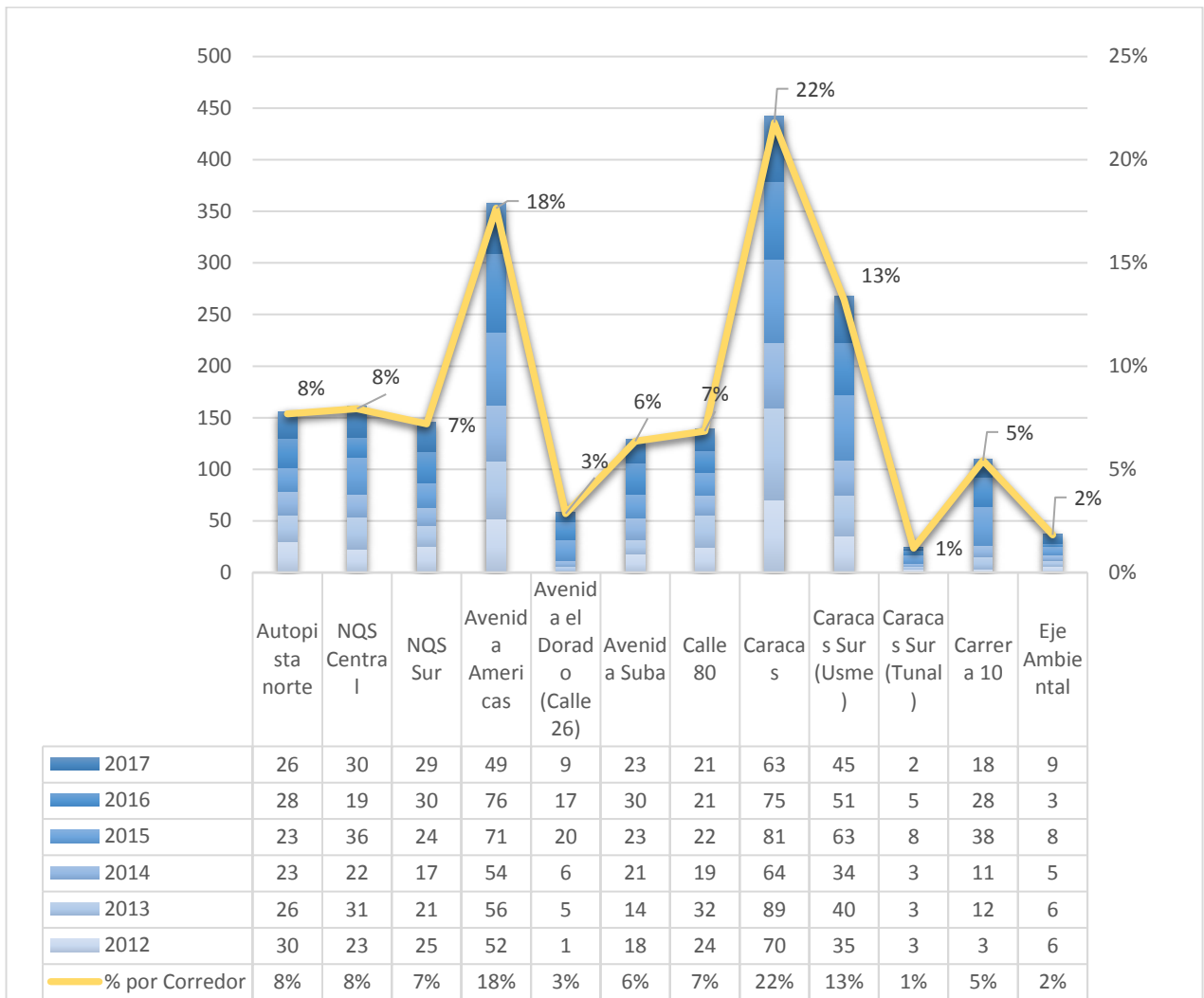


Figura 6. Porcentaje de Accidentes Totales entre 2012 a 2017 por Troncales de TransMilenio.  
Fuente. Elaboración propia a partir de información de la Secretaria de Movilidad.

## 2.5.4 Localización de Accidentes por Corredor

En la siguiente Figura 7, se observa la localización de los corredores con mayor accidentalidad en el sistema Transmilenio que son la Avenida Caracas, Avenida Américas y la Avenida Caracas Sur Usme.



Figura 7. Localización de accidentes en Troncales de Transmilenio  
Fuente. Elaboración propia a partir de GoogleEarth.

### 2.5.5 Accidentes Totales por Gravedad

Para los accidentes por gravedad se escogieron 3 categorías como se muestra en la figura 8. Los accidentes con heridos ocupan el 74% de todos los accidentes dentro entre el año 2012 a 2017. El corredor con mayor participación en este tipo de accidente es la avenida Caracas, el cual aporta un total de 364 accidentes dentro de la categoría de heridos para el periodo mencionado como se muestra en la figura 9.

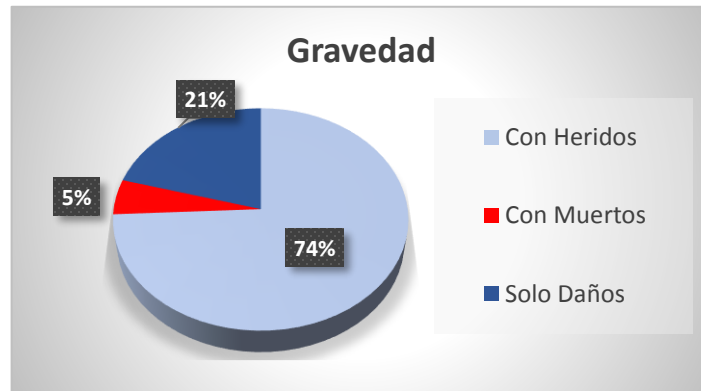


Figura 8. Porcentaje de Accidentes por Gravedad entre 2012 a 2017  
Fuente. Elaboración propia a partir de información de la Secretaria de Movilidad.

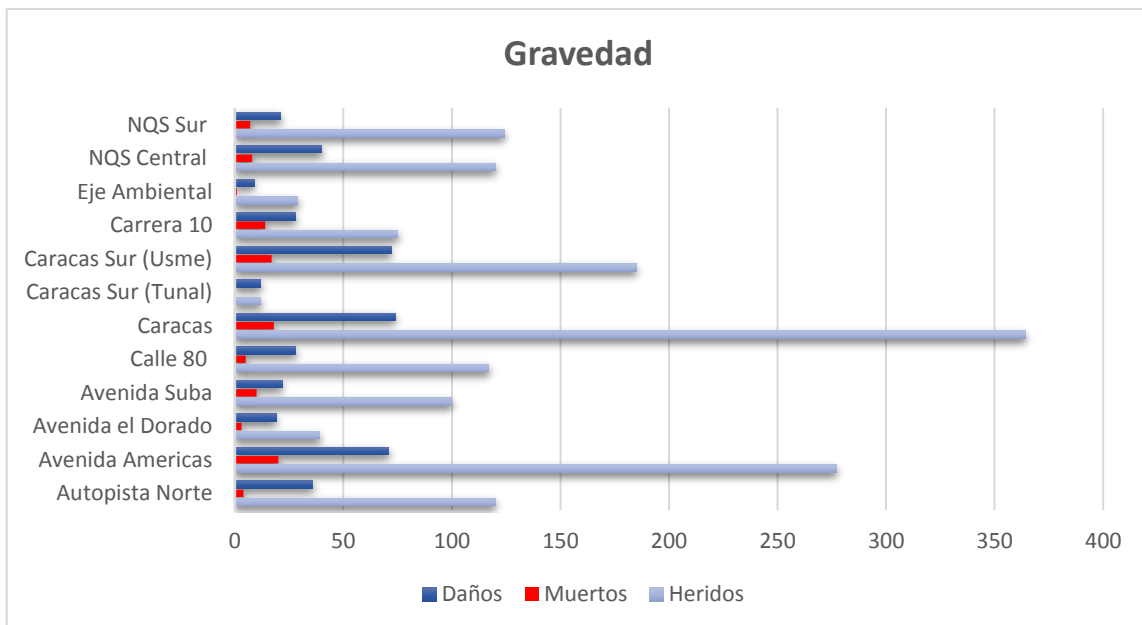


Figura 9. Accidentes por Gravedad entre 2012 a 2017 por Troncales de TransMilenio  
Fuente. Elaboración propia a partir de información de la Secretaria de Movilidad.

### 2.5.6 Accidentes Totales por Vehículo involucrado en colisión.

Los accidentes por colisión fueron segregados para el análisis de la siguiente manera: Para los vehículos se definen todos aquellos como (Automóvil, camioneta y campero) los camiones (Camión y furgón), motos (motocicleta), entre BRTs (bus articulado), servicio público (Bus, bus alimentador, buseta y microbús) y finalmente para otros vehículos las categorías son (Volqueta, tractocamión, maquinaria industrial, tracción animal y no identificados). Los porcentajes de acuerdo con estas categorías y la participación por corredor se muestran en las figuras 10 y 11 correspondientemente. Un total de 2172 accidentes están involucrados en colisiones con buses del sistema TransMilenio entre el periodo de 2012 al 2017.

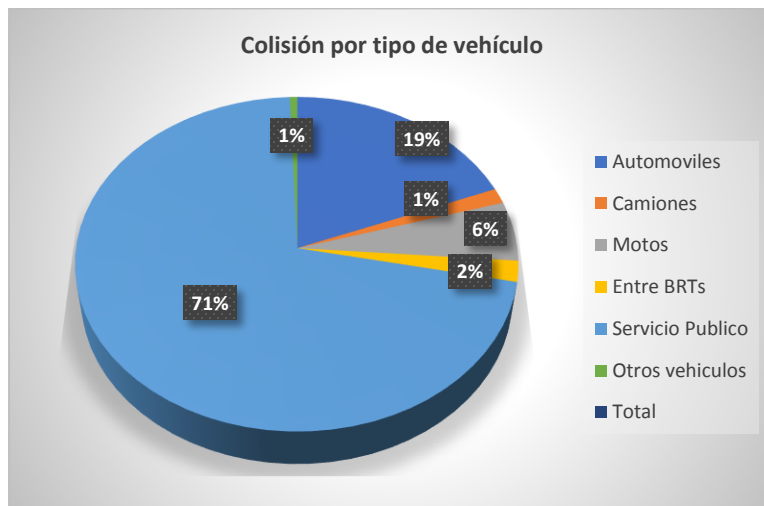


Figura 10. Porcentaje de Accidentes por colisión por tipo de vehículo entre 2012 a 2017  
Fuente. Elaboración propia a partir de información de la Secretaria de Movilidad

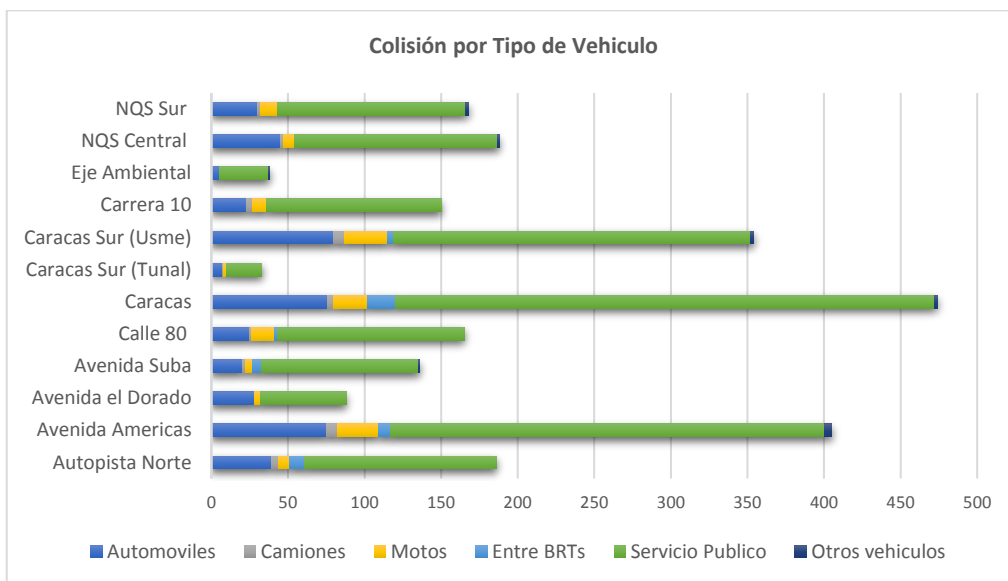


Figura 11. Porcentaje de Accidentes por colisión por tipo de vehículo entre 2012 a 2017  
Fuente. Elaboración propia a partir de información de la Secretaria de Movilidad

### 2.5.7 Accidentes Totales por Clase

Para los accidentes por clase se escogieron 4 categorías (ver figura 10), la clasificación tipo choque es la que presenta la mayor participación del 40%, dentro de la categoría definida como otro se encuentran los datos de autolesión, incendio y volcamiento. De acuerdo con la tendencia previamente manifestada en los otros análisis, el corredor con mayor participación es la avenida Caracas (figura 11). Este corredor aporta un total de 153 accidentes dentro de la categoría de choques en el periodo de estudio. El análisis para cada corredor se muestra en la figura 12.

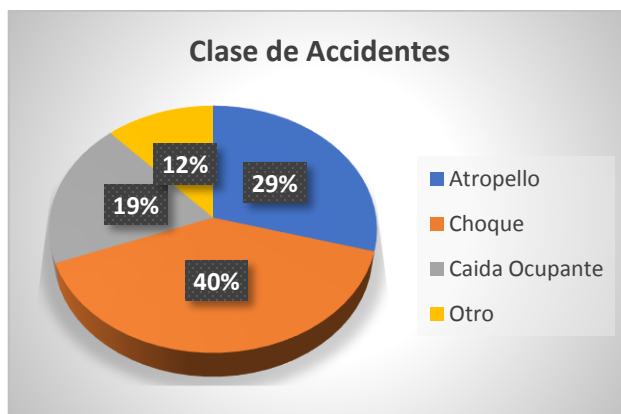


Figura 12. Porcentaje de Accidentes por clase entre 2012 a 2017  
Fuente. Elaboración propia a partir de información de la Secretaria de Movilidad

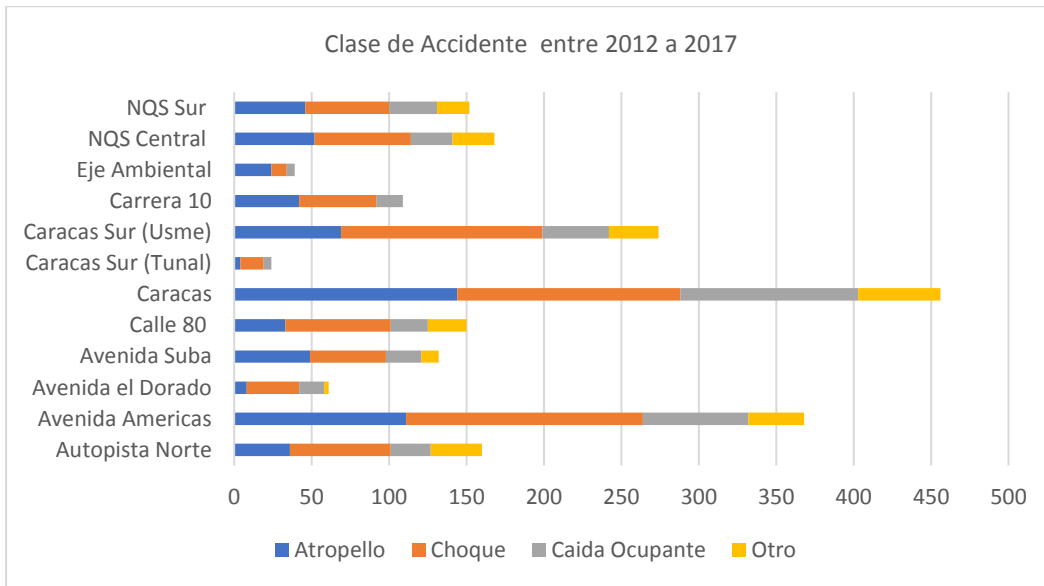


Figura 13. Accidentes por clase entre 2012 a 2017  
 Fuente. Elaboración propia a partir de información de la Secretaria de Movilidad

### 2.5.8 Accidentes Totales por tipo de Víctima

La figura 14 presenta las cuatro categorías por tipo de víctimas (Pasajero, Peatón, Ciclista, Conductor/acompañante). La clasificación de pasajero tiene una mayor relevancia con una participación del 62% y seguido del peatón con el 27%. El corredor con mayor aporte para las categorías es la de pasajeros en la avenida Caracas con un total de 372 accidentes, la participación de todos los corredores se muestra en la figura 15.

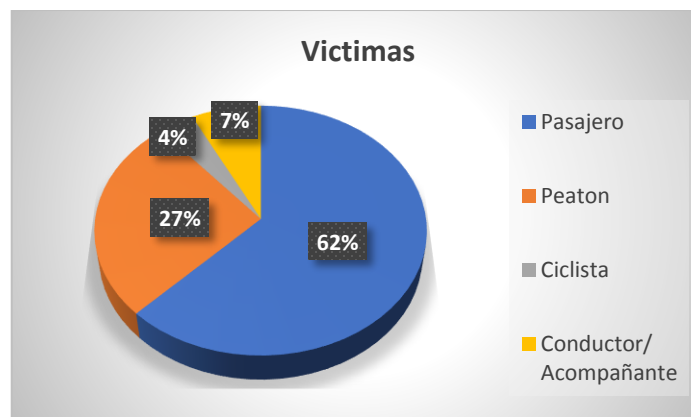


Figura 14. Porcentaje de Accidentes por clase entre 2012 a 2017  
 Fuente. Elaboración propia a partir de información de la Secretaria de Movilidad



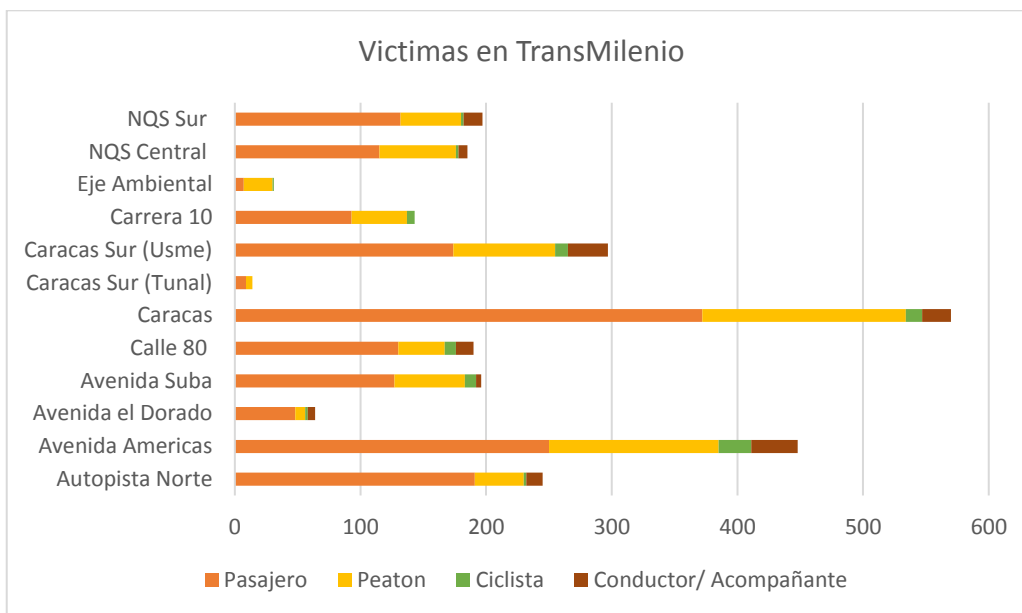


Figura 15. Accidentes Tipo de victima por Corredor entre 2012 a 2017  
Fuente. Elaboración propia a partir de información de la Secretaria de Movilidad

### 2.5.9 Edades de las personas involucradas en accidentes con BRT

Como se evidencia en la sesión anterior, la población más afectada por los accidentes con los buses del TransMilenio son los pasajeros. Una clasificación por rango de edades sin discriminar género (tanto hombres y mujeres) se muestra en la figura 16. Los valores presentados en la figura permiten identificar que las personas más vulnerables son de la tercera edad.

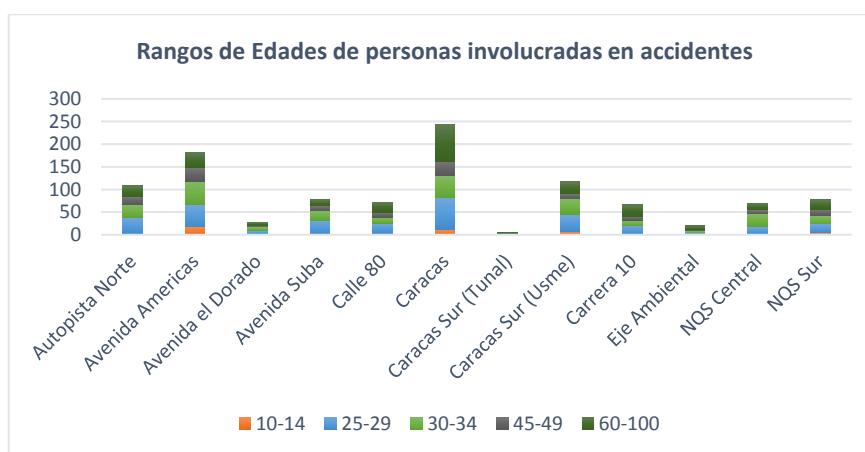


Figura 16. Rango de Edad de Lesionado en TransMilenio 2012 a 2017  
Fuente. Elaboración propia a partir de información de la Secretaria de Movilidad

### 2.5.10 Accidentes por colisión con objetos fijos

Los accidentes por colisión con objetos fijos se encuentran divididos en 6 categorías como indica en la figura 17. Los eventos categorizados de esta manera fueron recientemente incluidos en los reportes de accidentalidad y, por tanto, la información es reducida por lo tanto en el periodo de tiempo de 5 años (2012 a 2017), se reporta un promedio de 2 incidentes por año en todos los corredores.

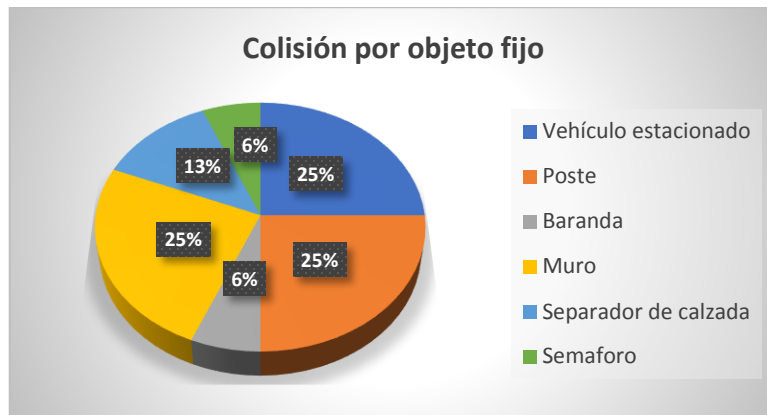


Figura 17. Accidentes de Buses por colisión con objetos fijos 2012 a 2017  
Fuente. Elaboración propia a partir de información de la Secretaria de Movilidad

## 2.6 Conclusiones y Recomendaciones Capítulo II

- El sistema de Transmilenio sólo se han construido 114.4 kilómetros, equivalente al 28% de lo esperado considerando que de acuerdo con lo establecido en el CONPES 3093 de 2000, el Distrito debía cubrir el 80% de los viajes de transporte público de la ciudad en el año 2016 equivalente a construir 388 kilómetros de Troncales para para el sistema. Este retraso de la construcción de las troncales ha llevado al deterioro la infraestructura de la ciudad.
- Los accidentes reportados en este capítulo son aquellos que involucran los buses articulados y biarticulados del Transmilenio. Un total de 2172 accidentes entre 2012 al 2017 fueron identificados en las bases de datos de accidentalidad suministradas

por la Secretaria de Movilidad de Bogotá. El sistema se está colapsando debido al incremento de la demanda por su uso, lo que puede asociarse como una de las principales causas del incremento de la accidentalidad desde su establecimiento en la ciudad.

- Los accidentes reportados por troncal evidencia que el corredor con mayor porcentaje de accidentalidad es la avenida Caracas, donde los heridos cuentan el 74% en la categoría de gravedad y los siniestros para el periodo de estudio son del 5%. En cuanto a las colisiones por tipos de vehiculó, el mayor porcentaje se encuentra en eventos entre vehículos del servicio público, seguido de los automóviles. El choque es el tipo de accidente más común con una participación del 40% y la mayor parte de las víctimas son los pasajeros de la tercera edad (es decir, los más vulnerables dentro del sistema).
- Las cifras que se reportaron en este capítulo fueron obtenidas a partir del procesamiento de las bases de datos de accidentalidad suministradas por la secretaria de Movilidad de la ciudad de Bogotá, base en la que se fundamenta todos los desarrollos que se presentan a lo largo de este trabajo.
- Las cifras de accidentes reportadas en este capítulo son preocupantes, por lo que se deberían implementar medidas que ayudaran a reducir los índices de accidentalidad, por ejemplo, basadas en las metodologías utilizadas en el manual de seguridad vial de AASTHO 2010 como se presenta en esta investigación.

## Capítulo III

### Método Predictivo del Manual HSM 2010 para Vías Urbanas y Sub Urbanas

En esta sección se describe el procedimiento de estimación de la seguridad vial planteado en el “Highway Safety Manual” (Manual de Seguridad Vial) norteamericano, para vías urbanas y suburbanas. Inicialmente se realiza una descripción general de la metodología de estimación y se continúa con la secuencia del procedimiento de estimación para el caso específico de vías urbanas y suburbanas. El análisis de seguridad para vías urbanas y suburbanas difiere notablemente de los otros dos métodos predictivos establecidos para vías rurales (método predictivo de la seguridad vial aplicado para carreteras rurales de dos carriles y rurales multicarril), ya que considera los accidentes de vehículos con peatones y ciclistas, tanto en las intersecciones y como en los segmentos viales.

#### **3.1 Resumen de la metodología general de predicción del Capítulo 12 del HSM.**

El HSM plantea una metodología que combinando los datos históricos de accidentes ocurridos en cierta infraestructura con el análisis de modelos de regresión de accidentes, estudios de accidentalidad “antes – después” y experiencias de profesionales en el tema para estimar la seguridad de una vía o sistema de vías en particular (Baamonde & Pérez 2013).

El análisis puede ser realizado sobre un elemento de la carretera (tramo de vía y/o intersección) o para la red completa. De esta manera se estima la frecuencia anual esperada de accidentes considerando las implicaciones del diseño geométrico y las medidas de control de tránsito que son incluidas a través de los Factores de Modificación de Accidentes (CMFs) y finalmente se realiza la calibración para llevar las Funciones de Rendimiento de la Seguridad (SPFs) a las condiciones locales.

El proceso de predicción se puede definir de la siguiente manera:

- i. Seleccionar el segmento de vía o intersección que se pretende evaluar.
- ii. Evaluar un Modelo Preliminar Base existente, el cual se basa en una distribución binomial negativa. Estos modelos son también llamados en el HSM como Funciones de Rendimiento de la Seguridad (SPFs).
- iii. Al Modelo Base evaluado es calibrado para ser implementado en las condiciones locales mediante un factor de calibración.
- iv. Se aplican las consecuencias en la seguridad vial de cada elemento del diseño geométrico y/o control de tráfico que presenta el elemento evaluado mediante la multiplicación por los respectivos Factores de Modificación de Accidentes (CMFs) asociados a cada característica.
- v. Evaluar el modelo con todos los ajustes previamente mencionados para estimar la frecuencia de accidentes y la distribución tanto por gravedad como por tipo de colisión.
- vi. Finalmente se realiza el análisis de los resultados de la estimación.

El proceso para a estimación de accidentes se determina mediante la siguiente ecuación (HSM 2010):

$$N_{predic} = (N_{Spf\ x} * (CMF_{1x} * CMF_{2x} * \dots * CMF_{yx}) + N_{peat\ x} + N_{bici}) * C_x ;$$

(Ec.3.2-1)

Donde,

- $N_{predic}$  = número de frecuencia media de accidentes para un lugar de estudio de la carretera en un año específico (accidentes/año).

- $N_{SPF\ x}$  = número de frecuencia media de accidentes para condiciones “base” SPF desarrolladas para el lugar.
- $N_{peat\ x}$  = número de frecuencia media de accidentes para para peatones en el lugar de estudio.
- $N_{bici}$  = número de frecuencia media de accidentes para para bicicletas en el lugar de estudio.
- $CMF_{1x} * CMF_{2x}$  = Factores de modificación de accidentes específicos para los segmentos de carretera vías.
- $C_x$  = Factor de calibración de ajuste a condiciones locales para el lugar.

La metodología ilustrada en el manual permite estimar tanto la seguridad en una vía existente o su proyección bajo las condiciones existentes o esperadas a futuro (ejemplo, bajo el volumen de tráfico futuro) y se encuentra dividido en tres situaciones de la vía: vías rurales de dos carriles, vías rurales multicarril y, arterias urbanas y suburbanas. El HSM 2010. Proporciona modelos de estimaciones sobre la gravedad del accidente y de las distribuciones de tipo colisión para los segmentos viales y las intersecciones. Los SPF están desarrolladas para el tipo de gravedad en un accidente y lo divide en dos categorías fatales y toda clase de lesiones, la severidad de estos se da en proporciones relativas segregadas de acuerdo a la severidad.

### **3.2 Pasos del método predictivo para las arterias urbanas y suburbanas**

La primera parte del método predictivo se centra en obtener los datos de entrada requeridos para aplicar el modelo predictivo. El método predictivo proporciona un procedimiento de 18 pasos para estimar la "frecuencia de colisión promedio esperada",  $N_{expected}$  (por lesiones totales, gravedad del accidente o tipo de colisión) de una red vial, corredor o sitio. En el método predictivo, la calzada se divide en sitios individuales, que son segmentos homogéneos de calzada e intersecciones.

### 3.2.1 Subdivisión de una vía Urbana y Suburbana

Antes de aplicar el método predictivo a una infraestructura de al corredor de vía urbana o en fase de estudio, ésta debe ser dividida en secciones individuales para su estudio cada tramo de vía de debe compartir las mismas características iguales o similares en geometría y operación al igual que las intersecciones. Los tramos de vía comienzan en el centro de una intersección y terminan en el centro de la siguiente intersección o donde hay un cambio de un tramo de carretera homogéneo a otro tramo homogéneo. El segmento de la carretera el modelo estima la frecuencia de accidentes relacionados con el segmento de la carretera que ocurren en la Región B en la Figura 18. Cuando un segmento de carretera comienza o termina en una intersección, la longitud del segmento de carretera se mide desde el centro de la intersección.

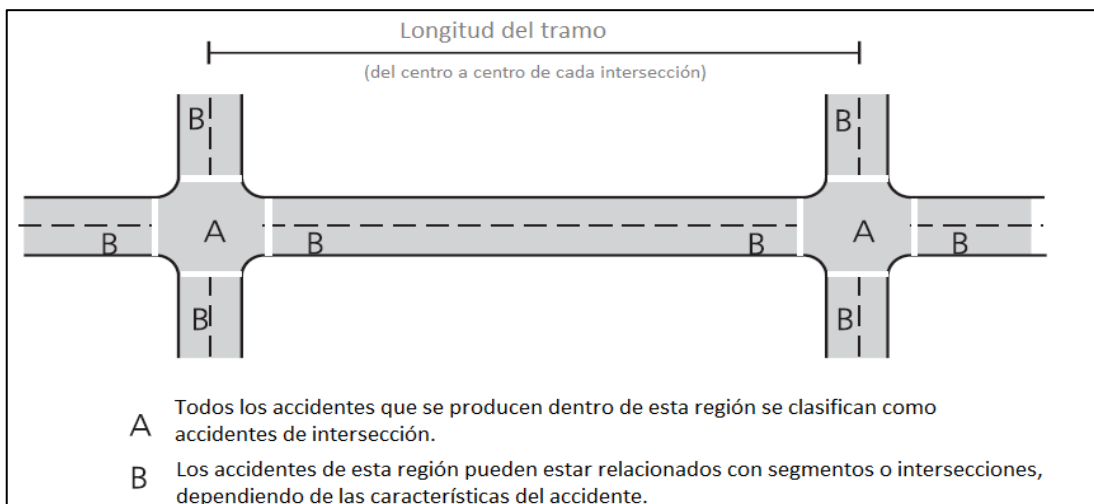


Figura 18. Definición de Tramo de vía o Intersección.  
Fuente. HSM 2010 Capítulo 12.

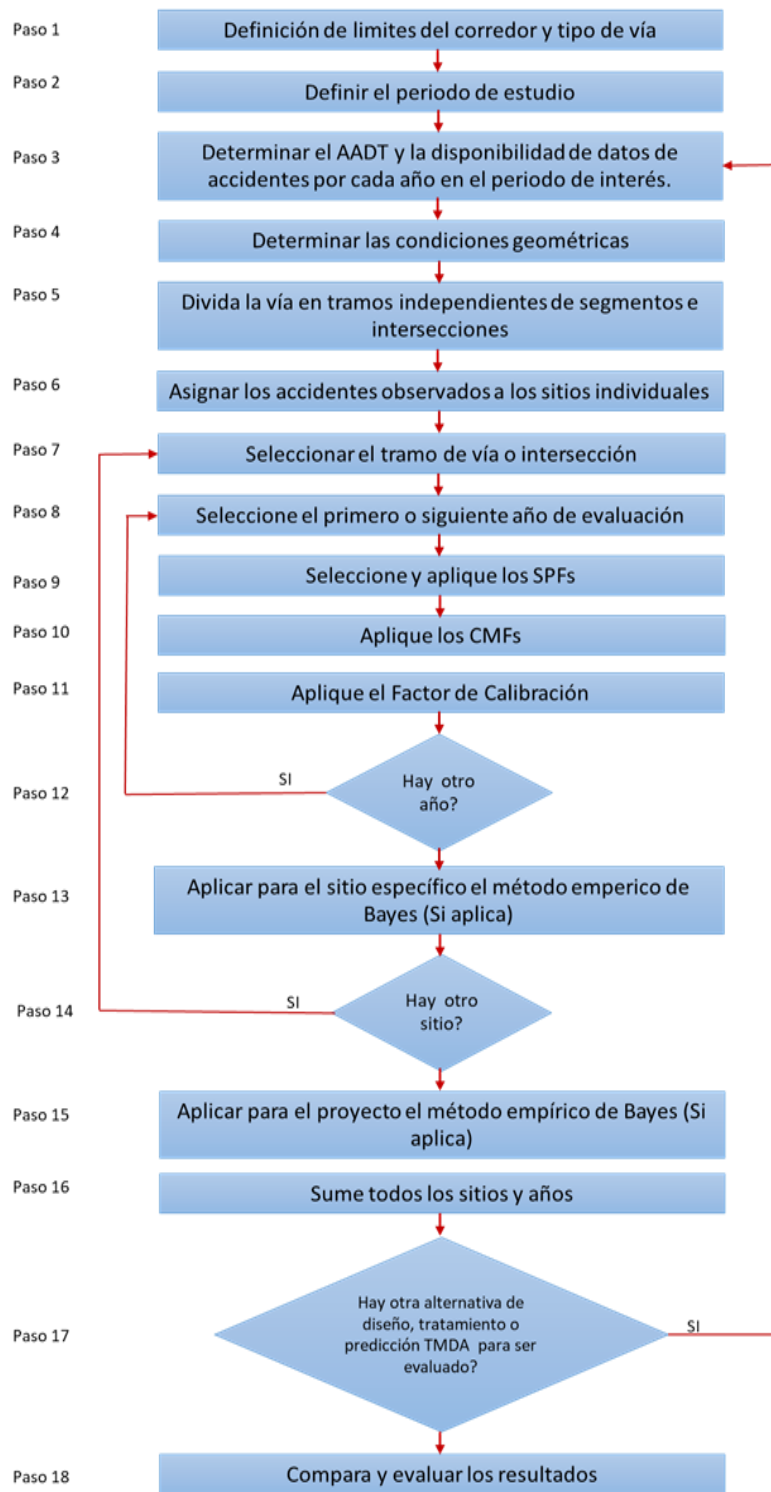


Figura 19. Pasos del Método Predictivo HSM Capitulo 12  
Fuente. HSM 2010 Capitulo 12.



### 3.3 Estructura para desarrollar los pasos del modelo predictivo de Vías Urbanas y Suburbanas

El procedimiento predictivo para vías urbanas y suburbanas tiene en cuenta los tramos de una vía los cuales las divide en 3 categorías y 4 para las intersecciones (ver tabla 2), a la vez se implementa un método que combina los resultados tanto de tramos como intersecciones y permite obtener un estimado para un segmento completo de la zona estudiada.

De acuerdo con lo estipulado en el procedimiento de estimación de accidentes, tanto el modelo matemático para segmentos de carretera como la de intersecciones se componen de dos elementos principales: un modelo base y los factores de modificación de accidentes, a este modelo matemático finalmente se le debe adicionar un factor de calibración que adapte el mismo a las condiciones específicas de la zona de estudio. El capítulo 12 del HSM 2010, considera modelos predictivos separados para los tramos de la calzada y para las intersecciones.

Tabla 2. Categorías de Tramos e Intersecciones para Vías Urbanas y Suburbanas HSM 2010

<b>Tipo de Tramos</b>	
2U	2 carriles, 1 en cada dirección sin separador
4U	4 carriles, 2 en cada dirección sin separador
<b>4D</b>	<b>4 carriles, 2 en cada dirección con separador</b>
<b>Tipo de intersección</b>	
3ST	Intersección de tres ramas sin señalización (señal de pare para la calle secundaria)
<b>3SG</b>	<b>Intersección de tres ramas con señalización</b>
4ST	Intersección de cuatro ramas sin señalización (señal de pare para la calle secundaria)
<b>4SG</b>	<b>Intersección de cuatro ramas con señalización</b>

Fuente. Elaboración Propia

#### 3.3.1 Distribución por tipo de colisión

Para la aplicación del método predictivo de vías urbanas y suburbanas se debe realizar un consolidado con la distribución por tipo de colisión (es decir, cantidad de accidentes de

tránsito en función de su gravedad), en cualquiera de los dos escenarios (tramos o intersecciones), se debe tener la información requerida para la aplicación de funciones de desempeño de la seguridad (condiciones geométricas y operaciones de los sitios de estudio) y, aplicarlos por tipo de accidente y nivel de gravedad como se indica en la tabla 3.

Tabla 3. Distribución del Tipo de Accidentes por Nivel de Gravedad.

<b>Accidente</b>	<b>Nivel de Gravedad</b>
Múltiples vehículos	(1) Heridos y Muertos, (2) Solo daños y (3) Totales
Solo Vehículo	
Peatones	
Bicicletas	

Fuente. Elaboración Propia

### 3.3.2 Modelo base SPFs

El modelo de predicción de accidentes se le llama condiciones “base” a la situación y/o magnitud de las características geométricas y de control de tránsito de los sitios que fueron utilizados para realizar los modelos de regresión de las SPFs. Para una vía tipo BRT, por ejemplo, algunas de las condiciones “base” son un ancho de carril de 3,65 m, la longitud del segmento y la densidad de accesos de la vía, entre otras. Las intersecciones, así como los segmentos de vía, responden a condiciones “base” distintas. Los sitios bajo análisis rara vez presentarán estas condiciones “base”, por ello, mediante los CMFs se “ajustan” los modelos predictivos a las condiciones dadas. Cabe notar que las condiciones “base” no representan de modo alguno las condiciones de la infraestructura “más seguras” o “mejores”. Simplemente responden a las características de sitios similares en base a los cuales se elaboraron las SPFs.

### 3.3.3 Factores Modificación de Accidentes (CMFs)

El diseño geométrico y los elementos de control de tráfico generan cambios en el comportamiento de la accidentalidad en determinada infraestructura. Para tener en cuenta esto dentro el modelo del HSM se emplean unos factores que multiplican al modelo y que

son llamados CMFs. En el caso que el modelo del HSM tenga la misma característica el CMF para dicha característica es de 1.00; si los estudios han demostrado que la condición de la vía en estudio genera más accidentes se usará un CMF mayor a 1.00, por el contrario, si la medida que presenta la vía genera una reducción en la accidentalidad, el valor que toma el CMF es menor a 1.00.

#### **3.3.4 Calibración de la metodología a las condiciones locales**

La metodología planteada aplica para cualquier tipo de vía, sin embargo, es sabido que la frecuencia anual de accidentes, es muy variable entre una zona y otra, incluso para segmentos e intersecciones de vías que comparten características similares. Las funciones de desempeño de la seguridad SPFs en el HSM del 2010 de la AASHTO menciona que muchos de los factores que afectan la seguridad son exclusivos de la localidad y, por lo tanto, recomienda que los SPFs de HSM se calibren para representar de forma adecuada las condiciones específicas.

Las condiciones locales y/o geográficas son consideradas en tanto a través del factor de calibración de accidentes de tránsito estimados (Cr). De acuerdo con el manual HSM estas deben ser obtenidas mediante una muestra entre 30 y 50 sitios que sumen cerca de 100 accidentes por año, cumplan unos requerimientos de longitud mínima y reúnan adecuadamente las condiciones físicas, operativas y de seguridad de la zona de estudio. Si las condiciones topográficas y/o climáticas son muy diferentes dentro de la zona de estudio, se recomienda estimar el factor de calibración para cada una de estas condiciones por separado.

#### **3.4 Modelo predictivo de Tramos para vías urbanas y suburbanas**

Los modelos predictivos se pueden utilizar para estimar los accidentes promedio totales (es decir, todas las severidades de choque y tipos de colisión) o ser utilizado para predecir la frecuencia media de los tipos específicos de gravedad del accidente o los tipos de colisión específicos. El modelo predictivo para un segmento o intersección vial individual combina el SPF, CMFs, y un factor de calibración.

La frecuencia promedio de accidentes de tránsito esperados para condiciones base para vías urbanas y suburbanas incluye la influencia del volumen de tránsito en la frecuencia de accidentes y es calculada mediante:

$$N_{predic rs} = C_r (N_{br} + N_{peat} + N_{bici}); \text{ (Ec:3.5-1)}$$

$$N_{br} = N_{Spf rs} * (CMF_{1r} * CMF_{2r} * \dots * CMF_{nr}); \text{ (Ec:3.5-2)}$$

Donde,

- $N_{predic rs}$  = Número de frecuencia media de accidentes para un tramo de vía de la carretera en un año específico
- $N_{br}$  = número de frecuencia media de accidentes para un tramo de vía de la carretera en un año específico (excluyendo accidentes entre vehículo-peatones y vehículo y bicicleta).
- $N_{Spf rs}$  = número de frecuencia media de accidentes para condiciones “base” SPF desarrolladas tramo de vía (excluyendo accidentes entre vehículo-peatones y vehículo y bicicleta).
- $N_{peat}$  = número de frecuencia media de accidentes para para peatones para un tramo de vía.
- $N_{bici}$  = número de frecuencia media de accidentes para para bicicletas para un tramo de vía.
- $CMF_{1x} * CMF_{2x}$  = Factores de modificación de accidentes específicos para los tramos de vía; y
- $C_x$  = Factor de calibración de ajuste a condiciones locales para un tramo de vía en área en particular.

La ecuación (Ec:3.5-1) muestra que la frecuencia de accidentes para tramos de una vía se estima como la suma de tres componentes:  $N_{br}$ ,  $N_{peat}$ , y  $N_{bici}$ . La siguiente ecuación muestra

que la porción SPF de  $N_{br}$ , designada como  $N_{spf\ rs}$ , se separa aún más en tres componentes por tipo de colisión se muestran en la ecuación (Ec:3.5-3).

$$N_{spf\ rs} = N_{brmv} + N_{brsv}; \text{ (Ec:3.5-3).}$$

Donde,

- $N_{brmv}$  = número de frecuencia media de accidentes para para una intersección de la carretera para múltiples vehículos.
- $N_{brsv}$  = número de frecuencia media de accidentes para una intersección de la carretera para un solo vehículo.

#### 3.4.1 Accidentes de Múltiples Vehículos (mv) y Un solo Vehículo(sv)

- Predecir la frecuencia de accidentes para la condición base

$$N_{brmv} = e^{a+b*\ln(AADT)+\ln(L)}; \text{ (Ec:3.5-4)}$$

Donde,

- $N_{brmv/sv}$  = Frecuencia promedio de accidentes de tránsito esperados para condiciones base para un tramo de vía.
- $AADT$  = Transito promedio diario anual.
- $L$  = Longitud del tramo de vía en millas, y
- $a, b$  = Coeficientes de egresión.

Tabla 4. Coeficientes de regresión para Múltiples vehículos para Tramos de Vía

Tipo de Vía	Intercepto	AADT	Parámetro Sobre dispersión
	(a)	(b)	(k)
<b>Accidentes Totales</b>			
4D	-12.34	1.36	1.32
<b>Accidentes con Muertos y Heridos</b>			
4D	-12.76	1.28	1.31
<b>Accidentes de solo daños</b>			
4D	-12.81	1.38	1.34

Fuente. Adaptado Tabla 12-3 HSM 2010

Tabla 5. Coeficientes de regresión para un solo vehículo

Tipo de Vía	Intercepto	AADT	Parámetro Sobre dispersión
	(a)	(b)	(k)
<b>Accidentes Totales</b>			
4D	-5.05	0.47	0.86
<b>Accidentes con Muertos y Heridos</b>			
4D	-8.71	0.66	0.28
<b>Accidentes de solo daños</b>			
4D	-5.04	0.45	1.06

Fuente. Adaptado Tabla 12-5 HSM 2010

- Predecir la frecuencia de accidentes para la condición base con el ajuste para que la suma de accidentes compuestos de muertos y heridos más solo daños sea igual al total de accidentes así:

$$N_{brmv/sv(MH)} = N_{brmv(TOTAL)} \left( \frac{N'_{brmv(HM)}}{N'_{brmv(HM)} + N'_{brmv(SD)}} \right); \text{ (Ec:3.5-5)}$$

Donde,

- $N_{brmv/sv(MH)}$  = Frecuencia de accidentes ajustada de vehículos múltiples o solo vehículo que involucran muertos heridos.
- $N_{brmv/sv(TOTAL)}$  = Frecuencia de accidentes de múltiples o solo vehículo que involucran todo el tipo de accidente.
- $N'_{brmv/sv(MH)}$  = Frecuencia de accidentes sin ajuste de vehículos múltiples o solo vehículo que involucran muertos heridos.

- $N'_{brmv/sv (SD)}$  = Frecuencia de accidentes sin ajuste de vehículos múltiples o solo vehículo que involucran solo daños.
- Predecir la frecuencia de accidentes para la condición base con el ajuste para que solo daños la diferencia de Frecuencia de accidentes de múltiples o solo vehículo que involucran todo el tipo de accidente ( $N_{brmv/sv (TOTAL)}$ ) y la Frecuencia de accidentes ajustada de vehículos múltiples o solo vehículo que involucran muertos heridos ( $N_{brmv/sv (MH)}$ ) así:

$$N'_{brmv/sv (SD)} = N_{brmv/sv (SD)} - (N_{brmv/sv (MH)}) ; \text{(Ec:3.5-6)}$$

Donde,

- $N_{brmv/sv (SD)}$  = Frecuencia de accidentes ajustada de vehículos múltiples o solo vehículo que involucran solo daños.
- $N_{brmv/sv (TOTAL)}$  = Frecuencia de accidentes de múltiples o solo vehículo que involucran todo el tipo de accidente.
- $N'_{brmv/sv (MH)}$  = Frecuencia de accidentes sin ajuste de vehículos múltiples o solo vehículo que involucran muertos heridos.

Tabla 6. Factor de Ajuste por tipo de Colisión Tramos para Múltiples vehículos

Proporción de bloqueos por nivel de severidad para tipos de carretera específicos		
4D		
Tipo de Colisión	F Heridos	F Daños
Colisión Trasera	0.832	0.662
Colisión Frontal	0.02	0.007
Angulo de Colisión	0.04	0.036
Colisión Lateral misma dirección	0.05	0.223
Colisión Lateral opuesta dirección	0.01	0.001
Colisión de Multiple vehiculos	0.048	0.071

Fuente. Adaptado Tabla 12-4 HSM 2010

Tabla 7. Factor de Ajuste por tipo de Colisión en Tramos para un solo Vehículos

Proporción de bloqueos por nivel de severidad para tipos de carretera específicos		
4D		
Tipo de Colisión	F Heridos	F Daños
Colisión con Animal	0.001	0.063
Colisión con Objeto fijo	0.5	0.813
Colisión con otro objeto	0.028	0.016
Otra colisión de un solo vehículo	0.471	0.108

Fuente. Adaptado Tabla 12-6 HSM 2010

### 3.4.2 Accidentes de Vehículos con Peatones para Tramos

- El número de accidentes de vehículos con peatones para tramos de vía se estima de la siguiente manera:

$$N_{peat} = N'_{br} * f_{peat}; \text{ (Ec.3.5-7)}$$

Donde,

- $N_{br}$  = Número de frecuencia media de accidentes para un tramo de vía de la carretera en un año específico.
- $f_{peat}$  = Frecuencia de accidentes ajustada para peatones.

Tabla 8. Factor de ajuste para accidentes con peatones

Factor de Ajuste del Choque Peatonal ( $f_{peat}$ )		
Tipo de Vía	Velocidad permitida inferior a 30 mph	Velocidad permitida mayor a 30 mph
4D	0.067	0.019

Fuente. Datos de HSIS para Washington (2002-2006)

Nota: Estos factores se aplican a la metodología para predecir los bloqueos totales (todos los niveles de gravedad combinados). Todos los accidentes peatonales resultantes de este factor de ajuste se tratan como colisiones muertos y heridos y ninguno como bloqueos de daños solo a la propiedad.



### 3.4.3 Accidentes de Vehículos Bicicletas para Tramos

- El número de accidentes de vehículos con bicicletas para tramos de vía se estima de la siguiente manera:

$$N_{bici} = N'_{br} * f_{bici}; (Ec:3.5-8)$$

Donde,

- $N_{br}$  = Número de frecuencia media de accidentes para un tramo de vía de la carretera en un año específico.
- $f_{bici}$  = Frecuencia de accidentes ajustada para bicicleta.

Tabla 9. Factor de ajuste para accidentes con bicicleta en Intersecciones

Factor de Ajuste del Choque Peatonal ( $f_{bici}$ )		
Tipo de Vía	Velocidad permitida inferior a 30 mph	Velocidad permitida mayor a 30 mph
4D	0.013	0.005

Fuente. Adaptado Tabla 12-9 HSM 2010

### 3.5 Modelo predictivo de Intersecciones para vías urbanas y suburbanas.

Los modelos predictivos para las intersecciones estiman la frecuencia promedio total pronosticada de choque incluyendo aquellos accidentes que ocurren dentro de los límites de una intersección y son el resultado de la presencia de la intersección. El modelo predictivo para una intersección arterial urbana o suburbana se da por

$$N_{predic\ Int} = C_r (N_{bi} + N_{peat} + N_{bici}); (Ec:3.6-1)$$

$$N_{bi} = N_{Spf\ int} * (CMF_{1i} * CMF_{2i} * \dots * CMF_{ni}); (Ec:3.6-2)$$

Donde,

- $N_{predic\ Int}$  = número de frecuencia media de accidentes para una intersección de la carretera en un año específico
- $N_{bi}$  = número de frecuencia media de accidentes para un para una intersección de la carretera en un año específico (excluyendo accidentes entre vehículo-peatones y vehículo y bicicleta).
- $N_{Spf\ rs}$  = número de frecuencia media de accidentes para condiciones “base” SPF desarrolladas para una intersección (excluyendo accidentes entre vehículo-peatones y vehículo y bicicleta).
- $N_{peat}$  = número de frecuencia media de accidentes para para peatones para una intersección.
- $N_{bici}$  = número de frecuencia media de accidentes para para bicicletas para una intersección
- $CMF_{1x} * CMF_{2x}$  = Factores de modificación de accidentes específicos para una intersección; y
- $C_x$  = Factor de calibración de ajuste a condiciones locales para una intersección en un área en particular.

La ecuación (Ec:3.6-1) muestra que la frecuencia de accidentes para intersección se estima como la suma de tres componentes:  $N_{br}$ ,  $N_{peat}$ , y  $N_{bici}$ . La siguiente ecuación muestra que la porción SPF de  $N_{br}$ , designada como  $N_{spf\ int}$ , se separa aún más en tres componentes por tipo de colisión se muestran en la ecuación (Ec:3.6-3).

$$N_{Spf\ int} = N_{bimv} + N_{bisv}; \text{ (Ec:3.6-3).}$$

- $N_{bimv}$  = número de frecuencia media de accidentes para para una intersección de la carretera para múltiples vehículos.

- $N_{bisv}$  = número de frecuencia media de accidentes para una intersección de la carretera para un solo vehículo.

### 3.5.1 Accidentes de Múltiples Vehículos (mv) y Un solo Vehículo(sv)

- Predecir la frecuencia de accidentes para la condición base

$$N_{bimv/sv} = e^{a+b*\ln(AADT_{ppal})+c*\ln(AADT_{secu})}; \text{ (Ec:3.6-4)}$$

Donde,

- $N_{brmv/sv}$  = Frecuencia promedio de accidentes de tránsito esperados para condiciones base para una intersección.
- $AADT_{ppal}$  = Volumen de tráfico diario promedio (vehículos / día) para la carretera principal (ambas direcciones de viaje combinadas)
- $AADT_{secu}$  = volumen de tráfico diario promedio (vehículos / día) para carretera secundaria (ambas direcciones de viaje combinadas); y
- $a, b, c$  = Coeficientes de regresión.

Tabla 10. Coeficientes de regresión para Intersección para Múltiples vehículos

Tipo de Intersección	Intercepto	AADT (ppal)	AADT (secu)	Parámetro Sobre dispersión
	(a)	(b)	(c)	(k)
<b>Accidentes Totales</b>				
3SG	-12.13	1.11	0.26	0.33
4SG	-10.99	1.07	0.23	0.39
<b>Accidentes con Muertos y Heridos</b>				
3SG	-11.58	1.02	0.17	0.30
4SG	-13.14	1.18	0.22	0.33
<b>Accidentes de solo daños</b>				
3SG	-13.24	1.14	0.30	0.36
4SG	-11.02	1.02	0.24	0.44

Fuente. Adaptado Tabla 12-10 HSM 2010

Tabla 11. Coeficientes de regresión para Intersección para un solo vehículo

Tipo de Intersección	Intercepto	AADT (ppal)	AADT (secu)	Parámetro Sobre dispersión
	(a)	(b)	(c)	(k)
<b>Accidentes Totales</b>				
3SG	-9.02	0.42	0.40	0.36
4SG	-10.21	0.68	0.27	0.36
<b>Accidentes con Muertos y Heridos</b>				
3SG	-9.75	0.27	0.51	0.24
4SG	-9.25	0.43	0.29	0.09
<b>Accidentes de solo daños</b>				
3SG	-9.08	0.45	0.33	0.53
4SG	-11.34	0.78	0.25	0.44

Fuente. Adaptado Tabla 12-11 HSM 2010

- Predecir la frecuencia de accidentes para la condición base con el ajuste para que la suma de accidentes compuestos de muertos y heridos más solo daños sea igual al total de accidentes así:

$$N_{bimv/sv(MH)} = N_{bimv(TOTAL)} \left( \frac{N'_{bimv/sv(HM)}}{N'_{bimv/sv(HM)} + N'_{bimv/sv(SD)}} \right); \text{ (Ec:3.6-5)}$$

Donde,

- $N_{bimv/sv(MH)}$  = Frecuencia de accidentes ajustada de vehículos múltiples o solo vehículo que involucran muertos heridos.
- $N_{bimv/sv(TOTAL)}$  = Frecuencia de accidentes de múltiples o solo vehículo que involucran todo el tipo de accidente.
- $N'_{bimv/sv(MH)}$  = Frecuencia de accidentes sin ajuste de vehículos múltiples o solo vehículo que involucran muertos heridos.
- $N'_{bimv/sv(SD)}$  = Frecuencia de accidentes sin ajuste de vehículos múltiples o solo vehículo que involucran solo daños.

- Predecir la frecuencia de accidentes para la condición base con el ajuste para que solo daños la diferencia de Frecuencia de accidentes de múltiples o solo vehículo que involucran todo el tipo de accidente ( $N_{bimv/sv(TOTAL)}$ ) y la Frecuencia de accidentes ajustada de vehículos múltiples o solo vehículo que involucran muertos heridos ( $N_{bimv/sv(MH)}$ ) así:

$$N'_{bimv/sv(SD)} = N_{bimv/sv(SD)} - N_{bimv/sv(MH)} ; \text{ (Ec:3.6-6)}$$

Donde,

- $N_{bimv/sv(SD)}$  = Frecuencia de accidentes ajustada de vehículos múltiples o solo vehículo que involucran solo daños.
- $N_{bimv/sv(TOTAL)}$  = Frecuencia de accidentes de múltiples o solo vehículo que involucran todo el tipo de accidente.
- $N'_{bimv/sv(MH)}$  = Frecuencia de accidentes sin ajuste de vehículos múltiples o solo vehículo que involucran muertos heridos.

Tabla 12. Factor de Ajuste por tipo de Colisión en Intersección para Múltiples vehículos

Proporción de bloqueos por nivel de severidad para tipos de carretera específicos				
Tipo de Choque	3 SG		4 SG	
	Fheridos	Fdaños	Fheridos	Fdaños
Colisión Trasera	0.549	0.546	0.0338	0.374
Colisión Frontal	0.038	0.02	0.041	0.03
Angulo de Colisión	0.28	0.204	0.44	0.335
Colisión Lateral	0.076	0.032	0.121	0.044
Colisión de Multiple vehiculos	0.057	0.198	0.06	0.217

Fuente. Adaptado Tabla 12-11 HSM 2010

Tabla 13. Factor de Ajuste por tipo de Colisión en Intersección para un solo vehiculo

Proporción de bloqueos por nivel de severidad para tipos de carretera específicos				
Tipo de Choque	3 SG		4 SG	
	Fheridos	Fdaños	F heridos	Fdaños
Colisión con vehiculo parquedo	0.001	0.01	0.01	0.001
Colisión co animal	0.001	0.003	0.001	0.026
Colisión objeto fijo	0.653	0.895	679	0.847
Colisión con otro objeto	0.091	0.069	0.089	0.07
Colision con un solo vehiculo	0.045	0.018	0.051	0.007
Sin colisión	0.209	0.014	0.179	0.049

Fuente. Adaptado Tabla 12-13 HSM 2010

### 3.5.2 Accidentes de Vehículos con Peatones para Intersecciones

#### SPFs para Intersecciones Semaforzada

El número de accidentes entre vehículos y peatones por año en una intersección semaforizada se estima con un SPFs y un conjunto de CMFs que se aplican específicamente a las colisiones entre vehículos y peatones. El modelo para estimar accidentes entre vehículos y peatones en las intersecciones señalizadas es:

$$N_{peat} = N_{peat\ base} * CMF_{1p} * CMF_{2p} * CMF_{3p} \text{ (Ec:3.6-7)}$$

Donde,

- $N_{peat}$  = El número de accidentes entre vehículos y peatones por año en una intersección semaforizada.

- $N_{peat\ base}$  = El número de accidentes estimados entre vehículos y peatones para las condiciones base por año en una intersección semaforizada.
- $CMF_{1p} \dots CMF_{3p}$  = Factores de Modificación de accidentes CMFs para vehículos y peatones en intersecciones semaforizadas.

Las SPFs para los accidentes entre vehículos y peatones en las intersecciones semaforizadas se expresan como:

$$N_{peat\ base} = \exp \left\{ a + b * \ln(AADT_{total}) + c * \ln \left( \frac{ADDT_{ppal}}{ADDT_{sec}} \right) + d * \ln(PeatVol) + e * n_{lineas\ x} \right\} \text{ (Ec:3.6-8)}$$

Donde,

- $AADT_{total}$  = Suma promedio de los volúmenes de tráfico (vehículos por día) porcorredor el principal y el secundario
- $PeatVol$  = Suma de los volúmenes diarios de peatones (peatones / día) que cruzan todas las líneas de la intersección.
- $n_{lineas\ x}$  = Número máximo de carriles de tránsito cruzados por un peatón en cualquier maniobra de cruce en la intersección considerando la presencia de islas de refugio; y.
- $a, b, c, d, e$  = coeficientes de regresión.

Tabla 14. SPFs para Accidentes de Vehículo Peatón en Intersecciones Semaforzadas.

Tipo de Intersección	Coeficientes de Regresión EC:3.6-8					Parámetro de sobre dispersión
	Intercept	AADT <sub>total</sub>	AADT <sub>ppal</sub> / AADT <sub>sec</sub>	PedVol	n <sub>lanesx</sub>	
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	
Total, accidentes						
3SG	-6.60	0.05	0.24	0.41	0.09	0.52
4SG	-9.53	0.40	0.26	0.45	0.04	0.24

Fuente. Adaptado Tabla 12-14 HSM 2010

Tabla 15. Estimado de Volúmenes de Peatones

PeatVol (peatones/ día)		
Para usar en la (Ec:3.6-8)		
Nivel de Actividad de Peatones	3SG	4SG
Alto	1,700	3,200
Medio y Alto	750	1,500
Medio	400	700
Medio y Bajo	120	240
Bajo	20	5

Fuente. Adaptado Tabla 12-15 HSM 2010

### 3.5.3 Accidentes de Vehículos con Bicicletas para Intersecciones

- El número de accidentes de vehículos con bicicletas para intersecciones se estima de la siguiente manera:

$$N_{bici} = N_{bi} * f_{bici}; (Ec:3.6-9)$$

Donde,

- $N_{bi}$  = Número de frecuencia media de accidentes para una intersección de la en un año específico.
- $f_{bici}$  = Frecuencia de accidentes ajustada para bicicleta.



Tabla 16. Factor de ajuste para accidentes con bicicleta en Intersecciones

Tipo de Intersección	Factor de Ajuste ( $f_{bici}$ )
3SG	0.011
4SG	0.013

Fuente. Adaptado Tabla 12-17 HSM 2010

### 3.6 Conclusiones y Recomendaciones Capitulo III

- El Highway Safety Manual (HSM) presenta una metodología práctica la cuantificación de la Seguridad Vial. Dicha metodología se divide en tres escenarios diferentes: vías rurales de dos carriles, vías rurales de múltiples carriles y finalmente las arterias urbanas y suburbanas.
- La implementación del método de estimación de accidentes se puede resume en: selección de los elementos a estudiar, evaluación de un Modelo Base, aplicación de los CMFs (para incluir los efectos de las particularidades geométricas y el control del tráfico del elemento); corrección de accidentalidad mediante un factor de Calibración (para adaptar el modelo a las condiciones locales).
- El método estimación de accidentes permite incorporar varios enfoques en el análisis y determinar la distribución de accidentes de acuerdo con unos niveles de gravedad y/o tipologías. Además, se utiliza para estimar la frecuencia de accidentes promedio prevista de un segmento individual o intersección, con la suma acumulativa de todos los sitios utilizados.

## **Capítulo IV**

### **Desarrollo de las Funciones de Desempeño de la Seguridad SPFs de las Condiciones Bases Av. Troncal Caracas.**

En este capítulo se implementó y calibró el modelo de las condiciones bases denominadas predicción de accidentes presentado en el manual HSM (2010), adecuado a las condiciones de la Avenida Troncal Caracas, como una alternativa para evaluar las estrategias que permitan reducir los accidentes en este tipo de vías. A partir del desarrollo del modelo, se presenta un análisis de los factores de modificación de accidentes que pueden ser aplicados al BRT de Bogotá y el factor de calibración del modelo del corredor. Para esto, inicialmente se presenta la descripción del tramo, reportes de accidentalidad y condiciones de operación. Posteriormente, se describe las condiciones bases y los factores de modificación empleados. La metodología para la calibración del modelo y el desarrollo de las funciones de desempeño de la seguridad son expuestos en la siguiente sección. Por último, se discute el análisis de los resultados y las conclusiones en la parte final del capítulo.

#### **4.1 Caracterización del Corredor Avenida Caracas**

##### **4.2.1. Localización y procesamiento de los datos**

La ciudad de Bogotá tiene en su actualidad 11 corredores de troncales para uso exclusivo de TransMilenio. La troncal con mayor índice de accidentes es la Avenida Caracas y el análisis que se llevó a cabo en esta vía es esta ubicado en el tramo comprendido entre la Calle 11 Sur hasta la calle 76, como se observa en la figura 8. Los datos de accidentalidad corresponden a los años (2012-2016) suministrados por parte de la Secretaria Distrital de Movilidad, y fueron valorados de acuerdo con lo recomendado en el HSM (2010) Capitulo 12 y en Srinivasan et al. (2013). La información de accidentalidad presentada estaba caracterizada de la siguiente manera: clasificación del “lugar” se define como intersección o tramo de vía, la dirección hace referencia a la (nomenclatura) y la clase de accidente reportada la denominaba como (Atropello, Choque, Caída del Ocupante u Otro), al depurar

y organizar los datos se realizó una nueva reclasificación del lugar de accidente, siguiendo los siguientes criterios:

- Si el accidente ocurre en una dirección localizada en la esquina de una intersección, pero en la misma queda una estación, el accidente se relaciona con la parada en la estación y por tanto se asocia al tramo de vía correspondiente donde se encuentra dicha estación.
- Todos los accidentes tipo atropello que registran una dirección en la esquina de una intersección son asociados a accidentes sobre la intersección.
- Las caídas de los ocupantes son asociadas a los respectivos tramos a menos de que la hayan reportado en la intersección.
- Los choques que registran una dirección donde se ubica una intersección son asociados a los accidentes sobre la intersección.
- Para la clase de accidentes “otros” no se realiza ninguna modificación del lugar.

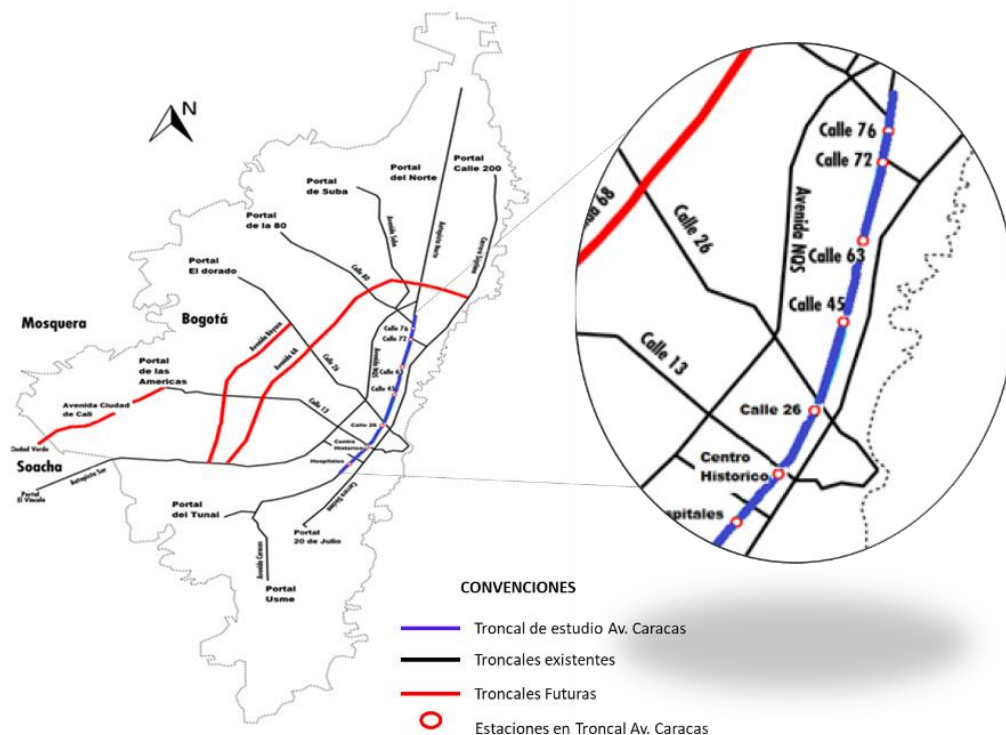


Figura 20. Mapa de localización del Corredor de la Avenida Caracas.  
Fuente: Elaboración propia a partir de información del Metro de Bogotá.

Los accidentes son además categorizados en choques de múltiples vehículos, un solo vehículo y totales (sin incluir los que involucran peatones y/o ciclistas). Para medir la geometría de la carretera (e.g. ancho de carril, número de carriles, ancho del separador, etc.) se utilizó el mapa iterativo de Bogotá del IDECA (2018). Los volúmenes de tráfico fueron suministrados por la Secretaria de Movilidad para algunos años y se proyectaron considerando el crecimiento del parque automotor de la ciudad de Bogotá.

El estudio desarrollado se centró en el corredor “Caracas” en toda su extensión como se mencionó previamente y una parte del corredor “Caracas Sur – Usme” (entre las calles 11Sur y la calle 6). Los segmentos de tramos de vía fueron seleccionados teniendo en cuenta la presencia de intersecciones peatonales como vehiculares y una longitud mínima de 160m (0.1 millas, Safety Analyst 2018). Como resultado, los tramos de vía considerados para este estudio presentan longitudes entre 160 m y 542 m, la sección transversal del corredor se muestra en la figura 21. Un total de 29 intersecciones las estaciones de las intersecciones consideradas se muestran en la figura 22, donde se encontró tanto información de accidentes como volúmenes de tráfico fueron empleadas para el análisis. Las secciones del corredor sin accidentes y/o con datos de accidentes muy altos fueron excluidos del análisis como parte del proceso de clasificación de la información. Los tramos de vía considerados en el análisis se presentan en la figura 23. La velocidad máxima permitida en estos corredores es de 60 Km/h (Global BRT Data 2018), lo que lo sitúa en una categoría de velocidad intermedia o alta (mayor a 48 Km/h, HSM 2010) y están categorizados como urbanos (i.e. rodeados de más de 5000 habitantes, HSM 2010).

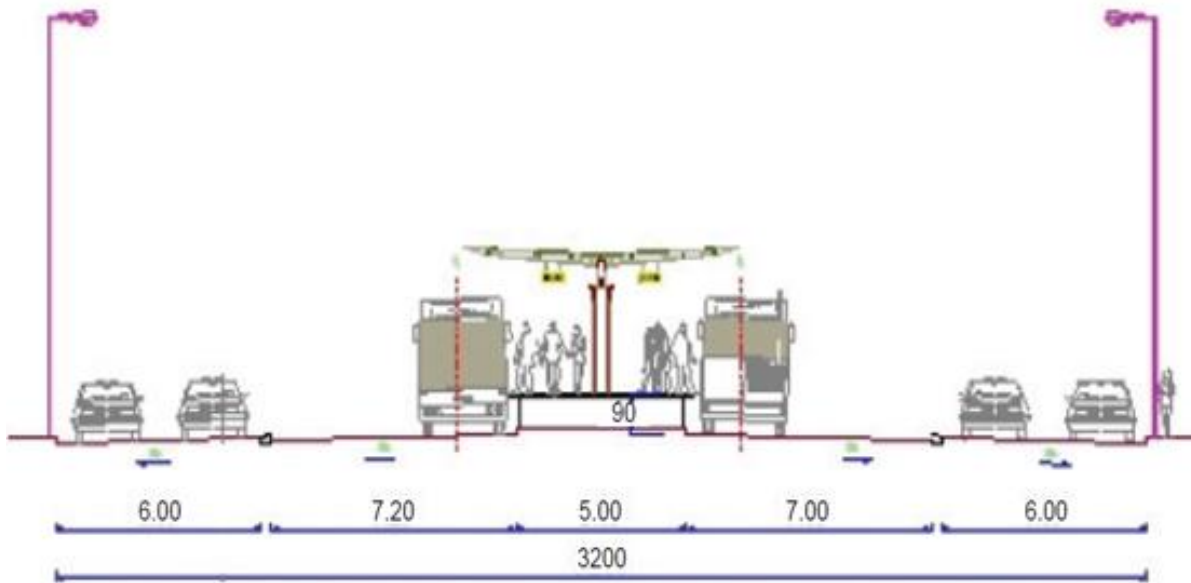


Figura 21. Sección Transversal Típica con Estación Av. Caracas Troncal de TransMilenio.  
Fuente: Irma Chaparro, 2002.

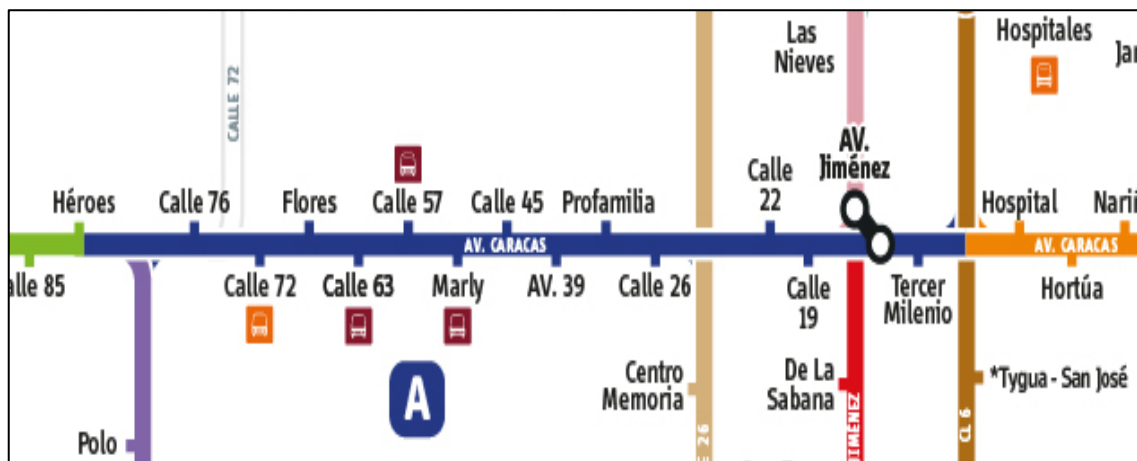


Figura 22. Estaciones Av. Caracas Troncal de TransMilenio.  
Fuente: TransMilenio.gov.co.

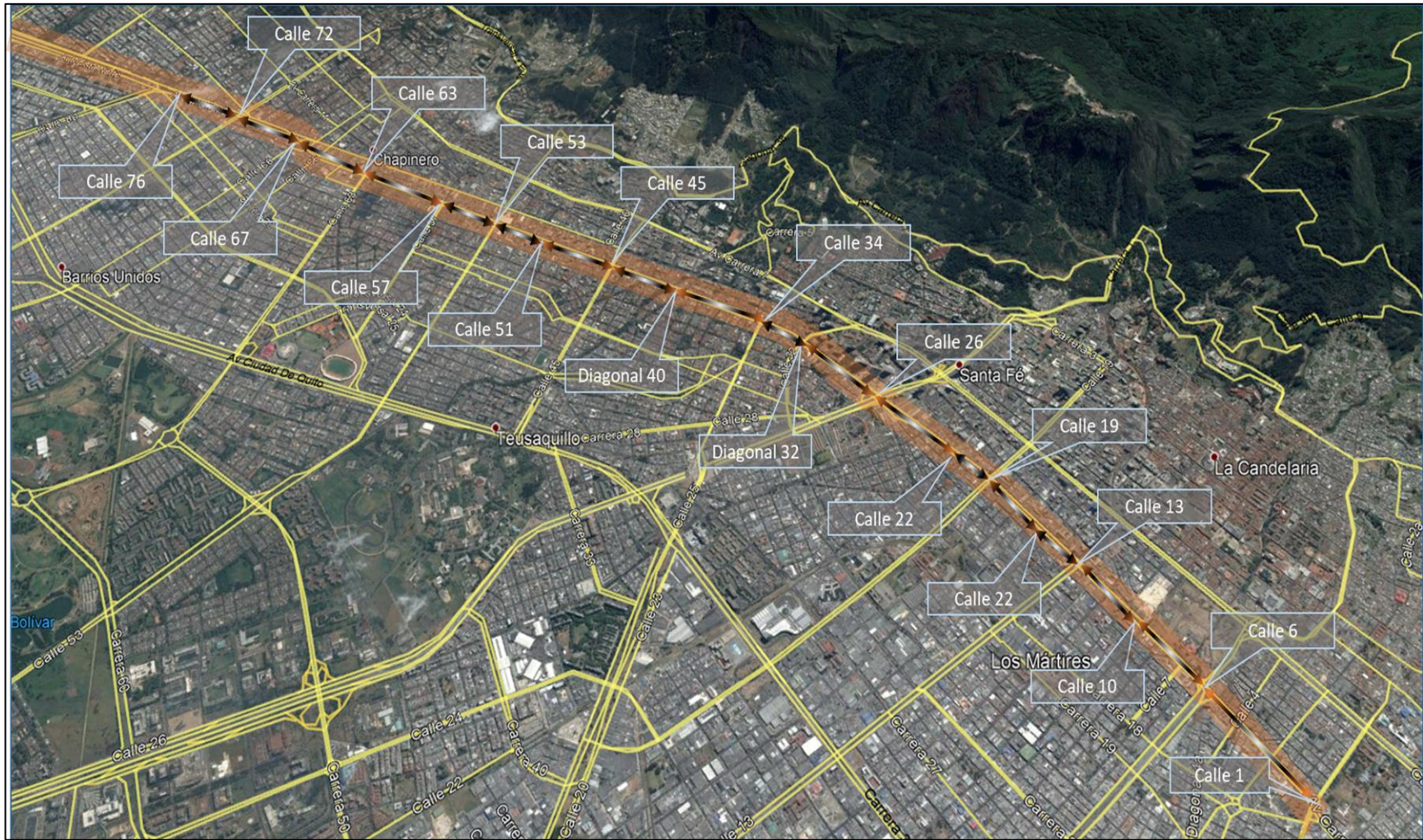


Figura 23. Troncal Av. Caracas, Intersecciones y Tramos evaluados con HSM 2010.  
Fuente. *Elaboración propia a partir de imágenes de GoogleEarth*

## 4.2 Condiciones base SPFs para Tramos e Intersecciones

Las funciones de desempeño de la seguridad han sido formuladas usando información de los Estados Unidos, es necesario especificar las condiciones base de los corredores evaluados. Un comparativo de las condiciones base identificada para los corredores del BRT y las presentadas en el HSM para los tramos de vía 4D (4 carriles, 2 en cada dirección con separador) e intersecciones 4SG (Intersección de 4 ramas con señalización) se presenta en la tabla 17.

Tabla 17. Comparativo de las condiciones base del TransMilenio vs HSM (2010)

Condición	Carriles exclusivos BRT	HSM (2010)
<b>Tramos de vía (worksheet 1a Chapter 12 – HSM)</b>		
Ancho de Carril	3.60 m (12 ft)	3.60 m (12 ft)
tipo de bahía de parqueo	Ninguna	Ninguna
Ancho del separador	370 (12.2 ft)	4.60 m (15 ft)
Iluminación	Presente	Ninguna
Control de Velocidad (Cámaras o Tableros)	Ninguno	Ninguno
Densidad de obstáculos fijos en los márgenes de la carretera (objetos cada 300 m)	Ausente*	Ausente
Distancia al borde del obstáculo fijo	Ausente*	Ausente
<b>Intersecciones (worksheet 2a Chapter 12 – HSM)</b>		
Iluminación en la intersección	Presente	No presente
Número de accesos con carril exclusivo de giro a la izquierda	0	0
Número de accesos con carril exclusivo de giro a la derecha	0	0
Número de accesos con giro a la derecha prohibido en rojo	0	0
Tipo de Fase de giro a la izquierda	Protegido	Permisivo
Cámara de Luz Roja	Ausente	Ausente
Número de paradas de Bus dentro de los 300 metros de la intersección	1 a 2	0
Presencia de escuelas dentro de los 300 metros de la intersección.	Presente	Ausente
Número de establecimientos de venta de alcohol dentro de los 300 metros.	1 a 8	0

Fuente. Elaboración propia

\* Estos datos no fueron recolectados sobre los corredores estudiados ya que no hay accidentes de solo daños con un solo vehículo involucrado en los sitios de estudio.

### 4.3 Factores de Modificación de Accidentes CMFs para las condiciones locales.

Para comparar las SPFs desarrolladas para los carriles del BRT con las SPFs establecidas en el manual de seguridad es necesario utilizar los factores de modificación de accidentes (CMFs – Crash Modification Factors). La tabla 18 resume los factores que fueron aplicados al modelo presentado por el HSM para obtener resultados equivalentes con las SPFs desarrolladas específicamente para la ciudad de Bogotá. Debido a la configuración del BRT de Bogotá, dentro de los 300 m de radio cerca de las intersecciones se contaba con al menos 1 parada (i.e. estación de Transmilenio). También, en la mayoría de las intersecciones se cuenta con presencia de escuelas y establecimientos de alcohol dentro de los 300 m debido al uso mixto de la tierra en el corredor Caracas. La presencia de cámara de luz roja no fue identificada en la zona de estudio y solo se identificó cámara de velocidad en un caso (intersección carrera 14 con calle 6).

Tabla 18. Factores de Modificación de accidentes utilizados cuando se emplean las SPFs del HSM.

<b>Para SPFs estimadas para BRT</b>	
<b>Condición</b>	<b>Valor CMF</b>
Número de accesos con carril exclusivo de giro a la izquierda (Table 12-24)	0.90, 0.81, 0.73 y 0.66 para uno a cuatro accesos respectivamente
Número de accesos con carril exclusivo de giro a la derecha (Table 12-26)	0.96, 0.92, 0.88 y 0.85 para uno a cuatro accesos respectivamente
Número de accesos con giro a la derecha prohibido en rojo (Equation 12-35)	$0.98^{(\text{número de accesos})}$
<b>Para SPFs Manual HSM</b>	
Ancho del separador (Table 12-22, HSM)	1.05
Iluminación en intersecciones (Equation 12-36, HSM)	0.91
Tipo de Fase de giro a la izquierda (Table 12-25)	0.94
Número de paradas de Bus dentro de los 300 metros de la intersección (table 12-28, HSM)	2.78
Presencia de escuelas dentro de los 300 metros de la intersección (table 12-29, HSM)	1.35
Número de establecimientos de venta de alcohol dentro de los 300 metros (table 12-30, HSM)	1.12

Fuente. Elaboración propia



#### 4.4 Participación de los diferentes actores de acuerdo con las condiciones locales

Empleando la metodología establecida en el apéndice A.1.3 del HSM 2010 se actualizó el factor de ajuste de atropello de peatones ( $f_{pedr}$ ) para tramos de vía e intersecciones mediante la expresión:

$$f_{pedr} = \frac{K_{ped}}{K_{non}} ; (EC:4.5-1)$$

Donde  $K_{ped}$  y  $K_{non}$  son respectivamente las frecuencias de accidentes observadas para atropello de peatones, y totales sin contar peatones y ciclistas. El factor de ajuste de atropello de ciclistas ( $f_{biker}$ ) no fue ajustado ya que solo se reportaron un total de 3 y 6 accidentes para tramos de vía e intersecciones correspondientemente. Considerando 42 y 29 atropellos ocurridos en el periodo de estudio se encontró un valor de  $f_{pedr} = 0.457$  para tramos de vía y  $f_{pedr} = 0.453$  para intersecciones. Debido a que los factores de ajuste de accidentes con peatones son de casi el 50%, estos generan una gran incidencia en los accidentes totales sobre el corredor y es importante trabajar en la implementación de medidas que reduzcan estos índices. Adicionalmente, al comparar los valores con los reportados en el Manual de Seguridad (2010) para el tipo de tramo e intersección en arterias urbanas (0.019 y 0.022 respectivamente), se evidencia que es necesario calibrar estos valores para obtener predicciones confiables que permitan implementar metas en cuanto a la seguridad de operación del BRT de Bogotá.

La contribución de accidentes que no involucran peatones y/o bicicletas se presenta a continuación; un 13% involucran múltiples vehículos (7.9% con heridos y/o muertos y, 4.7% con solo daños) y, un 50% involucran un solo vehículo (48.8% con heridos y/o muertos y, 1.6% con solo daños). Es importante destacar que la alta cantidad de accidentes que involucran un solo vehículo está asociada con la caída de los ocupantes durante el frenado o puesta en marcha de los vehículos articulados.

## 4.5 Metodología para el Cálculo de SPFs

Los modelos más comunes para el desarrollo de SPFs son Poisson y binomial negativo (Lu et al. 2014). Las regresiones con una distribución tipo Poisson han sido utilizadas para modelar la relación entre los tipos de accidentes y variables independientes como la geometría de la vía y hora del día (Kraus et al. 1993) y, para modelar la relación entre el tipo de accidente, la severidad, volúmenes de tráfico entre otras (Khan et al. 1999). Sin embargo, los parámetros estimados por este medio pueden introducir parcialidad e inconsistencias debido a que la varianza es restringida a la media en este tipo de regresión y, la varianza en el número de accidentes suele exceder la media (Lu et al. 2014). Debido a la dispersión que se presenta en este estudio se evidencia en la mayoría de los casos que la varianza supera la media (ver tabla 20), el modelo binomial negativo es usado en esta investigación el desarrollo de las SPFs.

El accidente más frecuente reportado en la base de datos para un solo vehículo ocurre por la caída del ocupante que generalmente ocurre en los tramos donde hay una estación del BRT (39 accidentes). En consecuencia, el análisis de las SPFs se presenta tanto para tramos con o sin estaciones con la finalidad de identificar las diferencias en cantidad de accidentes para ambas situaciones y su relación con la presencia de la estación.

La forma de la función utilizada para describir el número de accidentes es en general, la forma del modelo del SPFs usado en los análisis de seguridad (Lu et al. 2014), i.e. un modelo exponencial que combina linealmente el efecto de cada una de las variables consideradas (ver tabla 21). El ingreso o rechazo de cada una de las 13 variables consideradas se evalúa mediante el valor-P del modelo generado (reportado en la tabla 22). Un total de 9 ecuaciones fueron determinadas.

Un total de 81 accidentes para tramos fueron usados para generar los modelos tomados de los años 2012, 2014 y 2016. La validación de los modelos se realiza con los datos de accidentes reportados para el año 2015 (i.e. diferentes a los utilizados en la generación de los SPFs). La bondad del ajuste se determinó mediante la desviación media absoluta (MAD, por sus siglas en inglés), error cuadrático medio (MSPE, por sus siglas en inglés) y de Freeman-Tukey R-cuadrado (R2FT). Un valor alto de R2FT indica un mejor modelo. Por

otro lado, bajos valores de MAD y MSPE indica un mejor ajuste del modelo a los datos utilizados.

$$R_{FT}^2 = 1 - \frac{\sum \hat{e}_i^2}{\sum (f_i - \bar{f})^2}; \text{ (EC:4.5-2)}$$

Donde,

- $\hat{e}_i$  = es el residuo (entre los accidentes observados y predichos)
- $\bar{f}$  = es el promedio de los  $f_i$
- $f_i$  = sitios considerados (para incluir los accidentes observados)

El MAD y MSPE son estimados como:

$$MAD = \frac{1}{n} \sum |y_i - \mu_i| ; \text{ (EC:4.5-3)}$$

$$MSPE = \frac{1}{n} \sum (y_i - \mu_i)^2 ; \text{ (EC:4.5-4)}$$

Donde,

- $n$  = es el tamaño de la muestra de segmentos de todos los sets de datos de la predicción.
- $y_i$  = es la frecuencia de accidentes observados en el segmento  $i$
- $\mu_i$  = es la predicción de accidentes observados en el segmento  $i$ .

#### 4.6 Análisis del Cálculo de las SPFs para Tramos de Vía.

Las variables consideradas para estimar las SPFs de este estudio se puede observar en la tabla 19 para tramos de vía. Es importante tener en cuenta que, en el caso de tramos de vía, los volúmenes utilizados corresponden a ambas direcciones y por tanto las SPFs predecirán los accidentes de ambos sentidos (Safety Analyst, 2018). Los parámetros estadísticos del set de datos utilizados en el análisis se presentan en la tabla 20 y las SPFs son presentadas en la tabla 21 para los diferentes casos estudiados. Donde K es el parámetro de sobre-dispersión de la SPFs y C es el factor de calibración cuando se emplea las SPFs del HSM. Los resultados muestran que en el caso de accidentes de un solo vehículo sin la presencia de estaciones, la cantidad de accidentes esperados es constantes, por tanto, las variables estudiadas no presentan una relación estadística clara con la frecuencia de accidentes.

Tabla 19. Variables Consideradas para generar SPFs para Tramo de vía

<b>Variable</b>	<b>Nombre</b>
Volumen promedio diario anual de vehículos del BRT	$AADT_{BRT}$
Volumen promedio diario anual de vehículos del carril mixto	$AADT_{MIX}$
Longitud del tramo	$L$
Número de cruces peatonales	$P_{peat}$
Número de Rutas que llegan a la estación	$S_{tronca}$
Longitud de la estación	$L_{estac}$
Demanda de pasajeros (o número de ingresos a la estación)	$Demanda$
Número de salidas de la estación	$N_{Salidas}$
Número de accesos vehiculares del tramo de vías secundarias	$Acc$
Número de obstáculos	$obst$
Número de semáforos Vehicular	$Sem_{Veh}$
Ingreso o salida de Buses al tramo	$inter$
Ancho del separador	$Sep$

Fuente. Elaboración propia.

En el caso de los choques que involucran múltiples vehículos e incluyendo tanto los accidentes de un solo vehículo, las ecuaciones generadas son dependientes tanto de los parámetros típicos (AADT y L) cómo de otras condiciones bases del corredor (e.g.  $N_{salidas}$ ,  $Sem_{peat}$ ). También se evidencia desde la tabla 20 que en algunos casos como el choque

de vehículo múltiple cuando se combinan tanto los tramos con y sin estaciones el modelo se obtiene un modelo más confiable (P-valor = 0.003). Desde la tabla 21 es claro que variables como los servicios troncales de la estación, la demanda de pasajeros (o número de ingresos a la estación), el número de cruces vehiculares y el número de vías secundarias que con interrumpidos en el tramo de estudio no presentan una relación representativa con el número de accidentes.

Tabla 20. Características de los datos de entrada para cálculo de SPFs

Categoría	Estación	Modelo	Observ.	Accid.	Media	Varianza	K	P-valor	C
<b>Análisis de Seguridad usando las SPFs del manual HSM</b>									
<b>Múltiples Vehículos</b>	N/A	Lineal	N/A	N/A	N/A	N/A	1.32	N/A	1.99
<b>Un solo Vehículo</b>	N/A	Lineal	N/A	N/A	N/A	N/A	0.86	N/A	12.9
<b>Análisis de Seguridad usando las SPFs para las condiciones locales</b>									
<b>Múltiples Vehículos</b>	Si	Lineal	45	8	0.1778	0.1949	0.18	0.041	N/A
	No	Lineal	45	9	0.1875	0.1981	0.11	0.304	N/A
	Ambos	Lineal	93	17	0.1828	0.1945	0.18	0.003	N/A
<b>Un solo Vehículo</b>	Si	Constante	45	32	0.7111	1.0737	0.357	0.377	N/A
	No	Constante	48	32	0.6667	0.5248	0.667	0.056	N/A
	Ambos	Constante	93	64	0.6882	0.7821	0.125	0.099	N/A
<b>Múltiples Vehículos y Un solo Vehículo</b>	Si	Constante	45	40	0.8889	1.1465	0.10	0.096	N/A
	No	Lineal	45	41	0.8542	0.6804	0.854 2	0.183	N/A
	Ambos	Constante	93	81	0.8710	0.8962	0.87	0.072	N/A

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 21. SPFs para los segmentos del carril exclusivo del BRT.

<b>Categoría del accidente</b>	<b>Estación en el tramo</b>	<b>Ecuación</b>
<b>Múltiples Vehículos</b>	Si	$N = \exp(-23.021 - 3.265 * \ln(AADT_{BRT}) + 4.470 * \ln(AADT_{MIX}) + 8.385 * L)$
	No	$N = \exp(-18.617 + 1.916 * \ln(AADT_{BRT}))$
	Ambos	$N = \exp(-22.108 + 2.098 * \ln(AADT_{BRT}) + 9.487 * L + 2.962 * Estac - 1.671 * N_{Salidas} + 2.627 * Inter)$
<b>Un solo Vehículo</b>	Si	$N = \exp(-3.401 + 2.559 * \ln(AADT_{BRT}) - 1.692 * \ln(AADT_{MIX}) + 4.481 * L - 0.985 * N_{Salidas} - 0.833 * Sem_{peat} + 2.75 * Inter)$
	No	$N = \exp(-0.40547) = 0.67$
	Ambos	$N = \exp(-0.441 + 0.728 * Inter)$
<b>Totales (No peatones o Bicicletas)</b>	Si	$N = \exp(-0.595 + 0.127 * \ln(AADT_{BRT}) + 0.146 * \ln(AADT_{MIX}) - 23.258 * L + 30.287 * L_{estac} - 1.331 * Sem_{peat} + 2.475 * Inter + 1.100 * Obst - 1.189 * N_{salidas})$
	No	$N = \exp(4.354 + 0.861 * \ln(AADT_{BRT}) - 1.276 * \ln(AADT_{MIX}) + 3.702 * L - 0.369 * Sem_{peat} + 1.470 * Inter + 0.117 * Sep)$
	Ambos	$N = \exp(-0.005 + 0.407 * \ln(AADT_{BRT}) - 0.581 * \ln(AADT_{MIX}) + 4.160 * L + 14.579 * L_{estac} - 0.117 * Sem_{peat} + 1.411 * Inter + 0.031 * Obst - 0.738 * N_{salidas} + 0.108 * Sep)$

Fuente. Elaboración propia.

Mediante una revisión de los coeficientes presentados en la tabla 21, se puede observar que el coeficiente que acompaña al volumen promedio diario de BRTs es positivo en la mayoría de casos tanto para los tramos que presentan estaciones como cuando se combinan todos los tramos en el caso de accidentes de múltiples vehículos, lo cual es de esperarse teniendo en cuenta que una mayor cantidad de vehículos aumenta la probabilidad de un accidente. Los factores de calibración (tabla 20) evidencian que las SPFs del HSM subestiman el número de accidentes. En el caso de los accidentes de un solo vehículo se constata que el modelo no considera la caída de ocupante ( $C = 12.9$ ) para el caso específico de este medio de transporte. La tabla 20 también muestra que la cantidad de accidentes se encuentra muy influenciado por la presencia de una estación (i.e. un mayor valor de  $N$ ).

La validación de las SPFs desarrolladas para el BRT de Bogotá y el modelo calibrado usando las SPFs desde el HSM son presentadas en la tabla 22. Los accidentes reportados en el año 2015 fueron empleadas para este propósito, es importante notar que este año no fue utilizado previamente para el desarrollo de las SPFs. La tabla 22 presenta la bondad del ajuste en cada caso. Los resultados de la tabla muestran que la calidad del ajuste se reduce cuando se desarrollan SPFs involucrando tanto los accidentes con vehículos múltiples como de un solo vehículo (es decir, los valores del MAD y MSPE son mayores comparados con los valores para las SPFs desarrolladas para cada caso de manera independiente). Los valores que representan el mejor ajuste para cada categoría (múltiples vehículos, un solo vehículos y combinando ambos) aparecen sombreados en la tabla se indican que las estimaciones más precisas se logran en general, cuando no hay presencia de estación dentro del tramo estudiado revelando la complejidad que envuelve la presencia de las mismas. En todos los casos evaluados, se evidencia que el ajuste logrado cuando se emplean las HSM desarrollada para las condiciones de Bogotá es más alto que al emplear el modelo calibrado del HSM. De acuerdo con lo anterior, se recomienda utilizar estas últimas para realizar las estimaciones de accidentes dentro de los estudios de seguridad vial.

Tabla 22. Parámetros de calidad del ajuste (validación)

Categoría	Estación	SPFs del manual HSM			SPFs específicas BRT Bogotá		
		MAD	MSPE	R <sup>2</sup> <sub>FT</sub>	MAD	MSPE	R <sup>2</sup> <sub>FT</sub>
Múltiples Vehículos	Si	0.2873	0.1249	-0.1110	0.2842	0.1922	-0.6628
	No				0.2814	0.1195	-0.0924
	Ambos				0.2838	0.2012	-0.7899
Un solo Vehículo	Si	0.7557	0.8058	-0.0938	0.6741	0.9018	-0.0151
	No				0.6663	0.5689	-0.0114
	Ambos				0.6997	0.6733	0.081
Múltiples Vehículos y Un solo Vehículo	Si	N/A	N/A	N/A	0.8403	1.1909	0.0076
	No				0.8986	1.2079	-0.9823
	Ambos				<b>0.7084</b>	<b>0.7539</b>	<b>0.1615</b>

Fuente. Elaboración propia

#### 4.7 Análisis del Cálculo de las SPFs para intersecciones.

Para el caso del análisis de las intersecciones, se tuvieron en cuenta doce variables que se describen en la tabla 23. Los parámetros estadísticos del grupo de datos utilizados en el análisis de las intersecciones se presentan en la tabla 6 y las SPFs estimadas son mostradas en la tabla 24 para los diferentes casos estudiados (Múltiple Vehículo, un solo vehículo y ambos tipos de accidentes). Los resultados muestran que, para los diferentes casos analizados, la cantidad de accidentes esperados depende al menos de 4 variables. Las variables como el número de accesos con carril exclusivo de giro a la izquierda, tipo de fase de giro a la izquierda, número de Carriles exclusivo de giro a la derecha, número de accesos con Señal de Giro a la derecha en rojo prohibido, y el número de establecimientos de venta de alcohol dentro de los 300 metros no presentaron una relación estadística clara con la frecuencia de accidentes. La estimación de accidentes de múltiples vehículos empleando las SPFs del HSM es bastante alejada (factor de calibración  $C = 0.0788$ ) lo que se atribuye a la separación que tiene el carril exclusivo del Transmilenio del tráfico mixto. Además, la tabla indica que la cantidad de accidentes que prima en la intersección es de vehículos múltiples (39 accidentes):



Tabla 23. Variables Consideradas para generar SPFs para Intersección

Variable	Nombre
Volumen promedio diario anual de vehículos del	$AADT_{BRT}$
Volumen promedio diario anual de vehículos del carril mixto paralelo al BRT	$AADT_{MIX}$
Volumen promedio diario anual de vehículos de la calle que las intercepta	$AADT_{SEC}$
Tipo de intersección	$T_{INT}$
Ancho del separador	$S$
Número Máximo de Líneas de tráfico cruzados por un peatón en alguna maniobra	$L_{cruz}$
Numero de accesos con carril exclusivo de giro a la izquierda	$AG_{IZQ}$
Tipo de Fase de giro a la izquierda	$F_{Izq}$
Número de Carriles exclusivo de giro a la derecha	$AG_{DER}$
Número de accesos con Señal de Giro a la derecha en rojo prohibido	$AR_{PROH}$
Presencia de escuelas	$N_{ESC}$
Número de establecimientos de venta de alcohol dentro de los 300 metros	$N_{ALCOH}$

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 24. Características de los datos de entrada para cálculo de SPFs en Intersecciones

Categoría	Modelo	Observ.	Accid.	Media	Varianza	K	P-valor	C
<i>Análisis de Seguridad usando las SPFs del manual HSM</i>								
Múltiples Vehículos	Lineal	N/A	N/A	N/A	N/A	0.33-0.39	N/A	0.0788
Un solo Vehículo	Lineal	N/A	N/A	N/A	N/A	0.36	N/A	0.1044
<i>Análisis de Seguridad usando las SPFs para las condiciones locales</i>								
Múltiples Vehículos	Lineal	87	39	0.4483	0.7618	0.568	0.019	N/A
Un solo Vehículo	Lineal	87	6	0.0690	0.0650	0.069	0.118	N/A
Múltiples Vehículos y Un solo Vehículo	Lineal	87	45	0.5172	0.8573	0.501	0.032	N/A

Los coeficientes de las ecuaciones presentadas en la tabla 25 que acompañan el volumen promedio diario del carril mixto perpendicular al BRT ( $AADT_{SEC}$ ) son positivos como es de

esperarse, ya que a mayor cantidad de vehículos mixtos que intervienen en la intersección se intuye una mayor frecuencia de accidentes. También, el número máximo de líneas de tráfico cruzados por un peatón en alguna maniobra ( $L_{CRUZ}$ ) son positivos indicando un aumento en el índice de peligrosidad de la intersección. Bajo esta misma filosofía, los coeficientes que acompañan el ancho del separador ( $S$ ) es positivo, indicando un aumento en el nivel de riesgo. Por otra parte, los factores de calibración (tabla 24) evidencian que las SPFs del HSM sobreestiman el número de accidentes (contrario al caso de los tramos, es decir  $C < 1.0$ ).

Tabla 25. SPFs para las intersecciones del carril exclusivo del BRT

<b>Categoría del accidente</b>	<b>Ecuación</b>
Múltiples Vehículos	$N = \exp\left(-18.564 - 1.390 * \ln(AADT_{BRT}) + 1.865 * \ln(AADT_{MIX}) + 0.900 * \ln(AADT_{SEC}) + 0.127 * L_{CRUZ} + 0.351 * N_{ESC}\right)$
Un solo Vehículo	$N = \exp\left(-9.484 - 0.664 * \ln(AADT_{BRT}) + 0.584 * \ln(AADT_{SEC}) - 1.973 * T_{INT} + 0.186 * S + 2.119 * L_{CRUZ}\right)$
Múltiples Vehículos y Un solo Vehículo	$N = \exp\left(-16.613 - 1.031 * \ln(AADT_{BRT}) + 1.494 * \ln(AADT_{MIX}) + 0.833 * \ln(AADT_{SEC}) - 0.195 * T_{INT} + 0.005 * S + 0.253 * L_{CRUZ}\right)$

Fuente. Elaboración propia.

La validación de las SPFs desarrolladas para el BRT de Bogotá y el modelo calibrado usando las SPFs desde el HSM de las intersecciones son presentadas en la tabla 26. De nuevo, los accidentes reportados en el año 2015 fueron empleados para este propósito. La tabla 26 muestra la bondad del ajuste en cada caso, desde estos resultados es claro que, en el caso de los accidentes de múltiples vehículos, el mejor ajuste se produce al emplear las SPFs desarrolladas (es decir, los valores del MAD y MSPE son menores comparados con los valores para las SPFs del manual del HSM y el valor de  $R^2_{FT}$  es más alto). Para los accidentes de un solo vehículo, el ajuste usando ambas SPFs es muy similar.

Tabla 26. Parámetros de calidad del ajuste de las SPFs para las intersecciones (validación)

Categoría	SPFs del manual HSM			SPFs específicas BRT Bogotá		
	MAD	MSPE	R <sup>2</sup> <sub>FT</sub>	MAD	MSPE	R <sup>2</sup> <sub>FT</sub>
Múltiples Vehículos	0.7425	1.2740	-0.0322	0.6830	1.119	0.0934
Un solo Vehículo	0.2431	0.2900	-0.0335	0.2262	0.2829	-0.008
Múltiples Vehículos y Un solo Vehículo	N/A	N/A	N/A	0.8136	1.7573	-0.0054

Fuente. Elaboración propia.

#### 4.8 Conclusiones y Recomendaciones Capítulo IV

- De acuerdo con los diferentes tipos de análisis presentados en este estudio, es importante destacar en primera instancia que una de las problemáticas más del sistema de transporte de masivo de Bogotá está asociada con el comportamiento del peatón, el cual está presente en el 45.7% de los accidentes reportados por la secretaria de movilidad entre los años 2014 a 2016.
- Las funciones de rendimiento de la seguridad para las condiciones locales del BRT de Bogotá fueron desarrolladas y validadas, demostrando un nivel superior de ajuste cuando se compara con el modelo calibrado empleando las SPFs del manual HSM. Otros reportes en el desarrollo de SPFs (CMF Clearinghouse (2016) para diferentes estados (e.g. Alabama, California) consideran la velocidad, el nivel de riesgo del borde de la vía, entre otras. Sin embargo, de acuerdo con la limitada cantidad de accidentes reportados en los corredores incluidos, no son considerados en el presente estudio. Un estudio que incluya todos los corredores es recomendado para ampliar las conclusiones del presente trabajo.
- Los modelos de las SPFs desarrollados permitirán estimar el efecto de diferentes modificaciones en los corredores y condiciones de operación del BRT y, permitirán definir lineamientos sobre las mejoras que se pueden implementar en el desempeño seguro del BRT de Bogotá en los próximos años. Adicionalmente, el modelo puede

ser usado para estimar la accidentalidad esperada en nuevos corredores que se deseen implementar y que manejen unas condiciones similares de operación y diseño.

## Capítulo V

### Aplicación y Evaluación del Modelo Predictivo de Accidentes del HSM 2010 Capítulo 12, para el Corredor del Transmilenio de la Av. Troncal Caracas

En este capítulo se aplican los modelos desarrollados de las SPFs para la zona de estudio. Se pretende ejemplificar sobre los alcances e impactos que tiene algunas mejoras en el corredor. Se utilizan los CMFs desarrollados en investigaciones previas y que se consideran con un nivel medio-alto o alto de confiabilidad. Se advierte que han sido desarrollados para carriles de tráfico mixto debido a que no existen CMFs específicos para BRTs que estén validados por agencias de seguridad vial (ej. Federal Highway Administration). Se presentan tanto los efectos en la seguridad vial tanto en puntos específicos cómo en todo el corredor estudiado.

#### 5.1 Metodología

Una de las formas para determinar la reducción de accidentes cuando se realizan mejoras en la seguridad de las vías es a través de los Factores de modificación de accidentes (CMFs). Generalmente, esta metodología es usada para el planeamiento y toma de decisiones de las administraciones locales o departamentales para determinar las zonas a intervenir y en la relación costo-beneficio de las alternativas de mejora en la seguridad (Harkey, 2008). En el caso específico del sistema BRT con carriles exclusivos y considerando que es una solución de movilidad de transporte público que prevalecerá en el tiempo, se hace indispensable contar con un modelo confiable que permita atender la seguridad vial en los puntos más críticos de cada corredor.

Considerando lo enunciado, la metodología aplicada en este capítulo se puede resumir en los siguientes puntos:

- Identificación y/o estimación de los CMFs aplicables al corredor avenida caracas.
- Estimar los cambios en las condiciones operacionales del corredor para 2, 4 y 6 años.
- Aplicar el modelo predictivo del HSM (2010) tanto con las SPFs estimadas.
- Comparar el efecto de cada una de las mejoras y la combinación de estas.

## **5.2 Factores de Modificación de Accidentes CMFs para el modelo del HSM 2010 de Vías urbanas y Sub urbanas del Corredor Avenida Caracas.**

De acuerdo con lo reportado en Harkey (2008) existe un grupo de 35 CMFs que han sido validados en diferentes estudios y que presentan un alto grado de confiabilidad a la hora de predecir y tomar decisiones en el tema de intervención. Estos CMFs son:

- Metodológica y estadísticamente válidos.
- Has sido aplicados a un grupo de datos, con localización de los accidentes y/o condiciones bien documentados.
- Guardan relación con las mejoras o combinación de alternativas de mejora que pueden contribuir a la reducción de accidentes aplicadas por las secretarias de transportes y/o movilidad.
- Permiten medir el impacto en las severidades y categorías de tipo de accidente.
- Son el mejor estimado de varios valores propuestos.
- Representan los beneficios del nivel de peligrosidad al aplicar la mejora.

En los siguientes párrafos se identifican los CMFs que se consideran aplicables a intersecciones y tramos del BRT. La selección de los mismos obedece a las posibilidades de ser aplicados teniendo en consideración las limitaciones físicas y operacionales del corredor. Es claro que de acuerdo con el estudio adelantado por Harkey (2008) en las carreteras de Estados Unidos, de 100 tratamientos implementados para mejorar la seguridad vial, no existen CMFs para 50 de estos tratamientos y en otros 20 tratamientos la incertidumbre en los CMFs oscila entre medio alto a alto.

### 5.3 Incrementar en la fricción del pavimento en intersecciones

En este tipo de mejora se pretende instalar una capa (piel). Los CMFs se desarrollaron a partir de la información recopilada en el instituto de transporte del estado de New York que implementó un programa llamado “skid accident reduction program” (SKARP) mediante la realización de ensayos de fricción in situ. El tratamiento incluye el uso de 4 cm de repavimentación o 25 cm de micropavimento usando agregados carbonatados. Este se aplica en las cercanías a las intersecciones y en algunos casos se extiende dentro del tramo. La tabla 1 presenta los CMFs desarrollados usando los datos de accidentes desde el año 1994 al 2003. En este periodo de tiempo se cuenta con datos previos y posteriores a la aplicación del tratamiento.

Tabla 27. CMFs para incremento en la fricción del pavimento en intersecciones.

Tipo de interseccion	Accidentes Totales (Desv. Estandar)
Intersección semaforizada 3S	0.667 (0.050)
Intersección semaforizada 4S	0.797 (0.052)

Fuente. Elaboración propia

#### 5.3.1 Señales de cuenta regresiva peatonal

Un estudio realizado en las ciudades de Jacksonville y Gainesville en el estado de Florida usando el método empírico de Bayes con los datos de accidentalidad antes y después de instalar señales de cuenta regresiva peatonal (figura 24). Para la determinación del CMF se desarrollaron las funciones de rendimiento de la seguridad para los diferentes tipos de accidentes y severidad empleando un modelo de regresión binomial negativo (Kitali et al, 2017). A partir de los resultados se encontró un CMF igual a 0.912 para todos los tipos de accidentes (Kitali et al, 2017, cmfcleanerhouse, 2018)



Figura 24. Señales de cuenta regresiva peatonal  
Fuente: Tomado de [www.alamy.es](http://www.alamy.es)

### 5.3.2 Cámaras de Luz Roja

Los CMFs se desarrollaron con datos de 7 jurisdicciones diferentes en los Estados Unidos con un total de 132 intersecciones donde se instaló la cámara de luz roja. Para comparar se estudiaron además un grupo similar de intersecciones semaforizadas donde no se instaló esta medida. Además, un segundo grupo de referencias de intersecciones no semaforizadas fue usado para calibrar las SPFs. A partir de este estudio se determinó que un CMF de 0.91 para todas las severidades de accidentes. Este estudio permitió observar que al implementar esta alternativa, se incrementan los accidentes por colisión trasera (CMF = 1.09) pero se reducen los accidentes por ángulo derecho (CMF = 0.72).

### 5.3.3 Otras medidas

Otras medidas que pueden ser instaladas para reducir los accidentes vehículo-patón son la instalación de detector automático de peatones (Figura 25-A) o proveer refugios (islas)



para los peatones (Figura 25-B). Para este tipo de medida no se han reportado CMFs validados de acuerdo con la revisión de literatura, pero su estudio y/o implementación brindarían grandes posibilidades de reducir la frecuencia de accidentes que involucran peatones y que representan cerca del 50% de los tipos de accidentes del BRT.

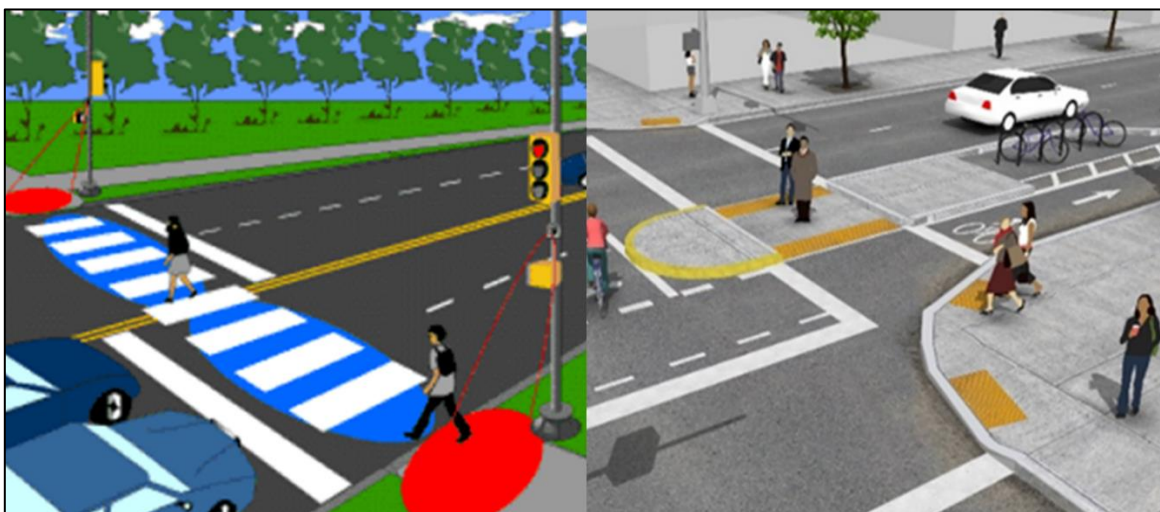


Figura 25. (a) Detector automático de peatones y (b) refugio para peatones  
Fuente: (tomado de: <https://www.fhwa.dot.gov>) (tomado de <https://nacto.org>)

#### 5.4 Incrementar en la fricción del pavimento en tramos

Una descripción del origen de este CMF se presentó en la sección anterior. Este tipo de tratamiento en tramos de vía reduce un 13.8 y un 20% la cantidad de accidentes totales y de un solo vehículo respectivamente como se muestra en la tabla 28.

Tabla 28. CMFs para incremento en la fricción del pavimento en tramos

Tipo de tramo de vía	Accidentes totales (Desv. Estandar)	Un solo vehículo (Desv. Estandar)
Urbano > 2 carriles	0.862 (0.038)	0.800 (0.083)

Fuente. Elaboración propia

## **5.5 Una discusión sobre los CMFs de algunas medidas implementadas por Trasmilenio.**

Desde su implementación en el año 2000, el sistema BRT de Bogotá ha realizado algunas modificaciones a las condiciones físicas de su infraestructura (ejemplo, barreras para cruces peatonales en las cercanías de las estaciones) y/o cambios en las condiciones de operación (ejemplo, reducción de velocidad límite). Sin embargo, el efecto de esta medida en la reducción de accidentes aún no es muy claro. Un ejemplo de esto es la reducción del límite de velocidad a 20 km/h (12.4 mph) en el corredor llamado “eje ambiental”, este corredor presenta tres veces más accidentes que involucran peatones comparado con el corredor más congestionado del BRT (i.e. Avenida Caracas). No obstante, el 80% de los choques peatón-BRT después de implementar esta medida generaron lesiones o daños más severos que los reportados previamente (Duduta et al. 2012), dejando en duda la mejora en la seguridad del peatón para este caso.

Las barreras para peatones implementadas en muchas de las estaciones de la avenida Caracas se han sido implementadas recientemente. Basado en lo discutido dentro del HMS (2010), el efecto de estas puede ser cuantificado en una ventana de tres años posterior a su implementación, comparando con los reportes de accidentes previos a la instalación de las barreras.

El tipo de intervenciones mencionadas previamente, son generalmente exclusivas de este tipo de sistema de Carril exclusivo y por tanto, de manera similar a lo reportado Harkey (2008) en vías de los Estados Unidos, no se han encontrado reportes y/o evidencias de acceso público sobre el efecto en la seguridad vial. En esta medida se recomienda realizar estudios que permitan establecer los CMFs para estas condiciones y la incertidumbre asociada a los mismos.

### 5.5.1 Volúmenes vehiculares usados para el análisis.

De acuerdo con el proyecto de generación, modelación y simulación del comportamiento de Escenarios de Desarrollo Urbano, construidos a partir de las definiciones estratégicas y de los proyectos viales, urbanísticos y de transporte, incluidos en el Plan de Ordenamiento Territorial para los diferentes horizontes de este desarrollado por Departamento Administrativo de Planeación Distrital, La tasa de crecimiento de los volúmenes de transporte promedio para cada año se presentan en la tabla 28.

Tabla 29. Crecimiento de los volúmenes de vehículos estimados para el análisis.

<b>Año</b>	<b>Tasa de crecimiento</b>
2017	1.25
2018	1.23
2019	1.21
2020	1.20
2021	1.22
2022	1.20

Fuente. Elaboración propia

### 5.6 Resultados y Análisis

Para evaluar las condiciones particulares que difieren de una zona de análisis a otra (ejemplo de una intersección a otra), se presentan la aplicación del modelo de predicción para dos tramos y dos intersecciones donde sus condiciones de operación presentan diferencias notorias (ejemplo en volumen de vehículos diarios). Adicionalmente, la estimación de accidentes se aplica para todos los puntos estudiados dentro del corredor seleccionado (caracas y caracas-usme parcialmente) con la finalidad de apreciar los incrementos y/o reducciones en la frecuencia de accidentes.

Diferentes escenarios son analizados para tres años diferentes (2018, 2020 y 2022). Estos escenarios se definieron como:

- i. **Escenario 1:** Tramos sin ninguna mejora considerando los cambios los de operación habitual (incremento del AADT y velocidad de operación del BRT).
- ii. **Escenario 2:** Basado en el escenario 1 y aumentando la fricción del pavimento.
- iii. **Escenario 3:** Intersecciones sin ninguna mejora considerando los cambios los de operación habitual (incremento del AADT y velocidad de operación del BRT).
- iv. **Escenario 4:** Basado en el escenario 3 y aumentando la fricción del pavimento.
- v. **Escenario 5:** Basado en el escenario 3 e instalando señales de cuenta regresiva peatonal.
- vi. **Escenario 6:** Basado en el escenario 3 e instalando cámara de luz roja.
- vii. **Escenario 7:** Combinando los escenarios 3 a 6.

En el caso de los tramos, dos segmentos de análisis que se muestran corresponden a la avenida caracas entre Calle 6 y Diagonal 7Bis y, entre Calle 51 y Calle 53. Estos tramos presentan grandes diferencias tanto en los volúmenes de BRT (en un 72%) cómo la existencia o no de estación dentro del tramo. La clase de accidentes por intersección se muestran en las tablas 29, 30 y 31.

Tabla 30. Intersección Calle 6. Accidentes por clase de 2012 a 2017

Dirección		AV AVENIDA CARACAS-CL 6 02					
Clase	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Total
Atropello	0	1	0	0	1	0	2
Choque	1	0	1	2	3	0	7
Caida de ocupante	0	2	2	2	0	0	6
Otro	2	0	1	1	0	1	5
<b>Total</b>	3	3	4	5	4	1	
						<b>Gran Total</b>	<b>20</b>

Fuente. Elaboración propia. A partir de datos de la Secretaria de Movilidad

Tabla 31. Intersección Calle 51. Accidentes por clase de 2012 a 2017

<b>AV AVENIDA CARACAS-CL 51</b>								
<b>Dirección 02</b>								
<b>Clase</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>Total</b>	
<b>Atropello</b>	0	1	1	0	1	1	4	
<b>Choque</b>	0	0	0	0	0	0	0	
<b>Caida de ocupante</b>	1	0	0	0	0	0	1	
<b>Otro</b>	0	0	1	0	0	0	1	
<b>Total</b>	1	1	2	0	1	1		
							<b>Gran Total</b>	<b>6</b>

Fuente. Elaboración propia. A partir de datos de la Secretaria de Movilidad

Tabla 32. Intersección Calle 63. Accidentes por clase de 2012 a 2017

<b>AV AVENIDA CARACAS-CL 63</b>								
<b>Dirección 02</b>								
<b>Clase</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>Total</b>	
<b>Atropello</b>	0	0	1	1	1	0	3	
<b>Choque</b>	0	0	0	0	1	1	2	
<b>Caida de ocupante</b>	0	2	0	1	1	1	5	
<b>Otro</b>	0	1	1	0	0	0	2	
<b>Total</b>	0	3	2	2	3	2		
							<b>Gran Total</b>	<b>12</b>

Fuente. Elaboración propia. A partir de datos de la Secretaria de Movilidad



Figura 26. Tramo 1(Calle 6 – Diag. 7), (Tramo 2 Calle 51 – Calle 53)  
 Fuente. Elaboración propia. A partir de mapas de IDECA.gov

### 5.6.1 Escenario 1. Sin ninguna mejora en Tramos

Tramos sin ninguna mejora considerando los cambios los de operación habitual Tramo Calle 6 – Diag 7, Tramo Calle 51 – Calle 53

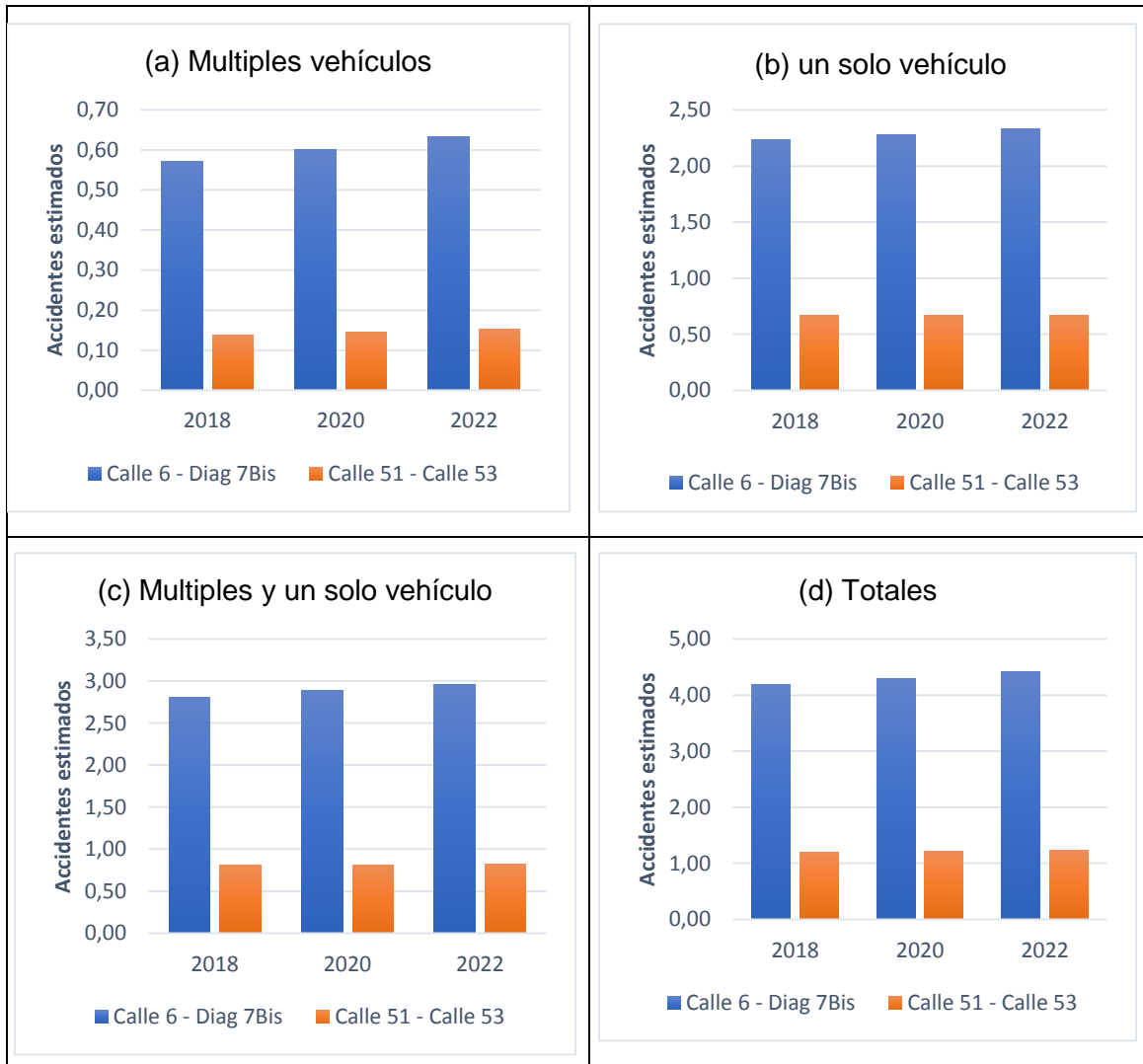


Figura 27. Escenario 1 y estimación de accidentes para Tramo 1(Calle 6 – Diag. 7), (Tramo 2 Calle 51 – Calle 53)  
Fuente. Elaboración propia.

La figura 28 presenta los resultados para el escenario 1. En este podemos observar que, dependiendo de las condiciones propias de cada tramo, el estimado de frecuencias de accidentes cambia para todas las tipologías de accidente consideradas. En general se

observa que el tramo comprendido entre Calle 51 y Calle 53 se estima una frecuencia de accidentes del 25% de la presentada por el tramo de la avenida Caracas entre Calle 6 y Diagonal 7Bis (Figura 28 d).

### 5.6.2 Escenario 2. Fricción del pavimento en Tramos Seleccionados

Basado en el escenario 1 y aumentando la fricción del pavimento habitual Tramo Calle 6 – Diag 7, Tramo Calle 51 – Calle 53

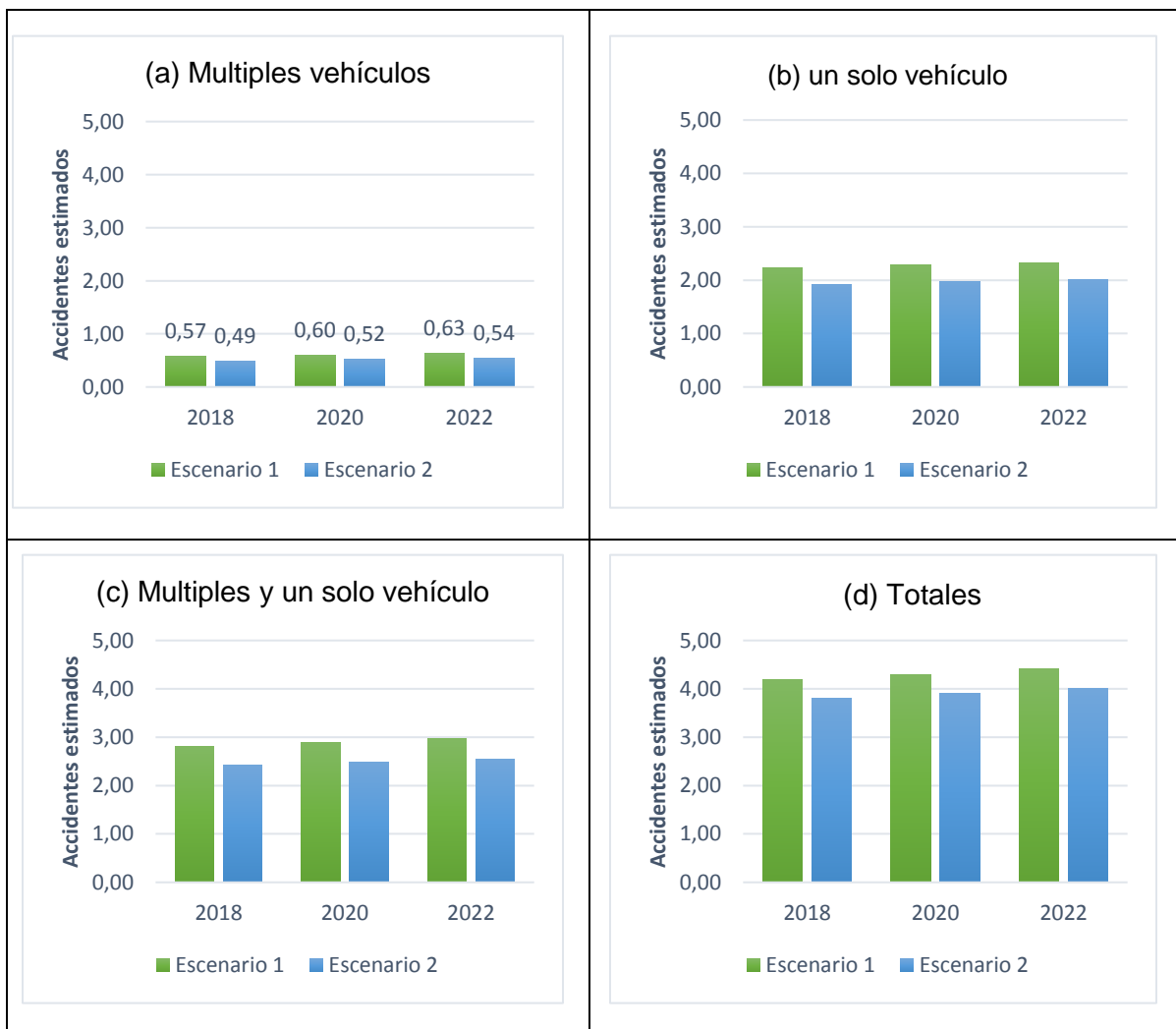


Figura 28. Escenario 2 y Evaluación de Escenario 1 para Tramo 1(Calle 6 – Diag. 7), (Tramo 2 Calle 51 – Calle 53)  
Fuente. Elaboración propia.



La figura 29 presenta el efecto de aplicar el tratamiento indicado para el tramo de las caracas entre Calle 6 y Diagonal 7Bis. Estos resultados permiten observar que la medida de aumentar la fricción en el pavimento (Escenario 2) permite una reducción en los índices de accidentes en promedio del 10%.

### 5.6.3 Escenario 2. Para todos los Tramos

Basado en el escenario 1 y aumentando la fricción del pavimento habitual para todos los tramos.

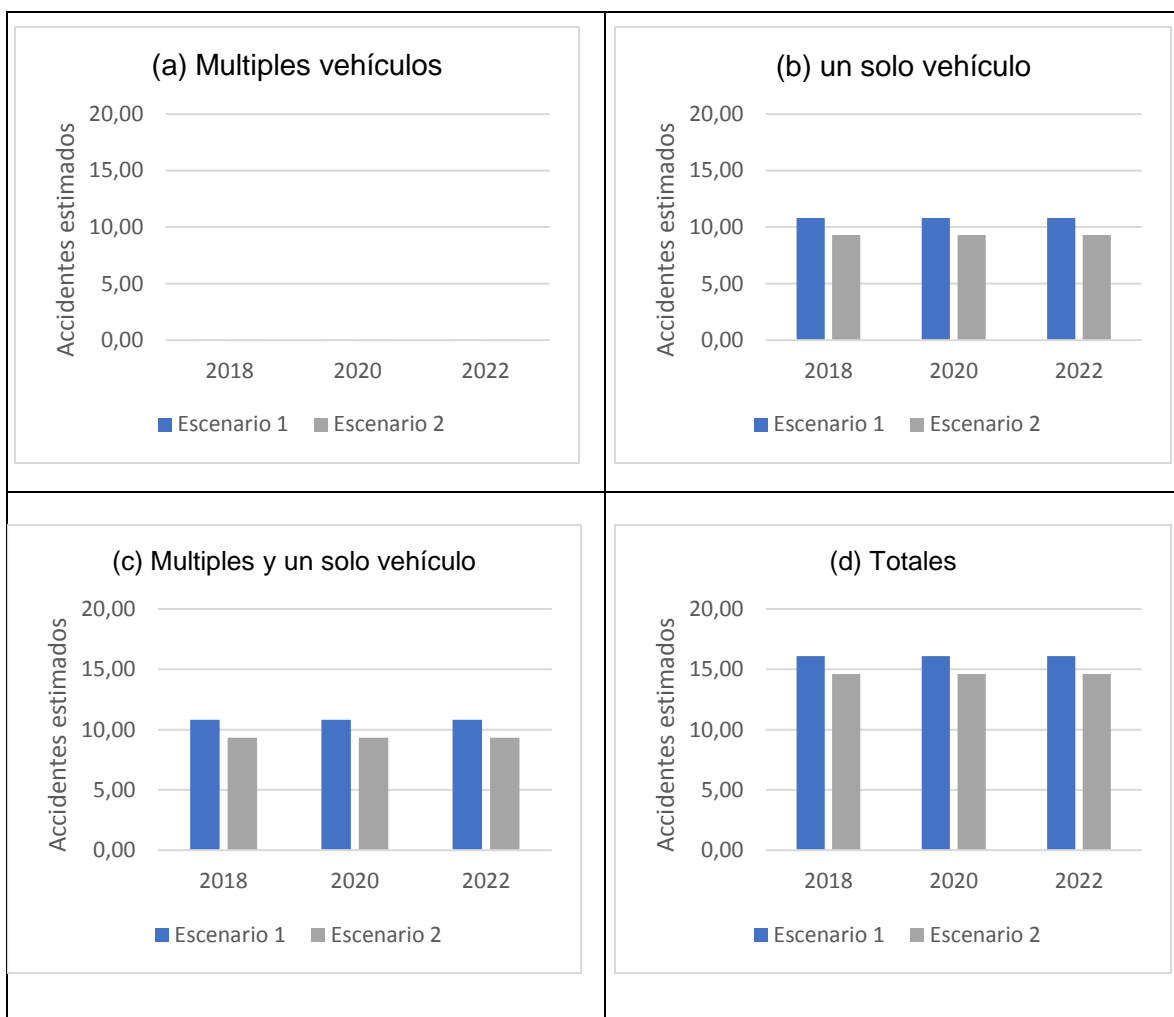


Figura 29. Escenario 2, Escenario 1 para todos los tramos del corredor Av Caracas  
Fuente. Elaboración propia.

La estimación de la frecuencia de accidentes para todos los tramos del corredor en estudio considerando la alternativa se presenta en la figura 5. Al incrementar la fricción del pavimento una reducción en el 9% de los accidentes por año. Se observa además que la probabilidad de choques de vehículos múltiples dentro de los tramos es casi inexistente debido a la segregación que tiene el carril del Transmilenio de los otros vehículos y, los controles de operación por parte de los conductores del BRT.

En el caso de las intersecciones los dos puntos de análisis que se muestran corresponden al cruce de la avenida Caracas con la calle 6 y avenida Caracas con la calle 63.



Figura 30. Localización intersecciones, Av Caracas con Calle 6 y Av Caracas con Calle 63  
Fuente. Elaboración propia.

### 5.6.4 Escenario 3. Para todas las Intersecciones sin mejoras solo el incremento del AADT

Método aplicado a Intersecciones, lugares sin ninguna mejora considerando los cambios los de operación habitual (incremento del AADT y velocidad de operación del BRT).



Figura 31. Escenario 3, intersecciones Av Caracas con Calle 6 y Av Caracas con Calle 63  
Fuente. Elaboración propia.

La figura 32 presenta los resultados para el escenario 3 (sin modificaciones en el corredor). En este podemos observar que, dependiendo de las condiciones propias de cada intersección, el estimado de frecuencias de accidentes cambia para todas las tipologías consideradas. Esta situación es más evidente para los accidentes esperados de un solo vehículo (Figura 32b).

### 5.6.5 Escenario 4. En la Calle 6 aumentando la fricción del pavimento.

Aplicado solo a la Intersección de la Calle 6, basado en el escenario 3 y aumentando la fricción del pavimento.

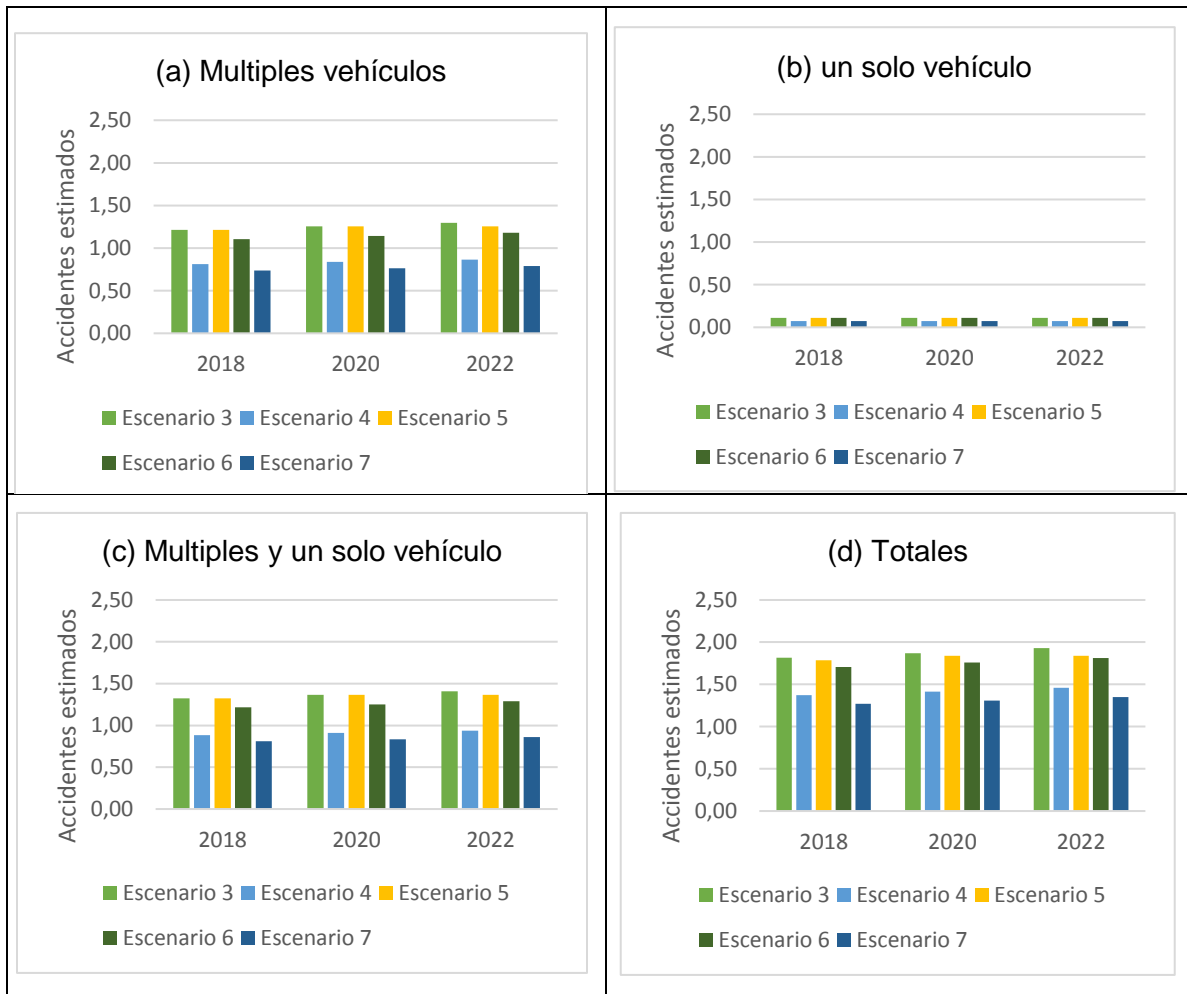


Figura 32. Escenario 4, intersección Av Caracas con Calle 6  
Fuente. Elaboración propia.

La figura 33, presenta el efecto de aplicar los tratamientos indicados para la intersección de las caracas con calle 6. Estos resultados permiten observar que la medida de aumentar la fricción en el pavimento (Escenario 4) permite la mayor reducción en los índices de accidentes.

### 5.6.6 Escenario 7. Combinando los escenarios 3 a 6.

Para todas las intersecciones del corredor Avenida Caracas.

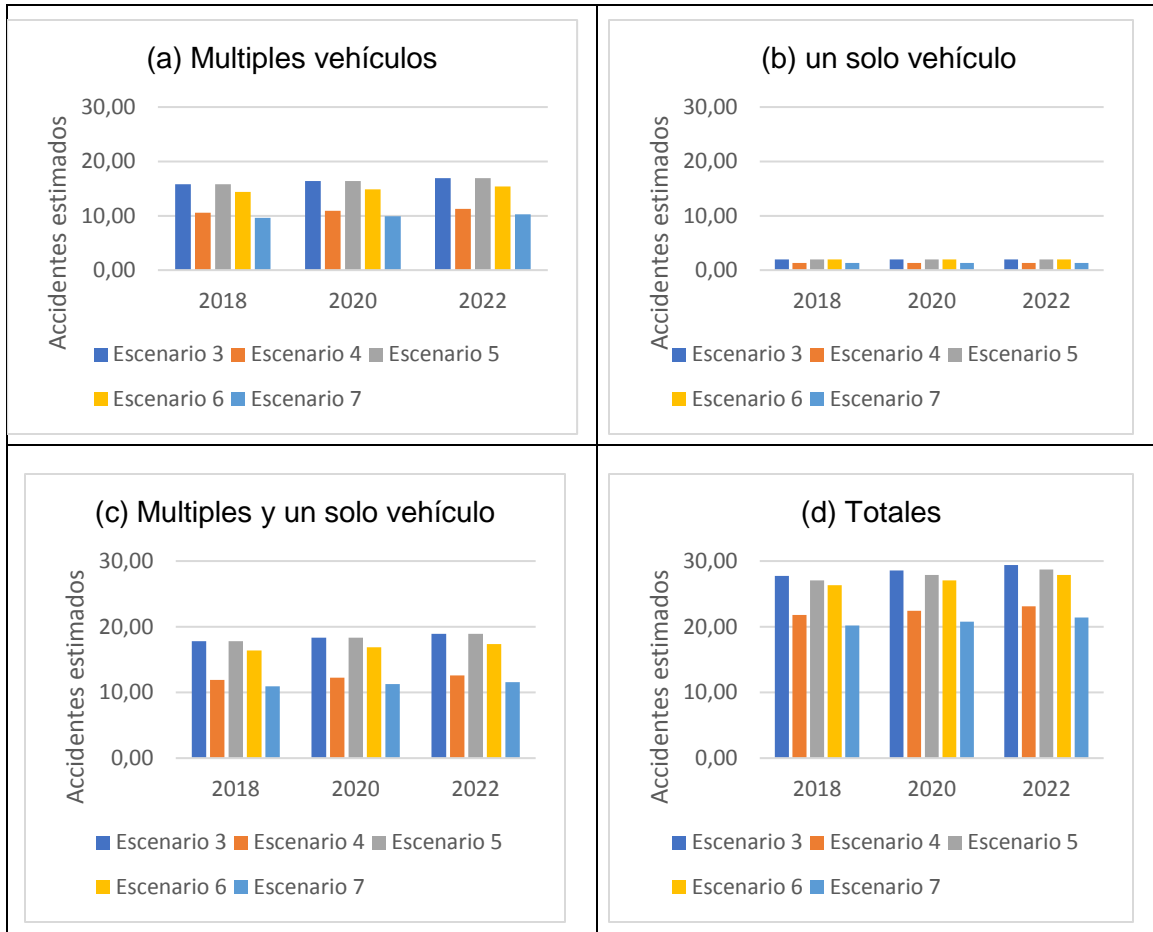


Figura 33. Escenario 7, para todas las intersecciones de la Av Caracas

Fuente. Elaboración propia.

La estimación de la frecuencia de accidentes para las intersecciones en el tramo de estudio para cada una de las alternativas se presenta en la figura 34 (es decir, si se implementaran todas las mejoras en cada una de las intersecciones). Como es de esperar la mayor reducción se logra al combinar las tres medidas propuestas. Sin embargo, también es claro que la mayor contribución se logra al incrementar la fricción del pavimento con una reducción en el 35% de los accidentes en cada año, seguido por la instalación de cámara de luz roja (9%).

## 5.7 Conclusiones y Recomendaciones Capítulo V

- Se identifica que el comportamiento del modelo de las SPFs para tramos es muy diferente al que presentan las intersecciones, primando en el primero caso los accidentes de un solo vehículo (asociado con la causa más general de este tipo de accidente, es decir, caída de ocupante). En contraste, en las intersecciones, debido a la interacción entre el BRT y los vehículos partículas, peatones y bicicletas la cantidad de accidentes de múltiples vehículos es mucho mayor que de un solo vehículo.
- Las diferentes medidas evaluadas tanto en tramos de vía como en intersecciones permiten evidenciar algunas de las mejoras en la seguridad vial que se puede lograr dentro de los carriles exclusivos del BRT. Esta información junto con un análisis económico permite determinar la viabilidad de implementar este tipo de soluciones a futuro. Se recomienda evaluar muchas otras alternativas, incluyendo todas aquellas que han sido aplicadas al Transmilenio como son las barreras arquitectónicas para evitar el paso de peatones en los tramos de vía. Además, realizar un estudio con otros parámetros como la velocidad de operación media de los BRT en cada tramo y/o intersección para determinar los efectos de la variación de la misma.

## Conclusiones y Recomendaciones

El análisis de la base de datos de accidentalidad suministradas por la secretaria de Movilidad de la ciudad de Bogotá permitió estudiar la distribución de choques de buses articulados y biarticulados en cada uno de los corredores que componen el sistema de BRT. Un total de 2172 accidentes fueron reportados entre los años 2012 a 2017. Se encontró que el corredor de la avenida Caracas presenta el mayor número de accidentes (456 en total), donde el 74%, 5% y 21% de estos accidentes corresponden a las categorías de heridos, muertos y solo daños respectivamente.

Se aplicó el modelo general de predicción de accidentes del HSM (2010) Capítulo 12 para vías Urbanas y Suburbanas para esto se determinaron las condiciones base tanto geométricas como de operación de tráfico del corredor “Caracas” en toda su extensión y una parte del corredor “Caracas Sur – Usme” (entre las calles 11Sur y la calle 6), los factores de modificación de accidentes que aplican y los registros de accidentalidad y volúmenes de tráfico suministrados por la secretaria de Movilidad de la ciudad. Se realizó la calibración del modelo usando las funciones de desempeño de la seguridad del HSM y se desarrollaron también las funciones específicas para las condiciones del BRT usando un modelo binomial negativo. Mediante la validación se encontró que estas últimas funciones de desempeño de seguridad presentan un mejor ajuste que las presentadas en el HSM y son las que se recomiendan para estimar la frecuencia de accidentes del BRT de la ciudad.

Se evaluaron y analizaron algunos cambios como el aumento de fricción en el pavimento, la instalación de señales de cuenta regresiva peatonal y la instalación de cámaras de luz roja en las intersecciones. Encontrando que se pueden lograr reducciones de 9% y 35% para tramos de vía e intersecciones respectivamente. Estas diferencias en las reducciones de accidentes se deben a la diferencia del comportamiento de la accidentalidad en cada situación. En los tramos la mayor parte de los accidentes involucran un solo vehículo mientras que en las intersecciones son los de múltiples vehículos por la naturaleza del conflicto que se genera en estos puntos. Estas diferencias son bien establecidas en las

funciones de desempeño de la seguridad desarrolladas para cada caso (tramos o intersecciones).

Un análisis económico que permita determinar la viabilidad de implementar el tipo de soluciones evaluadas para mejorar la seguridad vial es recomendado al igual que evaluar otras alternativas que permitirán definir lineamientos sobre las mejoras que se pueden implementar en el desempeño seguro del BRT de Bogotá en los próximos años. Adicionalmente, los modelos desarrollados pueden ser usados para estimar la accidentalidad esperada en nuevos corredores que se deseen implementar y que manejen unas condiciones similares de operación y diseño al corredor estudiado para el BRT de Bogotá.

Este estudio es un primer paso hacia la consolidación de SPFs para aplicar a corredores de BRTs que están sobre las vías principales de la ciudad y usan un sistema de carril exclusivo de todos los demás sistemas de transporte (tanto público o privado) o de movilidad (e.g. ciclorutas). Esta limitado a la cantidad de datos disponibles tanto de accidentalidad como de operación y/o geometría del corredor. Para darle continuidad a este estudio se recomienda:

- Acceder a los croquis de accidentes para construir una base de datos con la reconstrucción de la tipología de accidentes con un alto grado de precisión y complementar los reportes de accidentalidad aportados por la secretaría de movilidad (e.g. accidentes por giro prohibido, por cambio brusco de carril, etc). Esta información permitirá considerar nuevas variables dentro del modelo de las SPFs o determinar relaciones más concretas entre las mismas.
- Cómo segunda medida se propone realizar un proyecto de investigación en el que se realice un levantamiento y/o consulta de los registros y/o mediciones de velocidad en cada tramo e intersección del sistema para establecer perfiles de velocidad sobre todo en las cercanías y salidas de estaciones. Con estas mediciones no solo se pretende involucrar la velocidad específica dentro de las SPFs si no también, establecer los posibles cambios de velocidad y señales de aviso que se podrían instalar para reducir los riesgos de accidentes.



- Consolidar una encuesta de los operarios de los BRTs para conocer la percepción sobre la seguridad vial, registrar los elementos que hacen parte de la capacitación y evaluación de conductores y si es posible, acceder a los resultados de pruebas de conducción. Esta información permitirá incorporar el factor humano dentro de los análisis de seguridad y simulaciones del sistema de BRTs.
- Acceder a los detalles de los cambios únicos que se implementado en el BRT de Bogotá como, por ejemplo, las barreras para peatones implementadas en muchas de las estaciones de la avenida Caracas, con la finalidad de cuantiar el efecto en la seguridad de estas en una ventana mínima de tres años y de esta manera establecer factores de modificación de accidentes propias del sistema. El tipo de intervenciones mencionadas previamente, son generalmente exclusivas de este tipo de sistema de carril exclusivo y por tanto, de manera similar a lo reportado Harkey (2008) en vías de los Estados Unidos, no se han encontrado reportes y/o evidencias de acceso público sobre el efecto en la seguridad vial.

## Bibliografía

Alcaldía Mayor, Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá (2005). Manual de auditorías de seguridad vial: estrategias para contribuir a la disminución de los índices de accidentalidad vial en la ciudad de Bogotá.

HSM (2010). Highway safety manual (Vol. 1). AASHTO. National Research Council (US). Transportation Research Board. Task Force on Development of the Highway Safety Manual, & Transportation Officials. Joint Task Force on the Highway Safety Manual. (2010).

Baamonde Roca, A., & Pérez Pérez, I. (2013). Estimación de accidentes en carreteras convencionales de dos carriles según el Manual de Seguridad Vial norteamericano. Carreteras: revista técnica de la Asociación Española de la Carretera, (189), 18-27.

Bonells, C. F. U., & Quintana, H. A. R. (2010). Relación entre el espacio público y la infraestructura de un sistema de transporte masivo: Caso TransMilenio en Bogotá. Studiositas, 5(2), 37-48.

Brimley, B., Saito, M., & Schultz, G. (2012). Calibration of Highway Safety Manual safety performance function: development of new models for rural two-lane two-way highways. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (2279), 82-89.

Cendales, J. A. (2014). El impacto funcional del sistema de transporte urbano masivo en la estructura urbana de la ciudad de Bogotá caso de estudio avenida caracas entre las estaciones calle 45 y calle 76 (Master's thesis).

CMF Clearinghouse (2017). U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration and maintained by the University of North Carolina Highway Safety Research Center Fecha de consulta: 4 de septiembre de 2017. Disponible en <http://www.cmfclearinghouse.org/>

David L. Harkey. (2008). Accident modification factors for traffic engineering and ITS improvements (Vol. 617). Transportation Research Board.

Djeri, T. (2010). Incidencia del tránsito en la seguridad vial de las carreteras de dos carriles de interés nacional en la provincia de Villa Clara (Doctoral dissertation, Universidad Central" Marta Abreu" de las Villas).

Duduta, N., Adriaola, C., Wass, C., Hidalgo, D., Lindau, L., & John, V. S. (2015). Traffic safety on bus priority systems: recommendations for integrating safety into the planning, design, and operation of major bus routes.

El Espectador (2016) "SITP, más de 11 mil accidentes en los últimos cinco años". Publicado el 7 Jun 2016. Fecha de consulta: 7 de octubre de 2017. Disponible en: <https://www.elespectador.com/noticias/bogota/viajar-sitp-seguro-articulo-636482>

Gómez, F., & Bocarejo, J. P. (2015) Accident prediction models for bus rapid transit systems: generalized linear models compared with a neural network. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2512), 38-45.

Global BRT Data (2017). *Across Latitudes and Cultures - Bus Rapid Transit (ALC-BRT)*, financed by the Volvo Research and Educational Foundations (VREF), Santiago, Chile. Fecha de consulta: 7 de julio de 2017. Disponible en: <https://brtdata.org/>

Hauer, E. (1999). *Safety in geometric design standards*. University of Toronto, Department of Civil Engineering.

Hakkert, A. S., & Gitelman, V. (2014). Thinking about the history of road safety research: Past achievements and future challenges. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 25, 137-149.

Hidalgo, D., & Gutiérrez, L. (2013) BRT and BHLS around the world: Explosive growth, large positive impacts and many issues outstanding. *Research in Transportation Economics*, 39(1), 8-13.

Hook, W. (2009). Bus rapid transit: a cost-effective mass transit technology. *EM magazine*, 26-30.

Hook, W. (2005) Institutional and regulatory options for bus rapid transit in developing countries: Lessons from international experience. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. (1939), 184-191.

Hurtado, A., Torres, A., & Miranda, L. (2011). The Integrated Mass Transit Systems Program in Colombia: an Example of Recentralization of the Cities' Management?. *Territorios*, (25), 95.

Keong-Goh, K.C., Currie, G., Sarvi, M. and Goh, D.L. (2013) Road safety benefits from bus priority: an empirical study. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2352,; 41-49. DOI: 10.3141/2352-05.

Mattar-Habib, C., Polus, A., and Farah, H. (2008) "Further Evaluation of the Relationship between Enhanced Consistency Model and Safety of Two-Lane Rural Roads in Israel and Germany". *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 8, 320-332.

Mohan, D., Tiwari, G., & Khayesi, M. (2008). *Prevención de lesiones causadas por el tránsito*. Manual de capacitación. Organización Mundial de la Salud y Organización Panamericana de la Salud.

National Research Council (2010). Transportation Research Board. Task Force on Development of the Highway Safety Manual, & Transportation Officials. Joint Task Force on the Highway Safety Manual. Highway safety manual (Vol. 1). AASHTO.

Lu, J., Haleem, K., Gan, A., & Alluri, P. (2014). Safety Performance Functions for Florida's Freeways. In T&DI Congress 2014: Planes, Trains, and Automobiles (pp. 321-331).

Khan, S., Shanmugam, R., & Hoeschen, B. (1999). Injury, fatal, and property damage accident models for highway corridors. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1665), 84-92.

Kraus, J. F., Anderson, C. L., Arzemanian, S., Salatka, M., Hemyari, P., & Sun, G. (1993). Epidemiological aspects of fatal and severe injury urban freeway crashes. Accident Analysis & Prevention, 25(3), 229-239.

Pardo, C. F. (2005). Salida de emergencia: reflexiones sociales sobre las políticas del transporte. Universitas Psychologica, 4(3).

Peden M, McGee K, Sharma G. (2002) The injury chart book: a graphical overview of the global burden of injuries. Geneva: World Health Organization.

Peden M, Scurfield R, Sleet D, et al., editores. (2004) World report on road traffic injury prevention. Geneva: World Health Organization.

Ramírez, S., Ruiz, Y. (2016). Validación de la aplicabilidad de la metodología del Highway Safety Manual-2010 (HSM-2010) para la predicción del número de accidentes de tránsito en vías multicarril en la ciudad de Bogotá. XIX Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito (Panam), Ciudad de México (México), septiembre 28-30.

Santos-Reyes, J., Avalos-Bravo, V., & Rodriguez-Rojas, E. (2014). Accident analysis of a transport system: the case of the bus rapid transit system in Mexico City. Proceedings of the Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM, 12.

Silva Aparicio, L. (2010). El impacto del transporte en el ordenamiento de la ciudad: el caso de Transmilenio en Bogotá. territorios, (22).

SIMUS, (2012) Nuevo Manual de Seguridad Vial puede salvar vidas en los carriles de buses, visitado 6 dic de 2017, disponible en <http://alasiswa.org/noticias/333/nuevo-manual-de-seguridad-vial-puede-salvar-vidas-en-los-carriles-de-buses/>

Srinivasan, R., Carter, D., & Bauer, K. (2013). Safety performance function decision guide: SPF calibration vs SPF development. Federal Highway Administration–Office of Safety Report.

## **Anexos**

- Anexo 1. Base de Datos Secretaria de Movilidad 2012 a 2017
- Anexo 2. Accidentes en el Sistema TransMilenio por Distribución
- Anexo 3. Corredores con Mayor Accidentalidad BRT
- Anexo 4. Información Base para Tramos e Intersecciones
- Anexo 5. Predicción de Accidentes HSM 2010 Capitulo 12 Tramos e Intersecciones
- Anexo 6. Algoritmo en Matlab para SPFs
- Anexo 7. Volúmenes de Trafico para la Av. Caracas