

**ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DEL DISEÑO GEOMÉTRICO EN UNA
CARRETERA DE DOS CARRILES EN TERRENO LLANO DESDE KM (12+938)
VÍA LA FORTUNA HASTA EL KM (19+473) VÍA LA LIZAMA EN AMBOS
SENTIDOS EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER**

JOSE IGNACIO ARIAS MEZA

IVONNE CRISTINA REMOLINA TIRADO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA – SECCIONAL BUCARAMANGA

ESCUELA DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

BUCARAMANGA

2018

**ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DEL DISEÑO GEOMÉTRICO EN UNA
CARRETERA DE DOS CARRILES EN TERRENO LLANO DESDE KM (12+938)
VÍA LA FORTUNA HASTA EL KM (19+473) VÍA LA LIZAMA EN AMBOS
SENTIDOS EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER**

JOSE IGNACIO ARIAS MEZA

IVONNE CRISTINA REMOLINA TIRADO

Proyecto de grado presentado como requisito para optar por al título de:

INGENIERO(A) CIVIL

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ricardo Pico Vargas', is centered on the page. The signature is written in a cursive style with a large initial 'R'.

DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. MSc. RICARDO PICO VARGAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA – SECCIONAL BUCARAMANGA

ESCUELA DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2018

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Presidente del Jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Septiembre de 2018

Copyright © 2018 por Jose Ignacio Arias Meza-Ivonne Cristina Remolina Tirado.
Todos los derechos reservados.

DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de llegar hasta este punto y permitirme gozar de la unión de mi familia para culminar este objetivo, por su infinito amor, bondad y misericordia, acompañándome en cada paso que doy, fortaleciendo mi corazón e iluminando mi mente en cada instante durante todo el periodo de estudio.

A mis padres Néstor Jesús Arias Peñaranda y Mery Meza Castellanos por darme la vida y la oportunidad de ser un profesional, por sacarme adelante con su incondicional apoyo, consejos, valores, su constante motivación, los ejemplos de entrega, superación, perseverancia y unión que siempre los ha caracterizado, la paciencia que han tenido para tolerarme a lo largo de este camino, el amor que me dan, los cuidados durante todo este tiempo juntos, porque en gran parte es a ustedes que hoy puedo culminar este sueño, estando siempre ahí e impulsándome en los momentos difíciles, estoy inmensamente feliz de nacer en el seno de este hogar y admiro su fortaleza y entrega de cuerpo y alma hacia mí.

A mi hermana Deyssy Catherine Arias Meza por ser un gran ejemplo de hermana mayor a quien admiro por su paciencia, entrega, perseverancia y apoyo incondicional en los momentos difíciles.

A mi compañera de vida Ivonne Cristina Remolina quien ha sido incondicional desde el inicio de este proceso, quien con por su paciencia, amor, comprensión y perseverancia fue principalmente mi polo a tierra en los momentos más difíciles de mi vida y carrera, quien con su apoyo y consejos logró guiarme en mi camino como profesional.

A mis maestros quienes se han tomado el trabajo de transmitir sus conocimientos, especialmente en el campo de topografía, vías, pavimentos, hidráulica, suelos y en general de todos los docentes a lo largo de mi carrera de quienes me llevo un recuerdo muy especial.

JOSE IGNACIO ARIAS MEZA

DEDICATORIA

A Dios por iluminarme en el transcurso de esta etapa de mi vida, por darme la sabiduría, la fortaleza y el entendimiento necesario para superar cada obstáculo, por concederme salud y por todos estos años de vida que me ha dado.

En especial dedico este logro a mis padres Luis Enrique Remolina Cepeda y Alix Tirado Bustamante por su amor, por ser mi eterno apoyo incondicional, porque siempre han estado ahí en mis momentos difíciles y en mis alegrías, por cada consejo que me han dado para guiarme por un buen camino, por formarme con buenos valores y principios para ser una mujer ética que pueda contribuir algo positivo a la sociedad y también por darme la oportunidad de estudiar una carrera profesional.

A mis hermanas Dannys Dideth Remolina Tirado y Adriana Lorena Remolina Tirado por ayudarme y motivarme en cada paso que he dado, porque han sido mi compañía y mi apoyo tanto profesional como emocional y por ser mi ejemplo en muchos aspectos.

A Jose Ignacio Arias Meza, mi compañero de tesis, de estudio y de vida, por ser una pieza fundamental en todo este trayecto, por todo el apoyo y entrega que me ha brindado, por estar conmigo en las buenas y en las malas, por su amor y compañía y porque es una persona que me ha demostrado tantas cosas que entre eso es el hacerme feliz.

A todos ellos dedico este primer logro

IVONNE CRISTINA REMOLINA TIRADO

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, queremos darle gracias a Dios por permitirnos llegar hasta este punto de nuestra vida profesional, por darnos la vida, la salud, la sabiduría y la fortaleza necesaria para salir adelante.

Los más sinceros agradecimientos a nuestros padres que han sido nuestro apoyo incondicional a lo largo de este proceso, por darnos la vida, por cada consejo y cada palabra de motivación, gracias por cada esfuerzo y entrega que nos dieron, gracias por formarnos con muy buenos valores, por darnos el ejemplo y ser esos excelentes padres que Dios nos ha podido dar.

Gracias a nuestro director de proyecto Ricardo Pico Vargas quién nos brindó de la mejor forma su conocimiento en las clases y durante la realización del presente proyecto, gracias por habernos guiado e inspirado como estudiantes a escoger esta rama de la ingeniería civil.

A los docentes Jherson Suarez y Luis Carlos Caicedo por su colaboración y disposición que fueron fundamentales para el complemento de este proyecto.

A nuestros compañeros con los que compartimos diferentes momentos, donde nos apoyamos, ayudamos y fortalecimos debilidades mutuamente.

A la Universidad Pontificia Bolivariana por tener docentes de alto conocimiento que nos fueron formando, exigiendo y enseñando para buscar la excelencia de los estudiantes, también dar gracias a la UPB por todas las instalaciones y equipos prestados.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1. GENERALIDADES	2
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2 JUSTIFICACIÓN	3
1.3 OBJETIVOS.....	5
1.4 METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.5 ESTADO DEL ARTE	7
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Definiciones de Velocidad	9
2.1.1 Velocidad de Diseño (VTR):.....	9
2.1.2 Velocidad Específica (Ve):	9
2.1.3 Velocidad de Operación:.....	11
2.1.4 Velocidad de Punto:.....	11
2.2 METODOLOGÍAS DE TOMAS DE DATOS	12
2.2.1 Toma de datos para restitución de la geometría de la vía	12
2.2.1.1 Imágenes de satélite de alta resolución	12
2.2.1.2 Utilización de datos procedentes de GPS	14
2.2.2 Toma de datos relacionados con factor humano y vehículo.....	16
2.2.3 Toma de datos de velocidades	17
2.2.3.1 Toma de datos puntuales	18
2.2.3.2 Toma de datos continuos	21
2.3 FACTORES QUE AFECTAN LA VELOCIDAD.....	23
2.3.1 Factores externos a la vía	23
2.3.1.1 Condicionantes meteorológicos.....	23
2.3.1.2 El entorno	24
2.3.1.3 El factor humano	25
2.3.1.4 El vehículo.....	25
2.3.2 Factores internos de la vía	25

2.3.2.1 Clase funcional de la vía.....	26
2.3.2.2 Densidad de accesos	26
2.3.2.3 Sección transversal	27
2.3.2.4 Visibilidad disponible	27
2.3.2.5 Características geométricas.....	28
2.3.2.5.1 Radio de la curva horizontal.....	29
2.3.2.5.2 Longitud de la recta	30
2.3.2.5.3 Pendientes Longitudinales	30
2.4 MODELOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN	31
2.4.1 Modelos para la estimación de velocidades de operación en curvas horizontales.....	32
2.4.2 Modelos para la estimación de velocidad de operación en rectas	34
2.4.3 Modelos para la estimación de las variaciones de velocidad en las transiciones recta-curva.....	37
2.5 PERFIL DE VELOCIDAD DE OPERACIÓN.....	38
2.6 CONSISTENCIA DE UNA VÍA.....	39
3. METODOLOGIA.....	41
3.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL PROYECTO.....	41
3.2 ASPECTOS TECNICOS DEL TRAMO	43
3.2.1 Diseño Geométrico	43
3.2.1.2 Tramo vial PR00+00 vía la fortuna hasta PR14+00 Peaje rio Sogamoso.....	43
3.2.1.3 Tramo vial El retén PR01+00 hasta La Lizama PR30+00.....	44
3.2.2 Tránsito.....	44
3.2.3 Accidentalidad	46
3.3 RECOPIACIÓN DE DATOS.....	50
3.3.1 Datos recolectados de la geometría del tramo en estudio.....	50
3.3.2 Datos de la velocidad de operación en el tramo de estudio	50
3.3.3 Medios de recolección de datos	51

3.3.4 Elementos prácticos utilizados para la recolección de datos	54
3.4 DESARROLLO DE DATOS RECOLECTADOS	58
3.4.1 Pasos conversión formato Vbo a Kml.....	59
3.4.2 Pasos conversión formato Kml a Dwg con coordenadas Bogotá Colombia.	60
3.4.3 Diseño vial.....	62
3.4.4 Calculo velocidad de operación v85 con Matemática 11	63
4 RESULTADOS	64
4.1 Velocidad específica de las curvas horizontales.....	64
4.2 Velocidad de operación de las curvas horizontales	67
4.3 Comparación de la velocidad de operación con la velocidad específica de las curvas horizontales.....	68
4.4 Comparación de la velocidad de operación (V85) con la velocidad de operación por el método de Lamm.	71
4.5 Accidentalidad	75
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	78
5.1 Velocidad específica	78
5.2 Velocidad de operación.....	78
5.2.1 Desviación estándar	78
5.2.2 Comparación entre la velocidad de operación y la velocidad específica de las curvas horizontales.	79
5.2.3 Comparación entre la velocidad de operación y la velocidad de operación de Lamm et al. de las curvas horizontales.	92
5.3 Análisis de perfiles de velocidad continuos	106
5.4 Relación curvas consistencia pobre con datos reales de accidentalidad.....	108
6 CONCLUSIONES	120
7. RECOMENDACIONES	123
BIBLIOGRAFIA	124
ANEXOS	129

Lista de tablas

Tabla 1 Velocidad específica de una curva horizontal VCH, incluida en un tramo homogéneo con velocidad de diseño VTR	11
Tabla 2 Modelos para el cálculo de operación en función del trazado en planta...	33
Tabla 3 Criterio I de Lamm.....	40
Tabla 4 Criterio II de Lamm.....	40
Tabla 5 Aspectos Geométricos relevantes del tramo vial PR00+00 vía la fortuna hasta PR14+00 Peaje rio Sogamoso	43
Tabla 6 Aspectos relevantes del Tramo vial El retén PR01+00 hasta La Lizama PR30+00	44
Tabla 7 Histórico Tránsito Promedio Diario (TPD) 2016, tramo La Lizama-Barrancabermeja	45
Tabla 8 Histórico Tránsito Promedio Diario (TPD) 2016, tramo La Lizama-La Renta	45
Tabla 9 Tramo La Lizama – Barrancabermeja.....	46
Tabla 10 Tramo LA LIZAMA – LA RENTA	46
Tabla 11 Total de víctimas año 2017.....	47
Tabla 12 Total de víctimas año 2018.....	48
Tabla 13 Sentidos de los recorridos	52
Tabla 14 Resultados encuestas a conductores	53
Tabla 15 Error posible en el dispositivo Vbox lite	55
Tabla 16 Velocidad específica de las curvas horizontales sentido Bucaramanga-Barrancabermeja	65
Tabla 17 Velocidad específica de las curvas horizontales sentido Barrancabermeja-Bucaramanga.....	66
Tabla 18 Velocidad de operación de las curvas horizontales, Bucaramanga-Barrancabermeja	67
Tabla 19 Velocidad de operación de las curvas horizontales, Barrancabermeja-Bucaramanga.....	68

Tabla 20 Criterio I Lamm et al., Bucaramanga-Barrancabermeja	69
Tabla 21 Criterio I Lamm, Barrancabermeja-Bucaramanga	70
Tabla 22 Criterio II Lamm, Bucaramanga-Barrancabermeja	70
Tabla 23 Criterio II Lamm, Barrancabermeja-Bucaramanga.....	71
Tabla 24 Criterio I comparación velocidad de operación (V85) y la velocidad de operación por el método de Lamm (V85Lamm) sentido Bucaramanga-Barrancabermeja	72
Tabla 25 Criterio I comparación velocidad de operación (V85) y la velocidad de operación por el método de Lamm (V85Lamm) sentido Barrancabermeja-Bucaramanga.....	73
Tabla 26 Criterio II comparación velocidad de operación (V85) y la velocidad de operación por el método de Lamm (V85Lamm) sentido Bucaramanga-Barrancabermeja	74
Tabla 27 Criterio II comparación velocidad de operación (V85) y la velocidad de operación por el método de Lamm (V85Lamm) sentido Barrancabermeja-Bucaramanga.....	75
Tabla 28 Accidentes año 2017	76
Tabla 29 Accidentes año 2018	77
Tabla 30 Diferencia de velocidades de las curvas horizontales en sentido Bucaramanga-Barrancabermeja.....	79
Tabla 31 Diferencia de velocidades de las curvas horizontales en sentido Barrancabermeja-Bucaramanga.....	80
Tabla 32 Evaluación de consistencia de las curvas horizontales según criterio I - Bucaramanga-Barrancabermeja.....	81
Tabla 33 Análisis consistencia del tramo desde la variable “Longitud” con sentido Bucaramanga-Barrancabermeja Criterio I.....	82
Tabla 34 Evaluación de consistencia de las curvas horizontales según criterio I Barrancabermeja-Bucaramanga.....	83
Tabla 35 Análisis, consistencia del tramo desde la variable “Longitud” con sentido Barrancabermeja-Bucaramanga criterio I	84

Tabla 36 Evaluación de consistencia de las curvas horizontales según criterio II - Bucaramanga-Barrancabermeja.....	87
Tabla 37 Análisis consistencia del tramo desde la variable “Longitud” con sentido Bucaramanga-Barrancabermeja criterio II	88
Tabla 38 Evaluación de consistencia de las curvas horizontales según criterio II Barrancabermeja-Bucaramanga.....	89
Tabla 39 Análisis consistencia del tramo desde la variable “Longitud” con sentido Barrancabermeja-Bucaramanga criterio II	90
Tabla 40 Diferencia de velocidades de las curvas horizontales en sentido Bucaramanga-Barrancabermeja.....	93
Tabla 41 Diferencia de velocidades de las curvas horizontales en sentido Barrancabermeja-Bucaramanga.....	94
Tabla 42 Evaluación de consistencia de las curvas horizontales según criterio I - Bucaramanga-Barrancabermeja.....	94
Tabla 43 Análisis consistencia del tramo desde la variable “Longitud” con sentido Bucaramanga-Barrancabermeja Criterio I.....	96
Tabla 44 Evaluación de consistencia de las curvas horizontales según criterio I Barrancabermeja-Bucaramanga.....	97
Tabla 45 Análisis consistencia del tramo desde la variable “Longitud” con sentido Barrancabermeja-Bucaramanga criterio I	98
Tabla 46 Evaluación de consistencia de las curvas horizontales según criterio II - Bucaramanga-Barrancabermeja.....	101
Tabla 47 Análisis consistencia del tramo desde la variable “Longitud” con sentido Bucaramanga-Barrancabermeja criterio II	102
Tabla 48 Evaluación de consistencia de las curvas horizontales según criterio II Barrancabermeja-Bucaramanga.....	103
Tabla 49 Análisis consistencia del tramo desde la variable “Longitud” con sentido Barrancabermeja-Bucaramanga criterio II	104
Tabla 50 Consistencia buena del criterio I relacionada con abscisas de accidente real en sentido Bucaramanga-Barrancabermeja año 2017.....	109

Tabla 51 Consistencia buena del criterio I relacionada con abscisas de accidente real en sentido Barrancabermeja-Bucaramanga año 2017.....	109
Tabla 52 Consistencia aceptable del criterio I relacionada con abscisas de accidente real en sentido Bucaramanga-Barrancabermeja año 2017	110
Tabla 53 Consistencia buena del criterio II relacionada con abscisas de accidente real en sentido Bucaramanga-Barrancabermeja año 2017.....	111
Tabla 54 Consistencia buena del criterio II relacionada con abscisas de accidente real en sentido Barrancabermeja-Bucaramanga año 2017.....	111
Tabla 55 Consistencia buena del criterio I relacionada con abscisas de accidente real en sentido Bucaramanga-Barrancabermeja año 2018.....	112
Tabla 56 Consistencia buena del criterio I relacionada con abscisas de accidente real en sentido Barrancabermeja-Bucaramanga año 2018.....	113
Tabla 57 Consistencia aceptable del criterio I relacionada con abscisas de accidente real en sentido Bucaramanga-Barrancabermeja año 2018	113
Tabla 58 Consistencia aceptable del criterio I relacionada con abscisas de accidente real en sentido Barrancabermeja-Bucaramanga año 2018	114
Tabla 59 Consistencia pobre del criterio I relacionada con abscisas de accidente real en sentido Barrancabermeja-Bucaramanga año 2018.....	114
Tabla 60 Consistencia buena del criterio II relacionada con abscisas de accidente real en sentido Bucaramanga-Barrancabermeja año 2018.....	115
Tabla 61 Consistencia buena del criterio II relacionada con abscisas de accidente real en sentido Barrancabermeja-Bucaramanga año 2018.....	116
Tabla 62 Consistencia aceptable del criterio II relacionada con abscisas de accidente real en sentido Bucaramanga-Barrancabermeja año 2018	117
Tabla 63 Consistencia aceptable del criterio II relacionada con abscisas de accidente real en sentido Barrancabermeja-Bucaramanga año 2018	118
Tabla 64 Consistencia pobre del criterio II relacionada con abscisas de accidente real en sentido Barrancabermeja-Bucaramanga año 2018.....	119

Lista de figuras

Figura 1 Metodología de la investigación	6
Figura 2 Localización de los dispositivos de medida en curva horizontal	19
Figura 3 Disposición de toma de datos para el estudio de deceleración/aceleración	20
Figura 4 Modelos de velocidades de curvas para varios países en función del radio de la curva horizontal.....	29
Figura 5 Ubicación geográfica del proyecto.....	41
Figura 6 Localización del proyecto, tramo de vía que comunica a Bucaramanga con Barrancabermeja el cual inicia en el Km 12+938 vía la fortuna hasta el Km 19+473m vía la Lizama.	42
Figura 7 Víctimas de accidentes por mes del año 2017	47
Figura 8 Víctimas de accidentes por mes del 2018.....	48
Figura 9 Eventos de accidentes año 2017	49
Figura 10 Eventos de accidentes año 2018.....	49
Figura 11 Dispositivo Video BOX Lite	56
Figura 12 Visualización de programa Vbox Tools.....	57
Figura 13 Pasos conversión formato Vbo a Kml	59
Figura 14 Pasos conversión formato Kml a DWG	60
Figura 15 Continuación pasos conversión formato Kml a DWG	61
Figura 16 Perfiles de velocidad del programa Vbox Tools	62
Figura 17 Diseño vial con AutoCAD Civil 3D.....	62
Figura 18 Pasos para calcular Velocidad de Operación (V85), Desviación Estándar y la Media Aritmética en Wolfram Mathematica	63
Figura 19 Tramo de doble calzada.....	64
Figura 20 Evaluación en porcentaje sobre la consistencia de las curvas horizontales según criterio I sentido Bucaramanga-Barrancabermeja.	81
Figura 21 Evaluación en porcentaje sobre la consistencia de las curvas horizontales según criterio I sentido Barrancabermeja-Bucaramanga	83

Figura 22 Análisis de consistencia según el criterio I Bucaramanga-Barrancabermeja	85
Figura 23 Análisis de consistencia según el criterio I Barrancabermeja-Bucaramanga.....	86
Figura 24 Evaluación en porcentaje sobre la consistencia de las curvas horizontales según criterio II sentido Bucaramanga-Barrancabermeja	87
Figura 25 Evaluación en porcentaje sobre la consistencia de las curvas horizontales según criterio II sentido Barrancabermeja-Bucaramanga	89
Figura 26 Análisis de consistencia según el criterio II Bucaramanga-Barrancabermeja	91
Figura 27 Análisis de consistencia según el criterio II Barrancabermeja-Bucaramanga.....	92
Figura 28 Evaluación en porcentaje sobre la consistencia de las curvas horizontales según criterio I sentido Bucaramanga-Barrancabermeja	95
Figura 29 Evaluación en porcentaje sobre la consistencia de las curvas horizontales según criterio I sentido Barrancabermeja-Bucaramanga	97
Figura 30 Análisis de consistencia según el criterio I Bucaramanga-Barrancabermeja	99
Figura 31 Análisis de consistencia según el criterio I Barrancabermeja-Bucaramanga.....	100
Figura 32 Evaluación en porcentaje sobre la consistencia de las curvas horizontales según criterio II sentido Bucaramanga-Barrancabermeja.	101
Figura 33 Evaluación en porcentaje sobre la consistencia de las curvas horizontales según criterio II sentido Barrancabermeja-Bucaramanga	103
Figura 34 Análisis de consistencia según el criterio II Bucaramanga-Barrancabermeja	105
Figura 35 Análisis de consistencia según el criterio II Barrancabermeja-Bucaramanga.....	106
Figura 36 Perfiles de velocidad individual continuos Bucaramanga-Barrancabermeja	107

Figura 37 Perfiles de velocidad individual continuos Barrancabermeja-
Bucaramanga..... 108

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: Análisis de consistencia del diseño geométrico en una carretera de dos carriles en terreno llano desde Km 12+938 vía la Fortuna hasta el Km 19+473 vía la Lizama en ambos sentidos en el departamento de Santander

AUTOR(ES): JOSE IGNACIO ARIAS MEZA
IVONNE CRISTINA REMOLINA TIRADO

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): RICARDO PICO VARGAS

RESUMEN

Con esta investigación se busca evaluar la consistencia de un tramo vial que comunica a Bucaramanga con Barrancabermeja, siendo esta una de las vías principales del departamento de Santander, para esto se hizo uso de la comparación de la velocidad de operación (V85) obtenida a partir del procesamiento de velocidades individuales de las curvas en el tramo de estudio vs dos velocidades, la velocidad de diseño en la norma colombiana y la velocidad de operación por el método de Lamm. De esta manera se logró obtener un análisis mediante el cual se podrá observar, que tan lejos está la velocidad de operación(V85) respecto a la velocidad de diseño y respecto a la velocidad de operación por el método de Lamm et al., y así llegar a determinar los posibles puntos de mayor accidentalidad presentes en el tramo de estudio, apoyados también en datos de accidentalidad obtenidos por los entes de control estadístico en accidentalidad de la policía tránsito de Santander y del Magdalena Medio. De los resultados se concluye que el tramo vial presenta en general una consistencia de diseño geométrico bueno, evidenciando pocos puntos con consistencia pobre, también se deduce de forma general que el método de Lamm se acerca más a las velocidades de operación. La investigación se lleva a cabo desde el Km 12+938 vía la Fortuna hasta el Km 19+473 vía la Lizama en ambos sentidos en el departamento de Santander. Para el desarrollo de esta investigación fue necesario el uso de equipos Vbox GPS los cuales a bordo de los vehículos realizaban la toma de datos durante el recorrido

PALABRAS CLAVE:

Velocidad específica, Velocidad de operación, Método de Lamm, Accidentalidad, Consistencia

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Analysis of consistency of geometric design in a two-lane road on flat terrain from km 12 + 938 towards La Fortuna to Km 19 + 473 towards La Lizama in both directions in the Department of Santander.

AUTHOR(S): JOSE IGNACIO ARIAS MEZA
IVONNE CRISTINA REMOLINA TIRADO

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: RICARDO PICO VARGAS

ABSTRACT

This research seeks to evaluate the consistency of a road section that connects Bucaramanga with Barrancabermeja, being one of the main roads of the department of Santander, It was necessary to make use of the comparison of the speed of operation (V85) obtained from the processing of individual curves speeds in the study section VS two speeds, the design speed in the Colombian standard and the speed of operation by the Lamm method. In this way, we managed to obtain an analysis by means of which it will be possible to observe, how far is the speed of operation (V85) with respect to the speed of design, and with respect to the speed of operation by the Lamm method et al., and thus to determine the possible points of greater accidentality present in the section of study, also these are supported in data of accidentality obtained by the entities of statistical control in accidents of the Transit Police of Santander and Magdalena Medio. From the results it is concluded that the road section generally presents a good geometric design consistency, evidencing few points with poor consistency, Also deduced in a general way that the Lamm method is closer to the operating speeds. The investigation takes place from the KM 12 + 938 towards La Fortuna to the KM 19 + 473 towards La Lizama in both directions in the Department of Santander. For the development of this research was necessary the use of Vbox GPS equipment, which once on board the vehicles, It carried out the data taken during the route.

KEYWORDS:

Specific speed, Speed of operation, Lamm method, Accident

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

La velocidad es una magnitud física muy significativa en el transporte terrestre pues está relacionada con la comodidad, seguridad y consumo del vehículo durante el tránsito del mismo, relaciones que nos llevan a analizar, determinar, cuantificar, controlar y regular con el fin de crear un balance entre usuario vehículo y carretera generando las condiciones de seguridad necesarias.

Entre enero y noviembre del 2017 murieron 5.803 personas en accidentes de tránsito en Colombia. Las estadísticas reportadas por el Centro de Referencia Nacional sobre Violencia del Instituto Nacional de Medicina Legal muestran que, en promedio, cada día de este año han perdido la vida 18 personas en las calles y carreteras del país.

Un informe del Observatorio Nacional de Seguridad Vial revela que, en promedio, cuatro de cada diez accidentes en Colombia dejan muertos o heridos. Desobedecer las normas de tránsito, en especial en lo que se refiere a los límites de velocidad, es el principal factor de accidentalidad en el país. [1]

Con esta investigación se busca analizar la consistencia vial comparando la velocidad de operación (V85) obtenida a partir del tramo en estudio vs dos velocidades, la velocidad específica de la norma colombiana y la velocidad de operación por el método de Lamm et al. en el tramo vial que corresponde al km 12+938 vía la Fortuna hasta el km 19+473 vía la Lizama en ambos sentidos en el departamento de Santander, complementando la investigación con el análisis de posibles puntos de accidentalidad.

Para esta investigación solo se va a considerar el vehículo liviano (automóvil); estas mediciones se toman en condiciones climáticas normales con tránsito fluido, con equipos GPS Vbox correctamente calibrados.

1. GENERALIDADES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Santander presenta estadísticas de accidentalidad preocupantes, pues a nivel nacional ocupa el cuarto puesto con 1329 accidentes de tránsito en lo que va de enero del 2018 al 29 de junio de 2018, gran parte de estos accidentes están relacionados a no guardar la distancia de seguridad entre vehículos, desobedecer señales de tránsito, exceso de velocidad y la imprudencia por parte de las personas que transitan por estas vías [2], los departamentos de tránsito de Bucaramanga y su área metropolitana están haciendo grandes esfuerzos en disminuir esta tasa de accidentalidad, aun así, los accidentes no dependen únicamente de exceso de velocidad, la consistencia vial es un factor que influye en la probabilidad de suceso de un accidente.

Para el análisis de consistencia vial que se desea desarrollar en esta investigación se hará uso de las velocidades pues estas presentan una directa relación cuando a consistencia vial nos referimos, con este análisis de datos se desea dar a conocer el acercamiento de la velocidad a la cual transitan los conductores con las velocidades de diseño en cada elemento geométrico del tramo en estudio.

Una vez el conductor ingresa a la vía, esta debe transmitir una sensación de seguridad y tranquilidad, un campo visual despejado, esto se logra cuando el trazado de la vía es lo que el conductor espera encontrar, solo entonces el manejo será tranquilo, constante y con velocidad uniforme, disminuyendo así la posibilidad de maniobras que pongan en riesgo su seguridad.

Este proyecto de grado ayudará a contribuir con el desarrollo de la investigación planteada por la Facultad de Ingeniería Civil, ya que busca mediante la comparación de la velocidad de operación (V85) obtenida a partir del tramo en estudio vs dos velocidades, la velocidad específica de la norma colombiana y la velocidad de operación por el método de Lamm et al. para obtener un análisis mediante el cual

se podrá observar, que tan lejos está la norma colombiana y el método de Lamm et al. de la realidad en cuanto a velocidad y así poder llegar a determinar los posibles puntos de mayor accidentalidad presentes en el tramo en estudio.

1.2 JUSTIFICACIÓN

En el año 2017 se reportaron 7280 muertes en Colombia debido a los accidentes de tránsito. Un informe del Observatorio Nacional de Seguridad Vial revela que, en promedio, cuatro de cada diez accidentes en Colombia dejan muertos o heridos. Desobedecer las normas de tránsito, en especial en lo que se refiere a los límites de velocidad, es el principal factor de accidentalidad en el país. [1] Esta situación puede darse debido a la inconsistencia del diseño geométrico, es decir, se refiere a que los cambios de velocidad de operación que se experimentan a lo largo de la carretera sean fuertes y que dicha velocidad difiera fuertemente de la velocidad de diseño, que se debe elegir según la función de la carretera y las expectativas del conductor. [2]

Esta necesidad ha llevado al desarrollo de los análisis en la consistencia. La consistencia del trazado puede interpretarse como la relación entre las características geométricas de una carretera y lo que espera encontrar el conductor que circula por ella. Si hay una correspondencia entre estos dos aspectos, la conducción puede hacerse de modo continuo, sin sobresaltos, lo que incide favorablemente sobre la seguridad en la circulación. Si bien hay una serie de recomendaciones desde el punto de vista geométrico para obtener trazados consistentes, esto no siempre se logra, y sólo en los últimos años se ha iniciado el estudio de metodologías para evaluar esto, tanto en vías existentes como en vías proyectadas. José Fernando Sánchez afirma que la mayor parte de estas metodologías sólo considera el trazado en planta, olvidándose del trazado en alzado y de la coordinación entre los mismos. Se desarrolló una metodología para evaluar la consistencia del trazado en carreteras interurbanas de dos carriles que considera dichos aspectos. Para ello, se hizo un análisis exhaustivo de los índices de trazado,

los cuales evalúan las características geométricas en planta y en alzado. Los índices se correlacionaron con la accidentalidad, para determinar cuál de ellos tiene mayor incidencia, encontrándose que es el cambio de curvatura vertical (VCCR); a este índice se le estableció un rango de calificación. Como elemento de evaluación complementario de análisis se seleccionó el perfil de velocidades de operación, procedimiento que ha sido probado en diferentes investigaciones, y del cual se desarrolló un modelo aplicado a Colombia. Para la coordinación de trazados en planta y alzado se evaluaron diferentes combinaciones geométricas, algunas de las cuales generaron reparaciones del trazado. Se ha definido un nuevo índice que permite determinar numéricamente la posibilidad de que se presente esta situación, indeseable desde el punto de vista de la seguridad vial. La combinación de estos tres elementos permite una evaluación integral de los diferentes aspectos que inciden sobre la consistencia del trazado de una carretera. [3]

Para dar cabalidad al desarrollo de dicha metodología se debe realizar un análisis detallado de velocidades debido a que este es un factor importante y fundamental a la hora de determinar la consistencia vial. El estudio permitirá conocer y comparar que tanto se acerca la velocidad a la que van los conductores por las carreteras con las velocidades que utilizan los diseñadores en cada elemento geométrico y con el modelo para calcular la velocidad de operación por el método de Lamm et al. y poder determinar posibles puntos de alta accidentalidad.

1.3 OBJETIVOS

GENERAL

Comparar la velocidad de operación de vehículos livianos de las curvas en el tramo de estudio vs dos velocidades, la velocidad de diseño en la norma colombiana y la velocidad de operación por el método de Lamm et al.

ESPECIFICOS

- Realizar la comparación entre la velocidad de operación (V85) obtenida a partir del procesamiento de las velocidades individuales de cada curva en el tramo de estudio con la velocidad de diseño de la norma colombiana.
- Realizar la comparación entre la velocidad de operación (V85) obtenida a partir del procesamiento de las velocidades individuales de cada curva en el tramo de estudio con la velocidad de operación por el método de Lamm et al.
- Analizar y comparar perfiles de velocidad con el fin de descifrar patrones de comportamiento similares y diferentes entre los conductores y así conocer el aparente motivo de las maniobras de velocidad a lo largo del recorrido.
- Identificar y analizar un listado detallado con posibles puntos negros de mayor accidentalidad en el tramo, apoyados en resultados del análisis de consistencia vial y en datos de accidentalidad obtenidos por medio de los entes de control estadístico en accidentalidad de la policía de tránsito de Santander y Magdalena Medio.

1.4 METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

Figura 1 Metodología de la investigación

FASES	OBJETIVOS
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	<ul style="list-style-type: none"> Realizar una revisión bibliográfica acerca de los estudios previos en temáticas similares, equipos para la toma de datos y metodologías usadas.
DEFINICIÓN METODOLOGICA	<ul style="list-style-type: none"> Seleccionar la metodología para la toma de velocidades que más se ajuste a las necesidades de la investigación, con el fin de realizar un procesamiento de información eficaz.
ESTUDIO DE LOCACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> Previo al trabajo de campo se realiza un analisis del tramo por medio de mapas satelitales e informacion web, a fin de iniciar una familiarizacion con la vía.
TRABAJO DE CAMPO	<ul style="list-style-type: none"> Aplicar la metodología seleccionada para la investigacion, tomando las velocidades de los vehículos livianos por medio de equipo GPS, así como alguna información de los conductores que realicen el recorrido.
ORGANIZACION DE DATOS	<ul style="list-style-type: none"> Extracción y organización de la información proporcionada por los equipos (velocidades, y características geométricas del tramo vial)
PROCESAMIENTO DE DATOS	<ul style="list-style-type: none"> Análisis de la información recolectada por el GPS Vbox, diseñar el tramo en autocad, extraer velocidades de cada curva y proceder a calcular la velocidad específica V85, Velocidad de diseño y velocidad de operacion por lamm et al.
COMPARACIÓN DE VELOCIDADES	<ul style="list-style-type: none"> Comparar la velocidad de operación (V85) obtenida a partir del procesamiento de velocidades individuales de las curvas en el tramo de estudio vs dos velocidades, la velocidad de diseño en la norma colombiana y la velocidad de operación por el método de Lamm.
ANALISIS DE RESULTADOS	<ul style="list-style-type: none"> Relacionar las abscisas con criterio de consistencia pobre obtenidas a partir del analisis de velocidades con los criterios primero y segundo de lamm et al. con las abscisas de los informes de accidentalidad a fin de indentificar puntos negros en el tramo.

Fuente Elaboración Propia

1.5 ESTADO DEL ARTE

En los últimos años la Universidad Pontificia Bolivariana ha implementado esfuerzos en la investigación acerca de la consistencia vial en algunos tramos de Santander. A continuación, se muestran algunas de estas realizadas por estudiantes y docentes las cuales presentan relación a la presente tesis de grado.

- Definición del modelo de consistencia de velocidad para una carretera rural en el departamento de Santander a partir de un tramo experimental.

Autor: Ing. MSc. Ricardo Pico Vargas.

Esta investigación busca definir el grado de adaptabilidad entre dos modelos de consistencia, el del manual de Diseño Colombiano y el del IHSDM en un tramo experimental y representativo del departamento de Santander Colombia, los resultados de esta investigación indican que el modelo ISHDM presento un mejor comportamiento en el tramo de vía analizada y permitieron concluir para condiciones locales que elementos pueden llegar a presentar problemas de siniestralidad.

- Análisis de la consistencia del diseño geométrico de la vía curvas – Piedecuesta aplicando el método de Lamm.

Autor: Mayerli Katerine Cote Flórez.

Con esta investigación se desea determinar la consistencia en un tramo vial en base a modelos desarrollados los cuales determinan que tan consistente es el diseño de una carretera, es decir, que tanto el diseño geométrico satisfácele las expectativas de los conductores respecto a la vía, este análisis se realizó en apoyo de los criterios I y II de Lamm el al. los resultados mostraron que en general el tramo presenta una consistencia buena en los dos sentidos de circulación y son muy pocas las curvas con consistencia pobre que pueden llegar a generar puntos de accidentalidad.

- Análisis de velocidad entre la intersección la cemento (pr0+300) y el peaje Rionegro 5300 (PR13+000) de la ruta nacional 45A08

Autores: Sergio Pinzón Martínez – Henry Mauricio Devia Urueña.

Esta investigación analiza la consistencia de diseño partiendo del uso de dos de los tres criterios desarrollados por Lamm Ruediger sobre un tramo vial que comunica a Curos con Piedecuesta, una vez aplicados los criterios se concluye que el tramo presenta un alto grado de consistencia según el criterio II de Lamm. Sin embargo, aplicando el criterio I de Lamm se presenta un pésimo grado de consistencia, ya que la diferencia entre la velocidad de operación y la velocidad de diseño es muy alta.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Definiciones de Velocidad

2.1.1 Velocidad de Diseño (VTR):

La velocidad de diseño o velocidad de proyecto de un tramo de carretera es la velocidad guía o de referencia que permite definir las características geométricas mínimas de todos los elementos del trazado, en condiciones de comodidad y seguridad. Por lo tanto, ella representa una referencia mínima.

La velocidad de diseño se define como la máxima velocidad segura y cómoda que puede ser mantenida en un tramo determinado de una vía, cuando las condiciones son tan favorables, que las características geométricas de la vía predominan. [4]

Todos aquellos elementos geométricos de los alineamientos horizontal, de perfil y transversal, tales como radios mínimos, distancias de visibilidad, peraltes, pendientes máximas, anchos de carriles y bermas, anchuras y alturas libres, etc., dependen de la velocidad de diseño y varían con un cambio de ella. [4]

2.1.2 Velocidad Específica (Ve):

La velocidad Específica de un elemento de diseño, es la máxima velocidad que puede mantenerse a lo largo del elemento considerado aisladamente en condiciones de seguridad y comodidad, cuando encontrándose el pavimento húmedo y las llantas en buen estado; las condiciones meteorológicas, del tránsito y las regulaciones son tales que no imponen limitaciones a la velocidad. [4]

El valor de la velocidad específica, V_e , de un elemento geométrico depende esencialmente de los siguientes parámetros:

1. Del valor de la velocidad de diseño del tramo homogéneo, VTR, en que se encuentra incluido el elemento. La condición deseable es que a la mayoría de los elementos geométricos que integran el tramo homogéneo se les pueda asignar como velocidad específica el valor de la velocidad de diseño del tramo, VTR.

2. De la geometría del trazado inmediatamente antes del elemento considerado, teniendo en cuenta el sentido en que el vehículo realiza el recorrido. [5]

Para asegurar la mayor homogeneidad posible en la velocidad específica de los elementos geométricos, curvas y entretangencias, lo que necesariamente se traduce en mayor seguridad para los usuarios, se obliga a que las velocidades específicas de los elementos que integran un tramo homogéneo sean como mínimo iguales a la velocidad de diseño del tramo, V_{TR} , y no superen esta velocidad en más de 20 Km/h ($V_{TR} + 20$ Km/h). [5]

Para asignar la velocidad específica a las curvas horizontales, V_{CH} , incluidas en un tramo homogéneo, se consideran los siguientes parámetros:

1. La velocidad de diseño del tramo homogéneo, V_{TR} , en que se encuentra la curva horizontal.
2. El sentido en que el vehículo recorre la carretera.
3. La velocidad específica asignada a la curva horizontal anterior.
4. La longitud del segmento recto anterior. Se considera segmento recto a la distancia horizontal medida entre los puntos medios de las espirales de las curvas al inicio y al final del segmento si éstas son espiralizadas o entre el PT y el PC de las curvas si son circulares.
5. El ángulo de deflexión principal de la curva analizada. [5]

Tabla 1 Velocidad específica de una curva horizontal VCH, incluida en un tramo homogéneo con velocidad de diseño VTR

Velocidad Especifica de la Curva horizontal anterior V_{CH} (km/h)	Velocidad de Diseño del Tramo (V_{TR}) ≤ 50 km/h					Velocidad de Diseño del Tramo (V_{TR}) > 50 km/h				
	Longitud del Segmento recto anterior (m)									
	$L \leq 70$	$70 < L \leq 250$		$250 < L \leq 400$	$L > 400$	$L \leq 150$	$150 < L \leq 400$		$400 < L \leq 600$	$L > 600$
		$\Delta < 45^\circ$	$\Delta \geq 45^\circ$				$\Delta < 45^\circ$	$\Delta \geq 45^\circ$		
V_{TR}	V_{TR}	V_{TR}	V_{TR}	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 20$	V_{TR}	V_{TR}	V_{TR}	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 20$
$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 10$	V_{TR}	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 20$	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 10$	V_{TR}	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 20$
$V_{TR} + 20$	$V_{TR} + 20$	$V_{TR} + 20$	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 20$	$V_{TR} + 20$	$V_{TR} + 20$	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 20$
CASO	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5

Fuente Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, INVIAS.

2.1.3 Velocidad de Operación:

La AASHTO define la velocidad de operación como la máxima velocidad media a la que un conductor puede circular en una sección dada de vía bajo condiciones favorables de meteorología, condiciones predominantes de tráfico y sin exceder la velocidad segura en ningún momento, determinada ésta mediante la velocidad de diseño basada en un análisis por tramos de la vía. [6]

Para su aplicación, la velocidad de operación V_{85} se define como el percentil 85 de la distribución de velocidades desarrolladas por los conductores en condiciones de flujo libre en un tramo de carretera. La representación de la velocidad de operación a lo largo de una carretera permite identificar problemas locales, así como facilitar los estudios en el tramo. [7]

2.1.4 Velocidad de Punto:

Es la velocidad de un vehículo a su paso por un determinado punto de una carretera o una calle. Como dicha velocidad se toma en el preciso instante del paso del vehículo por el punto, también se le denomina velocidad instantánea. [8]

2.2 METODOLOGÍAS DE TOMAS DE DATOS

Para la caracterización y modelización de la velocidad, uno de los desafíos más importantes es la disponibilidad de datos de calidad de las variables implicadas. Por ello, en este estado del arte se dedica un apartado para la descripción de los distintos métodos de toma de datos, tanto datos de velocidad como los relacionados con la geometría de la vía, el conductor y el tipo de vehículo. [9]

2.2.1 Toma de datos para restitución de la geometría de la vía

Para el estudio del comportamiento de los conductores no es suficiente con obtener datos de la velocidad desarrollada por los mismos, sino que es necesario relacionarla con el trazado de la vía por la que estos circulan. De esta forma, trabajando en la correlación de la velocidad desarrollada con las características geométricas es posible estudiar la influencia del trazado de la vía que, en la mayoría de los casos no se encuentra disponible, por lo que se ha de desarrollar una metodología para su obtención.

Hasta el momento se han llevado a cabo distintas investigaciones cuyo fin ha sido la restitución de la geometría de la vía. En ellas se han utilizado principalmente las siguientes dos metodologías: Imágenes de satélite de alta resolución o GPSs de alta precisión. [9]

2.2.1.1 Imágenes de satélite de alta resolución

Entre las investigaciones realizadas con el objetivo de obtener la geometría de la vía destacan las llevadas a cabo por Easa [10] y Dong. [11]

En ellas, buscaron generar mapas de carreteras digitales de forma rápida y barata a partir de las imágenes de satélite de alta resolución. Easa [10] presentaron una metodología para obtener la alineación horizontal de una carretera utilizando una metodología para obtener la alineación horizontal de una carretera utilizando imágenes IKONOS. A partir de estas imágenes se obtiene la

restitución de las curvas horizontales simples y curvas en S sin recta intermedia y mediante la unión de estas con líneas rectas se obtiene la geometría de la vía. Los resultados mostraron que el método propuesto convergía en todos los casos y podía ser utilizado para la restitución de curvas horizontales. Sin embargo, en su estudio no tuvieron en cuenta las curvas de transición.

Dentro del proceso se distinguen distintas fases:

- Preprocesamiento de la imagen para convertir la imagen en color en una imagen binaria con únicamente los ejes.
- Restitución de la carretera: para la restitución de las curvas horizontales de la carretera y las rectas asociadas, mediante el método propuesto, a partir de la imagen de ejes se precisa el uso de la transformación Hough. Esta transformación es un conocido algoritmo para la detección de características de imágenes raster. Con ella, se identifican los píxeles de cada uno de los elementos y se detectan las rectas y las curvas simples y en S existentes, obteniendo los parámetros que las caracterizan. [10]

Tomando como base el estudio anterior, la detección y restitución de las curvas de transición simétricas ha sido abordado en el estudio desarrollado por Dong [11]. El proceso es similar al necesario para la restitución de las curvas horizontales, identificando las curvas de transición como espirales cúbicas.

En ambos estudios se han aproximado de forma semiautomática las características de cada uno de los elementos a partir de imágenes de satélite de alta definición, aproximando la nube de puntos filtrada de la imagen a curvas minimizando el error cuadrático medio (ECM). Para llevar a cabo este proceso es el usuario el que debe intuir la posición de los distintos elementos del trazado de las imágenes para finalmente restituir el eje exterior y el inferior de la carretera, pero no el eje propiamente dicho de la misma. [9]

2.2.1.2 Utilización de datos procedentes de GPS

El aumento de la variedad, de la disponibilidad y de la precisión de los dispositivos basados en los sistemas de posicionamiento global (GPS) permite que su tecnología sea utilizada en nuevas e innovadoras aplicaciones.

Utilizando esta tecnología, el Departamento de Transportes de Kansas ha tomado datos especiales de su red de carreteras a partir de campañas de datos anuales desde 1977 con el consiguiente problema en el manejo de la gran cantidad de datos geográficos obtenidos. Estos datos fueron tomados cada año por un vehículo circulando en ambos sentidos de circulación de la carretera a 100 km/h equipado con un GPS que registraba datos con una cadencia de 1 segundo. Por ellos, Ben Arieh [12] propusieron una metodología para la organización y depuración de esta gran cantidad de datos, su condensación y la generación de curvas B-spline como aproximación a la geometría de la carretera. Notaron que los datos presentan cierta inconsistencia debido a que para cada carretera, el vehículo circulaba por los dos sentidos de circulación y la distancia entre los carriles podía llegar a ser de 60 m, debido también a las diferencias en las estaciones en las que los datos fueron tomados (para una carretera hay datos de varios años), a los errores inherentes al sistema y a los satélites y a los comportamientos arbitrarios del vehículo como pueden ser adelantamientos, cambios de carril, salida de la vía para parar en una estación de servicio, etc.

Por todo ello, establecieron el siguiente procedimiento para la aproximación de la geometría de la carretera:

- Convertir los datos proporcionados por el GPS en latitud y longitud a un sistema de coordenadas cartesianas.
- Clasificar los datos obtenidos basados en la dirección principal de la carretera.
- Depurar los datos eliminando repeticiones.

- Generar una representación geométrica de la carretera mediante aproximación mediante B-splines.

Se subraya el hecho de que la misma metodología puede ser utilizada para la restitución de la dimensión vertical de la misma.

De hecho, los mismos datos, esta vez incluyendo la componente vertical, han sido utilizados por Nehate [13] para presentar una metodología para el cálculo de la distancia de visibilidad disponible teniendo en cuenta tanto la alineación horizontal y el perfil longitudinal de la carretera como la combinación de ambos a partir de datos capturados por un GPS.

Con los datos almacenados en este dispositivo han parametrizado la geometría de la carretera utilizando esplines que modelizan la trayectoria, pero sin pretender restituir la geometría de la vía.

Los datos son obtenidos por los GPS cada segundo y registrados en forma de latitud, longitud y altitud. Posteriormente, transformaron las coordenadas terrestres en coordenadas cartesianas utilizando la transformación de coordenadas basada en la proyección conforme de Lambert. Después hicieron un análisis de valores atípicos y estos fueron eliminados.

Por otra parte, Imran [14] han propuesto una metodología para la restitución de la alineación horizontal de una carretera basándose en las trayectorias de vehículos equipados con GPS de alta precisión. Para ello, se tomaron datos con un vehículo equipado con un GPS con un intervalo de 0.1 segundos bajo diferentes condiciones de velocidad (80, 90 y 100 km/h) en una carretera convencional, en ambos sentidos de circulación, lo que suponen 6 trazadas. La toma de datos se realizó en tramos de carreteras con las siguientes restricciones:

- Zona no urbana con entorno no urbanizado.
- Sin edificios altos, árboles, pasos superiores y otras construcciones que pudieran suponer interferencias en la señal del GPS.

- Con disponibilidad de una estación de control para medir el diferencial del GPS.
- Bajo volumen de tráfico: $IMD \leq 10000$ vh/día.
- Carreteras pavimentadas y marcadas con línea de ancho constante para un mejor seguimiento de la línea central.
- Sin stops o intersecciones señalizadas en menos de 0.8 km desde la curva para poder conducir a velocidad constante.
- Radio de la curva menor de 1000 m y longitud de la curva mayor de 50 m.

2.2.2 Toma de datos relacionados con factor humano y vehículo

No sólo las características del trazado de la vía y de la infraestructura influyen sobre la elección de la velocidad por parte de los conductores, sino que una alta variabilidad de la velocidad viene explicada por otras variables como son las características físicas, sociológicas y psicológicas del conductor y las características del viaje y del vehículo.

La obtención de datos válidos relacionados con estas variables es una tarea complicada ya que el propio método de toma de datos puede influir en el conductor, dando como resultado datos que no se ajustan completamente a la realidad.

Para el registro de datos físicos y sociológicos del conductor y características del vehículo y del viaje se han utilizado distintas metodologías, que varían desde entrevistas al conductor hasta visualización de videos. [9]

Wasielewski [15] se basó en la visualización de las fotografías obtenidas durante la toma de velocidad para la caracterización aproximada de las distintas variables. Entre estas variables destacan los datos relacionados con el conductor, como edad y sexo, el tipo de vehículo y la presencia o no de pasajeros.

Un método similar fue utilizado por Williams. [16] En este estudio se registraron las matrículas de los vehículos que circulaban por el tramo de carretera en el

que se estaban midiendo velocidades. Los vehículos también fueron grabados en video, pero no con la suficiente resolución como para identificar la edad del conductor. Por ello, llevaron a cabo un proceso que consistió en, tras identificar la matrícula, obtener los datos del conductor asociado a esa matrícula a partir de los datos de la administración competente. Así, obtuvieron datos de la edad y sexo del conductor, experiencia en la conducción e historial de accidentes y sanciones. Entre todos los datos se desechaban aquellos en los que el sexo y edad aproximada del conductor observado en los videos no coincidía con los datos oficiales.

Sin necesidad de fotografías o de videos, puede obtenerse los datos ya mencionados a partir de entrevistas directas a los conductores. Esta forma de proceder fue utilizada por Jorgensen y Polak [17]. En su estudio, la toma de datos consistió en la medición de la velocidad de los vehículos que circulaban por un tramo de carretera, a los que posteriormente se les paraba y se les realizaba una pequeña encuesta para obtener datos como la edad, el sexo y la experiencia en la conducción del conductor.

La obtención de datos a partir de entrevistas a los conductores es lo que se denomina autoinformes. Con ellos se pueden obtener datos sobre el historial de accidentes y sanciones, pero también datos subjetivos relacionados con la psicología del conductor. [9]

2.2.3 Toma de datos de velocidades

En los estudios relacionados con la velocidad desarrolladas por los conductores en un tramo de carretera y concretamente en los estudios realizados con el objetivo de desarrollar modelos para la estimación de la velocidad de operación, se han utilizado distintos dispositivos de toma de datos, en su mayor parte datos puntuales. [9]

2.2.3.1 Toma de datos puntuales

Generalmente el dispositivo empleado en la recogida de datos sobre velocidades de vehículos es una pistola radar utilizada de forma manual. Sin embargo, la utilización de este dispositivo presenta tres problemas a considerar los cuales son:

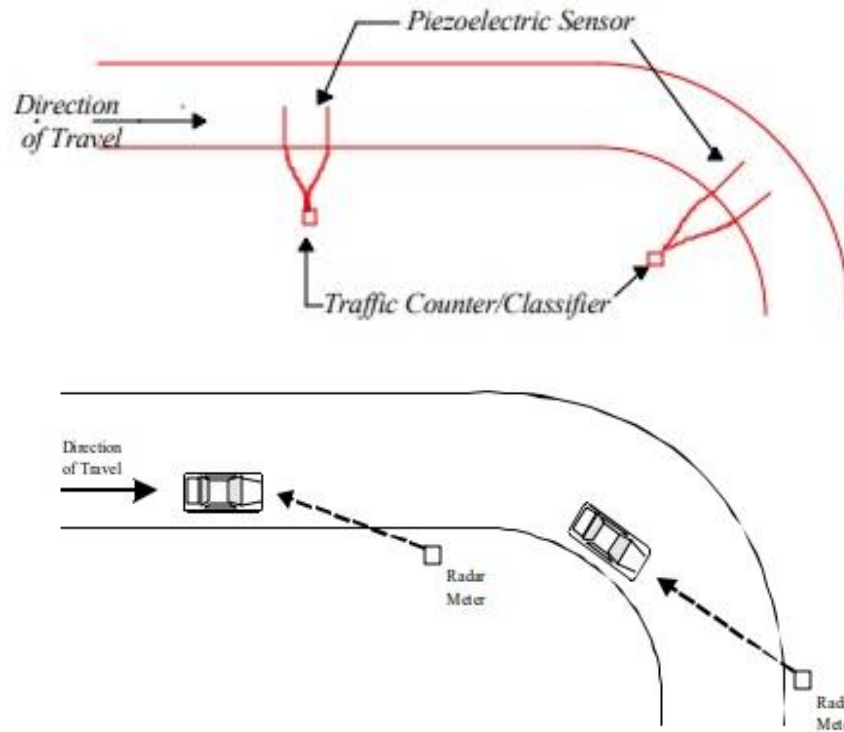
1. Para registrar la velocidad de un vehículo utilizando alguno de los modelos de pistola de radar, un observador debe leer la pantalla LCD del dispositivo y otra persona escribir los datos leídos; como resultado, se puede introducir un error humano en el proceso de recogida de datos.
2. La medida de la velocidad con una pistola de radar en secciones curvas tiene cierto grado de inexactitud debido a que el ángulo registrado es diferente de cero y cambia a lo largo de la curva (error de coseno).
3. La presencia de personal puede afectar considerablemente al conductor variando su comportamiento y elección de la velocidad. [9]

Este método ha sido utilizado por Gibreel [18] para establecer el efecto de la combinación de alineaciones 3D en la velocidad de operación de los vehículos, ubicando las mediciones de velocidad en cinco puntos a lo largo de cada dirección. Con el fin de intentar evitar los problemas mencionados, los observadores se localizaron donde el efecto de coseno era considerado mínimo y, al mismo tiempo, fuera del campo de visión de los conductores para asegurar que su presencia no influyera en el comportamiento de los conductores.

Conociendo los posibles errores presentes en la utilización de pistolas radar, Fitzpatrick [19] utilizaron además sensores piezoeléctricos en el pavimento conectados con contadores/clasificadores de tráfico para la modelización de la velocidad en recta y en curva. Estos dos tipos de dispositivos de medida de velocidad fueron seleccionados después de distintos ensayos en los que se compararon distintos dispositivos.

Para curvas horizontales, las velocidades son medidas en el centro de la curva horizontal y en el punto medio de la recta precedente. En la figura 2 se muestra la localización tanto de los contadores/clasificadores de tráfico como de las pistolas radar.

Figura 2 Localización de los dispositivos de medida en curva horizontal



Fuente Speed-profile model for two-lane rural highways [19]

Al utilizar pistolas radar los operadores se escondieron donde fuera posible visualizar el punto de medida de velocidad y a la vez ocultos para evitar modificar el comportamiento de los conductores. Además, las pistolas radar fueron manipuladas para que los vehículos con detectores de radar no evitaran la toma de datos.

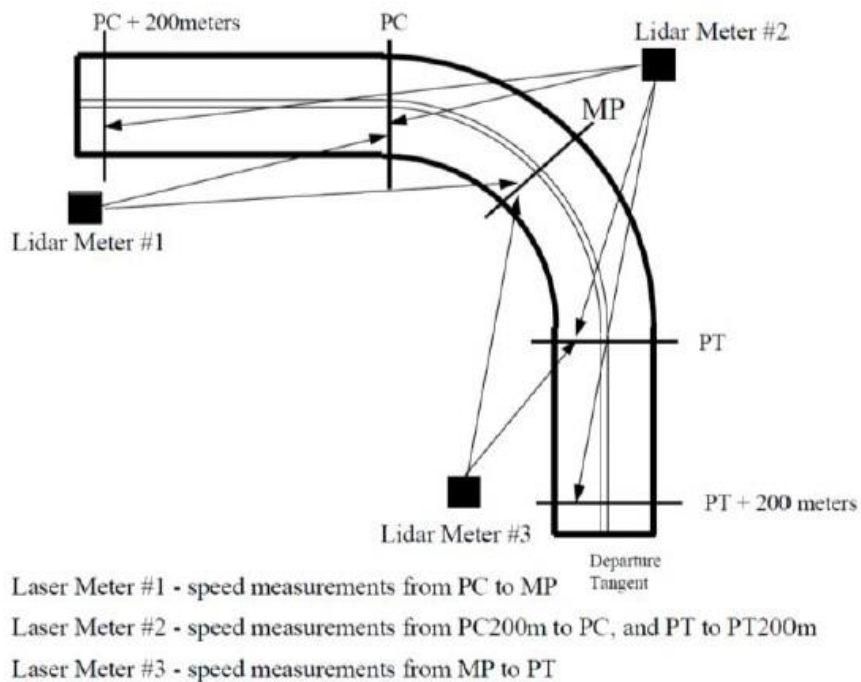
Sin embargo, para la toma de datos de velocidades destinadas al estudio de la deceleración y aceleración, se utilizaron pistolas Light Detection and Ranging (Lidar). Lidar es una herramienta multiobjetivo que se ha convertido en una alternativa a las pistolas radar convencionales. El uso de Lidar en la toma de datos de velocidades tiene dos ventajas principales. En primer lugar, Lidar puede medir la

distancia a un vehículo a la vez que la velocidad mientras que los radares sólo miden la velocidad. La segunda ventaja reside en que la señal transmitida por las Lidar viaja en línea recta, al contrario que la del radar que sigue patrones cónicos, haciendo más fácil el apuntar al vehículo cuya velocidad se pretende medir. Además, el rayo láser más estrecho es más difícil de detectar por los detectores de radar. [9]

La información que los dispositivos Lidar proporcionan (distancia y velocidad) permiten localizar las mediciones de velocidad en puntos conocidos y, de esta forma, estudiar la deceleración y aceleración.

La figura 3 muestra la disposición utilizada en este estudio para la utilización de tres Lidar en la toma de datos de velocidad para el estudio de deceleración y aceleración.

Figura 3 Disposición de toma de datos para el estudio de deceleración/aceleración



Fuente [9]

Castro [20], en lugar de utilizar pistolas radar o lidar, tomaron datos puntuales de velocidad mediante radar, evitando así el posible error humano de toma de datos. Con este dispositivo registraron la velocidad de, al menos, 40 vehículos en flujo libre en 200 localizaciones diferentes de la red de carreteras de Colombia. Los puntos de toma de datos se localizaron 200 metros antes, en el inicio, en el medio y en el final de cada curva horizontal. A partir de estos datos, calcularon el percentil 85 de la velocidad en cada punto, con los que validaron modelos para la estimación de la velocidad de operación en curva calibrados con datos de otros países y calibraron nuevos modelos para la estimación de esta variable en curvas de radio inferior a 300 metros y diferentes combinaciones del trazado en alzado.

La limitación más importante de los modelos basados en datos puntuales de velocidad es que los datos no son tomados en los puntos de inicio y final de la deceleración y aceleración. Esto provoca que los perfiles de aceleración y deceleración no representen el verdadero comportamiento de los conductores. Además, con estos métodos las longitudes de deceleración y aceleración no pueden determinarse y los ratios reales no pueden ser obtenidos con total precisión. [9]

2.2.3.2 Toma de datos continuos

En general, la operación de los vehículos se puede caracterizar por un modelo de perfil de velocidades y aceleraciones/deceleraciones, obtenido de los ensayos de campo. Para ello, es preferible tener datos continuos de velocidad y no, únicamente, datos puntuales. Con estos perfiles es posible predecir el comportamiento de los vehículos a lo largo de un trazado, en función, fundamentalmente, de sus características geométricas.

Para obtener estos perfiles continuos puede realizarse una recogida de datos de una muestra de vehículos basada en un seguimiento pasivo por medio de dispositivos GPS. [9]

Wang [21] estudiaron la influencia del entorno de zonas urbanas de baja velocidad en las velocidades de los conductores con vehículos equipados con GPS. Los

autores desarrollaron modelos de velocidad en tramos de zonas urbanas basados en el trazado de la vía, las características de la sección transversal, las características de las aceras y los usos del suelo adyacente.

También existe otro método para evitar las deficiencias de la toma de datos puntuales obteniendo perfiles continuos de velocidad, es el caso de la grabación y el procesamiento de videos. Sin embargo, este método sólo es útil para estudios locales y segmentos de carretera reducidos. [9]

Bella [22] presentó un estudio para predecir el percentil 85 de las ratios de deceleración y aceleración basados en datos recogidos en la transición recta-curva-recta en un simulador de conducción. En este estudio presentó los resultados del estudio de 3 tramos de carreteras de dos carriles de circulación con un intervalo de toma de datos de 5m.

Los participantes en el estudio fueron elegidos de forma que haya cierto equilibrio entre género (60 %hombre y 40% mujeres) y con un rango de edad entre 23 y 60 años. Fueron seleccionados de acuerdo con las siguientes características:

- No experiencia en simuladores de conducción
- Mínimo 4 años de experiencia en la conducción
- Una media anual de distancia conducida de al menos 2500 km

El vehículo del simulador fue un vehículo ligero de clase media estándar, tanto respecto a sus dimensiones como equipamiento mecánico, con cambio automático.

A pesar de la exhaustiva elección de los conductores el vehículo utilizado en el simulador, hay que tener en cuenta que se trata de una experiencia mediante simulador de conducción y no de datos reales tomados en campo por lo que no se corresponde completamente con el comportamiento real de los conductores. [9]

2.3 FACTORES QUE AFECTAN LA VELOCIDAD

2.3.1 Factores externos a la vía

Los factores enunciados en este apartado representan la mayor parte de las condiciones de las que se sabe (o se supone) que tienen influencia sobre la velocidad de operación, pero sobre las que no es posible ejercer ningún control actuando únicamente en la infraestructura. En este grupo se incluyen desde las condiciones de luminosidad o atmosféricas hasta las características de los conductores. [9]

2.3.1.1 Condicionantes meteorológicos

Los condicionantes meteorológicos estudiados son, en la mayoría de estudios, el efecto de una ligera o fuerte lluvia, aunque también se ha llegado a considerar el efecto de una nevada.

La lluvia (o la nieve, en su caso) pueden afectar a la velocidad de operación desde dos puntos de vista:

- Por un lado, suponen una dificultad a la visibilidad del conductor, que especialmente se agudiza cuando el efecto meteorológico en cuestión es de gran intensidad
- Por otro lado, la lluvia y la nieve alteran las condiciones del pavimento, de una forma mucho menos dependiente de la intensidad del fenómeno, pero con efectos mucho más apreciables.

En conclusión, es que las condiciones meteorológicas no producen alteraciones significativas sobre la velocidad de operación. Existen unos mínimos estudios que indican que unas condiciones meteorológicas muy adversas producen una disminución ligera de la velocidad de operación.

Según un estudio desarrollado por Blackburn, adaptando intervalos de confianza del 95%, la velocidad del pavimento seco podía considerarse superior a la desarrollada sobre el pavimento húmedo en una magnitud muy pequeña: 3.2 ± 2.4 km/h.

Posiblemente, el estudio más completo acerca de la influencia de la meteorología sobre la velocidad de operación fue desarrollado por Ibrahim y Hall. [23] Dicho estudio evaluó la influencia de la lluvia y de la nieve con diferentes intensidades, llegando a las siguientes conclusiones:

- Lluvia ligera: descenso de unos 2 km/h en la velocidad de operación.
- Lluvia fuerte: descenso de entre 5 y 10 km/h.
- Nieve ligera: descenso de unos 3 km/h.
- Nieve fuerte: descenso entre 38 y 50 km/h

Sin embargo, estadísticamente esta variable no ha presentado una importante influencia sobre la velocidad de operación por lo que los modelos destinados a estimarla no suelen considerarla. [9]

2.3.1.2 El entorno

Comprende todo aquello de lo que el conductor puede percibir en un punto en concreto y a medida que va recorriendo la vía.

De este modo, se puede afirmar que al conductor le llega una gran cantidad de información de la vía, la cual, tras un proceso mental inconsciente, acaba traduciéndose en una cantidad mucho menor de información, que es la que el conductor finalmente interpreta y a la cual reacciona de forma consciente. Puede resumirse este proceso en el hecho de que el conductor reacciona no a la realidad, sino a una interpretación inconsciente de la misma. [9]

No todo el entorno influye con el mismo peso sobre el conductor. Puesto que este está centrado sobre la carretera, tendrá más influencia sobre el mismo todo lo que esté situado en las proximidades de la misma. Este es el motivo por el cual actuaciones sobre el tratamiento de los arcenes o las bermas tienen influencia final sobre la conducción, aun siendo elementos situados exteriormente al recorrido del mismo.

Debido a la gran variabilidad de los condicionantes relacionados con el entorno y a la dificultad de su medición todavía no hay resultados relevantes sobre su influencia en la velocidad de operación. [9]

2.3.1.3 El factor humano

Las variables relacionadas con los conductores individuales son las más difíciles de identificar y estimar, y las causantes de la variabilidad residual en los modelos de predicción de las velocidades de operación.

Estas variables son fundamentalmente variables asociadas a la psicología y a las condiciones particulares de cada conductor, como edad, sexo, experiencia en la conducción, el conocimiento de la vía, el propósito del viaje, etc. [9]

2.3.1.4 El vehículo

El vehículo es el tercero de los factores concurrentes que más influyen en la siniestralidad y también en la elección de la velocidad.

El tipo de vehículo es la variable asociada que más suele influir en la velocidad, distinguiendo generalmente entre livianos, medios y pesados. Sin embargo, esta variable no es la única a considerar, sino que también son importantes la relación peso/potencia, el modelo o la antigüedad del vehículo. Por ejemplo, los conductores con vehículos livianos, deportivos y nuevos suelen circular a una mayor velocidad y asumir más riesgos.

En la consideración de la influencia de estas variables en la velocidad en un análisis individual hay que tener en cuenta que estas variables suelen estar afectadas por otras variables, especialmente variables como la edad del conductor. [9]

2.3.2 Factores internos de la vía

Dentro de este apartado se describen las diferentes variables que pueden presentar cierta influencia sobre la velocidad de operación y que están íntimamente relacionadas con la carretera, abarcando desde las características

geométricas de los diferentes elementos del trazado hasta densidad de señalización o de accesos. [9]

2.3.2.1 Clase funcional de la vía

La clasificación funcional de la vía es la base para el diseño de un tramo de carretera. Esta clasificación atiende al objetivo final de la vía, clasificándola según el tipo de tráfico que va a atender. Así, por ejemplo, se distingue entre vías diseñadas para soportar tráfico de desplazamientos medios o largos y vías de acceso a zonas residenciales. De este modo, la geometría, sección transversal y equipamientos serán consecuencia de la misma.

La clasificación funcional de la vía no sólo influye en los parámetros anteriores, sino que también tiene cierta influencia psicológica sobre los conductores. El hecho de que el desplazamiento de un vehículo sea de larga distancia implica que con mayor probabilidad la vía empleada para dicho desplazamiento será de alta capacidad. Lo mismo ocurre en el caso contrario, con desplazamientos menores.

Como consecuencia, las velocidades de operación mayores se dan en vías de mayor capacidad. [9]

2.3.2.2 Densidad de accesos

La variable densidad de accesos controla el número de accesos a la vía (incorporaciones e intersecciones) en estudio por unidad de longitud. Diversos estudios han empleado esta variable en los modelos de estimación de velocidades de operación en rectas. [9]

En los casos en lo que el tramo de estudio sea de corta longitud, por muy pocos accesos que haya, la densidad de accesos resultará muy alta. Es por ello que para este tipo de tramos se prefiere emplear el número de accesos.

Según el estudio de Fitzpatrick [19], una mayor densidad de accesos conduce a una velocidad de operación menor.

2.3.2.3 Sección transversal

Se ha estudiado ampliamente la influencia sobre la velocidad de operación de la anchura de carriles y bermas. Las tres variables han resultado significativas sobre la misma, llegando a incluirse en algunos modelos para su estimación.

La anchura de carriles es la variable más empleada en los modelos discretos. Una mayor anchura provoca que los conductores se sientan más seguros en su conducción ya que se les permite un mayor margen de maniobra, con lo que las velocidades de operación aumentan.

Evidentemente, el razonamiento anterior es cierto dentro de un estrecho rango de límites. De este modo, estrechar el ancho de los carriles si tiene un efecto de reducción de la velocidad de operación (al igual que un ensanchamiento provoca un aumento), pero ensanchar los carriles a partir de cierto límite no supone un mayor aumento de la velocidad de operación, sino que esta permanece constante. [9]

También es importante el modo en el cual se limitan los carriles y las bermas. Así, la existencia de las marcas viales que delimiten los carriles provoca un aumento de la velocidad de operación, comparando con el caso en que no existan dichas líneas.

La influencia de las bermas no es tan grande como la de los carriles, aunque su comportamiento es similar. Un aumento en la anchura de las bermas induce una mayor velocidad de operación (hasta cierto límite), mientras que un estrechamiento de los mismos provoca un descenso de la velocidad.

Sobre las bermas influye también una nueva variable que no existe sobre los carriles, y es el modo en que estos han sido tratados. Las bermas pavimentadas inducen una mayor velocidad que las bermas sin pavimentar. [9]

2.3.2.4 Visibilidad disponible

La visibilidad disponible se define como distancia visible al frente del conductor para que éste pueda tomar decisiones de manera oportuna y maniobrar con

seguridad [24]. Dado que la visibilidad afecta a la velocidad, también debería afectar las maniobras de aceleración y desaceleración. [25]

Las investigaciones relacionadas a la influencia de la visibilidad disponible sobre la velocidad son variadas. Trapp y Oellers [26], Koeppel y Borck [27] y Trapp y Kraus [28] encontraron que la influencia de la distancia de visibilidad en el comportamiento del conductor no es uniforme y que además no debería ser considerada de manera aislada, ya que está relacionada con la razón de cambio de curvatura. En tanto que, las investigaciones de Al-Kassar et al. [29] encontraron que la pendiente longitudinal y la distancia de visibilidad son de influencia menor en las velocidades en flujo libre. Leong [30] y Figueroa y Tarko [31] también encontraron influencia sobre la velocidad en rectas y curvas. Asimismo, McLean [32] encontró que una distancia de visibilidad restringida reduce la velocidad de los conductores.

Por otro lado, Polus et al. [33] y Bennett [34] encontraron una influencia parcial de la distancia de visibilidad sobre la velocidad. Polus et al. [33] calibraron modelos exponenciales para predecir la velocidad del percentil 50, 80 y 100 en pendientes en función de la distancia de visibilidad. Se concluyó que en países motorizados las restricciones de distancias de visibilidad pueden inducir a pequeñas reducciones en la velocidad adoptada por los conductores más rápidos, pero poco o casi ningún efecto en las velocidades de los demás conductores. Por su lado, Bennett [34] encontró que la distancia de visibilidad de aproximación afecta, principalmente, a la velocidad en vehículos livianos y que la distancia de visibilidad en curvas afecta la velocidad de los vehículos pesados comerciales.

2.3.2.5 Características geométricas

Las curvas horizontales son los elementos geométricos del trazado que mayor control suponen sobre la velocidad de operación, influyendo no sólo en las propias secciones curvas sino también, en muchos casos, en las secciones rectas adyacentes. [9]

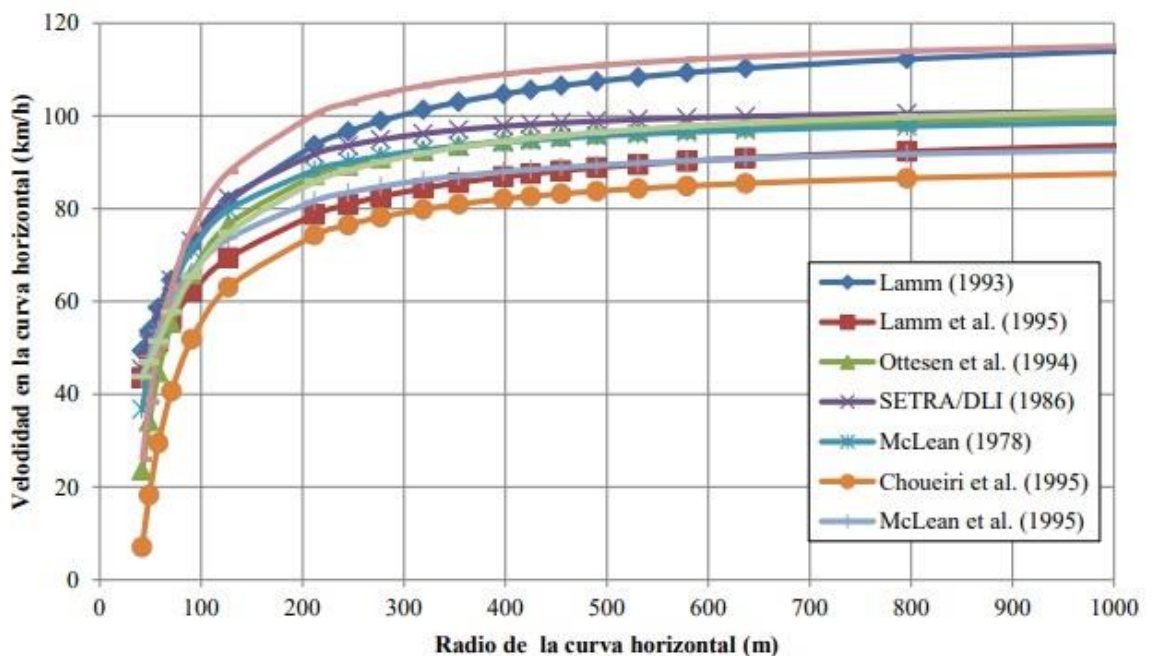
Las variables más influyentes son:

2.3.2.5.1 Radio de la curva horizontal

En caminos, el radio de la curva circular horizontal es la variable estadísticamente más significativa que condiciona la velocidad del vehículo en curvas horizontales [35]. También, en las curvas horizontales, se encontró otra variable estadísticamente significativa como la velocidad del elemento anterior o de aproximación. [34]

En la Figura 4 se muestran los modelos de predicción de velocidad encontrados en Lamm [35] en función del radio de la curva. En casi todos los modelos, los radios de curvas superiores a 300 o 400 m dejan de influir significativamente sobre la velocidad. [25]

Figura 4 Modelos de velocidades de curvas para varios países en función del radio de la curva horizontal



Fuente Aceleraciones y desaceleraciones de vehículos livianos en caminos de montaña, [25] [35]

2.3.2.5.2 Longitud de la recta

La recta constituye un elemento principal en el diseño de caminos y su longitud juega un rol importante en la elección de la velocidad de entrada a las curvas horizontales. Si la recta es suficientemente larga el conductor podría acelerar hasta alcanzar su velocidad deseada, pero si no lo es, debería ajustar su velocidad antes de ingresar a la curva horizontal. [25]

En los modelos de predicción de velocidades en rectas, las variables estadísticamente más significativas fueron: la longitud de la recta, curvas adyacentes, sección transversal, pendiente longitudinal, distancia de visibilidad, entorno, tipo de vehículo y comportamiento del conductor. [33] [36]

2.3.2.5.3 Pendientes Longitudinales

Las pendientes longitudinales son parte del alineamiento vertical del camino y afecta la velocidad de operación, y en consecuencia, afectan las maniobras de aceleración y desaceleración. Si la pendiente es descendente, el peso del vehículo genera un impulso adicional, favoreciendo el aumento de su velocidad; por el contrario, si la pendiente es ascendente, la componente del peso se opone al movimiento y el vehículo puede perder velocidad. Por esta razón, se debiera esperar comportamientos diferentes en cada caso; en la primera, debido a la percepción de seguridad del conductor, y en la segunda, debido a la aspiración del conductor de circular a la velocidad deseada. [25]

Otros estudios también evaluaron la reducción de la velocidad en pendientes longitudinales. Por ejemplo, Leong [30] en caminos de Nueva Gales del Sur (Australia) observó que el aumento de pendiente positiva o negativa llevaba a una reducción de la velocidad, de tal manera que, los vehículos livianos mostraron una reducción de 1,2 km/h y 1,1 km/h en pendientes ascendentes y descendentes, respectivamente.

2.4 MODELOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN

Con el fin de facilitar la evaluación del diseño geométrico de un proyecto de carreteras se han desarrollado distintos modelos que pretenden estimar la velocidad de operación en función de las características geométricas de la carretera. De esta forma puede evaluarse la consistencia del diseño geométrico durante la fase de proyecto o de planeamiento.

Fundamentalmente, existen modelos para estimar la velocidad en secciones curvas y en rectas. Para posteriormente configurar un perfil de velocidad de operación (representación gráfica de la velocidad de operación a lo largo del trazado de una carretera) existen tasas de aceleración y deceleración. Sin embargo, el formato del modelo, las variables independientes y los coeficientes de regresión son sustancialmente diferentes de un modelo a otro. Este hecho puede ser el resultado de las diferencias en el comportamiento de los conductores de una región a otra y subraya el hecho de que un único modelo no puede ser universalmente aceptado. [37]

Existen diferentes modelos de estimación de las velocidades de operación. La principal clasificación puede ser en discretos o continuos.

Los **modelos discretos** son aplicables a una alineación en particular (una curva circular horizontal, un acuerdo o una recta), y proporcionan un valor de velocidad de operación para dicha alineación. Generalmente el resultado es un valor discreto, aunque algunos modelos discretos pueden proporcionar valores no uniformes.

Los **modelos continuos**, al contrario que los anteriores, no se aplican en una alineación en particular, sino en un tramo de vía compuesto por diferentes alineaciones concatenadas. Para ello suele hacer uso de modelos discretos, para unirlos según diferentes normas, configurando un perfil de velocidad continuo a lo largo de todo el trazado. De este modo, recibe el nombre de perfil de velocidad de

operación la representación gráfica de la estimación de las velocidades de operación a lo largo de cierto trazado. [37]

2.4.1 Modelos para la estimación de velocidades de operación en curvas horizontales

La mayor parte de los estudios realizados encaminados a establecer una relación entre las velocidades de operación y elementos discretos del trazado se centran sobre las curvas. Son, además, los modelos que mayor índice de correlación alcanzan.

Para su desarrollo se consideran generalmente como hipótesis de partida que la velocidad de operación es constante a lo largo de toda la curva circular. Además, la velocidad de operación utilizada en la calibración del modelo y la estimada por él suele ser la del punto medio de la curva, considerando que en él se presenta la velocidad mínima de la curva. [37]

Ambas hipótesis no son ciertas y se han asumido recurridamente debido a que la toma de datos para obtener estas relaciones suele llevarse a cabo en sitios puntuales, siendo el punto central de la curva el más indicado en este caso, suponiéndose la velocidad constante en el resto.

En cuanto a las variables de las que depende la velocidad de operación en las curvas horizontales, el radio y sus derivados (grado de curvatura) son las que mayor significancia estadística presentan. De hecho, en el estudio de las curvas horizontales la mayoría de los modelos suelen contar con la variable radio (o grado de curvatura), ya que con expresiones muy sencillas se consigue un alto grado de correlación.

En la tabla 2 se presenta una relación de los modelos más relevantes para la estimación de la velocidad de operación en curvas horizontales en los que se ha considerado únicamente el radio o el grado de curvatura. [37]

Tabla 2 Modelos para el cálculo de operación en función del trazado en planta

AÑO	AUTOR	ECUACION	R ²	OBSERVACIONES
1990	Lamm et al.	$V_{85} = 94.398 - \frac{3188.656}{R}$	0.79	Para las velocidades inferiores a 94 km/h, datos en 322 curvas
1990	Kanellaidis et al.	$V_{85} = 129.88 - \frac{623.1}{\sqrt{R}}$	0.78	Para velocidades cercanas hasta 130 km/h, datos en 58 curvas
1994	Islam y Seneviratne	$V_{85} = 103.03 - \frac{4208.76}{R} - \frac{36597.92}{R^2}$	0.98	
1994	Morall et al.	$V_{85} = e^{4.561 - 0.0058 * Gc}$	0.63	Ecuación donde involucra el grado de curvatura
1994	Islam et al.	$V_{85\ PC} = 95.41 - 0.45Gc - 0.001Gc^2$ $V_{85\ PM} = 96.11 - 0.32Gc$ $V_{85\ PT} = 103.03 - 0.76Gc - 0.003Gc^2$	0.99 0.98 0.98	
1999	Lamm et al.	$V_{85} = 95.594 - 1.597Gc$	0.79	
2005	Missaghi y Hassan	$V_{85} = 94.30 + 8.67 * 10^{-6}R^2$	0.52	
2006	Castro et al.	$V_{85} = 120.16 - \frac{5596.72}{R}$	0.75	
2012	GIIC	$V_{85} = 106.863 - \frac{60.1185}{e^{0.00422596R}}$	0.72	

Fuente Tomado y adaptado de [36]

Dónde:

V_{85} = Velocidad de operación (km/h)

R = Radio de la curva horizontal (m)

Gc = Grado de curvatura (°/100m)

R² = Coeficiente de determinación

Todos los modelos anteriormente presentados dan como resultado de la estimación un único valor para la velocidad en la curva. Sin embargo, hay otros modelos que no aceptan la hipótesis de que la velocidad se mantiene constante a lo largo de la curva. Este es el caso del estudio realizado por Islam [38]. En este caso, debido a la imposibilidad de registrar un perfil empírico continuo, se calibraron tres modelos: uno al inicio, otro en el punto medio y otro al final de la curva horizontal, con coeficientes de determinación muy elevados: 99%, 98% y 90%.

2.4.2 Modelos para la estimación de velocidad de operación en rectas

La estimación de la velocidad de operación en rectas es más compleja y menos precisa que en curvas debido, fundamentalmente, a que no hay una aceleración lateral que compensar, y por tanto, el riesgo de salirse de la vía no entra dentro de la elección de la velocidad por parte de los conductores. Esto hace que esta elección de la velocidad se base en otros criterios, como puede ser la sección transversal, el entorno de la vía, el tráfico existente, o la geometría general del tramo (longitud de la recta, o curvatura del tramo, por citar algunos ejemplos). Además, al no estar estos criterios tan relacionados con la posibilidad de sufrir un accidente, son interpretados por los conductores de formas muy diversas, lo que conlleva a que la dispersión de las velocidades en rectas es mucho mayor que en curvas, además de que su valor promedio también es superior.

Por todo ello, los modelos de velocidad para rectas presentan mucha menor correlación que los modelos de curvas, debido a la falta de variables geométricas concretas en las que centrarse. Esta falta de variables no sólo provoca modelos mucho más heterogéneos que para las curvas, sino que el número de los mismos es mucho menor, y la variabilidad finalmente explicada es mucho más reducida que en el otro caso. [37]

En el estudio de las velocidades de operación en rectas se pueden distinguir dos tipos de rectas:

Rectas independientes: Son rectas con una longitud suficiente para que los conductores puedan alcanzar su velocidad deseada, es decir, en estas rectas los factores que afectan a la elección de la velocidad no son específicamente geométricos, sino que pueden ser variables como la sección transversal, el entorno de la vía y el tráfico. La dispersión en estos casos es máxima y los modelos obtenidos por diversas investigaciones son mucho menos concluyentes y con unos coeficientes de determinación menos precisos.

Para la estimación de la velocidad de operación en rectas, especialmente en las independientes, existen ciertos modelos de velocidad de operación cuyo único resultado es un valor estático para cualquier recta. Por ello, la velocidad finalmente alcanzada es totalmente independiente de las condiciones de la recta, incluso de las condiciones del tramo que la comprende o de las condiciones de contorno de la misma, pero sirve como base para el desarrollo de modelos de perfiles de velocidad de operación. [37]

Los modelos estáticos más conocidos son:

- Modelo de Ottesen y Krammes (2000).
- Modelo de Fitzpatrick y Collins (2000).
- Modelo de Easa (2003)

Rectas no independientes: Son de menor longitud, de tal forma que los conductores no llegan a desarrollar su velocidad deseada por estar coartados por el carácter geométrico general de la vía o, al menos, por las alineaciones anterior y/o siguiente. En estos casos la dispersión de las velocidades es menor, existiendo algunos modelos de estimación de la velocidad que consideran algunas variables geométricas, como la longitud o los radios de las curvas adyacentes. [37]

Ese mismo año, Polus [33] tomaron datos de velocidades en rectas y en el punto medio de las curvas adyacentes y calcularon el percentil 50 y 85 de la velocidad de

operación y la desviación típica. Debido al gran número de variables, se optó por realizar dos modelos:

- Uno considerando únicamente las variables que más correlación presentan
- Otro considerando también las variables de menor correlación (variables secundarias).

Tanto las variables primarias como las secundarias son estadísticamente significativas.

Luego apareció otro modelo que utilizó velocidades como variables independientes. En él se parte de la hipótesis de que las variables que más influencia tienen sobre la velocidad de operación de una recta son la longitud de la misma y la velocidad de operación de la curva precedente, dando como resultado la siguiente ecuación. [37]

$$V_{85} = -2.351 + 18.104 * \log_{10} L + 0.585 * V_{85C}$$

Donde:

V_{85} = velocidad de operación de la recta (km/h)

L = Longitud de la recta (m)

V_{85C} = Velocidad de la curva precedente (km/h)

Este modelo sobreestima ligeramente las velocidades de operación de las rectas con longitud inferior a 200 metros, pero en general se adapta bien a cualquier recta. Este modelo depende de la velocidad deseada, aunque no directamente. Esta velocidad se encuentra implementada en el modelo que calcula la velocidad de operación en la curva precedente. En el caso de que la velocidad resultante sea superior a la velocidad deseada (en posibles casos de rectas muy largas precedidas por curvas de radio amplio), se debe sustituir el valor por esta última. [37]

2.4.3 Modelos para la estimación de las variaciones de velocidad en las transiciones recta-curva

Como parámetro para la estimación de la seguridad, es importante conocer, la reducción de velocidad que se da entre una alineación y la siguiente (en los casos en que la velocidad de la segunda alineación sea menor). De hecho, es más influyente sobre la siniestralidad la reducción de velocidad que se da a la salida de una recta y en la entrada de la siguiente curva que las velocidades independientes a las que se circule por cada una de ambas alineaciones.

La variación de la velocidad de operación entre dos alineaciones puede definirse, al igual que la velocidad de operación, mediante un percentil.

Podría parecer, en un primer instante, que el percentil 85 de la reducción entre una alineación y la siguiente, de menor velocidad, es la resta de sus velocidades de operación, expresadas como percentiles 85. Si ello fuera cierto, sería posible emplear los perfiles de velocidad como estimadores de dicha reducción, y, como objetivo último, poder contar con otro parámetro que puede servir para la estimación de la seguridad. [37]

Sin embargo, lo comentado anteriormente no es cierto. La reducción de velocidad de percentil 85 no es la resta directa de las velocidades de percentil 85 de dos alineaciones, ya que al hacer esta operación no se está considerando a un mismo conductor en cada una de las mismas. Además, las distribuciones de velocidad de ambas alineaciones no son las mismas.

A partir de este estudio, llegaron a la conclusión de que el percentil 85 de la máxima reducción de la velocidad es sustancialmente mayor que la resta de las velocidades de percentil 85.

Existen diversos estudios encaminados a verificar realmente de qué depende la mayor o menor reducción de la velocidad a la salida de una recta y entrada a una

curva. Se han definido nuevas variables e incluso se han calibrado modelos para estimar dicha reducción. [37]

Las variables utilizadas para el estudio del diferencial de velocidad entre elementos consecutivos son:

- $\Delta_{85}V$ Indica diferencial de velocidad que no es superado por el 85% de los vehículos en condiciones de flujo libre. Esta variable se calcula como el percentil 85 de la distribución de Δv_i , donde Δv_i es el decremento desde la velocidad de la recta precedente a la curva para el vehículo i .
- Δ_{85} Este parámetro representa el incremento de las velocidades de operación de percentil 85. Su obtención es por sustracción directa, partiendo de modelos discretos de estimación de la velocidad de operación o de un modelo continuo.

$$\Delta V_{85} = V_{85,i+1} - V_{85,i}$$

- 85MSR. Se define la variable 85MSR como el percentil 85 de las máximas reducciones de velocidad individuales a lo largo de una sección formada por los últimos 200 metros de la recta de aproximación y el punto medio de la curva. Cada reducción máxima de velocidad es tomada como la diferencia entre la máxima velocidad en la recta de aproximación y la mínima velocidad en la curva para un conductor individual. [37]

$$85MSR = (\max \Delta v_i)_{85}$$

2.5 PERFIL DE VELOCIDAD DE OPERACIÓN

Los perfiles de velocidad representan la variación de la velocidad de diseño o de operación a lo largo de la geometría de las carreteras. Es uno de los datos de entrada más relevantes para los análisis de seguridad y, en particular, para el análisis de consistencia del diseño geométrico. Para construir estos perfiles de

velocidad se requiere contar con modelos que permitan correlacionar la velocidad de operación con la geometría de la carretera. [39]

Los modelos de perfiles de velocidad habitualmente escogen modelos discretos de estimación de velocidades en curvas y en rectas, para posteriormente unirlos empleando un criterio en cuanto a las tasas de deceleración y aceleración. [9]

El perfil de velocidad son diagramas de velocidades vs distancias, en el van incluidos la velocidad de operación, la velocidad de diseño, la diferencia de las velocidades entre los elementos sucesivos de un tramo de vía. [40]

2.6 CONSISTENCIA DE UNA VÍA

Dentro de los factores productores de accidentalidad ocasionados en las vías de transporte terrestre se encuentran los conductores con un 95%, los vehículos 8% y la infraestructura la cual es causante del 30% de la inseguridad en las carreteras y está relacionado directamente con la consistencia del diseño geométrico, a la vez determinante en la comodidad del conductor representando en la velocidad de operación del vehículo, en la cual no se vea sorprendido con cambios bruscos en el diseño geométrico, logrando así la disminución de los accidentes viales. Para la determinación de la consistencia en una vía se utilizan principalmente el perfil de velocidad de operación, identificada como el percentil 85 de la distribución de velocidades de vehículos circulando bajo condiciones de flujo libre en un tramo de la carretera. [40]

Lograr una buena consistencia vial se traduce en una carrera con diseño de elementos geométricos que ofrecen al usuario (conductor) tramos de vías con velocidad de operación evitando maniobras críticas.

Los criterios de Lamm se utilizarán en la evaluación de la consistencia vial, estos criterios se basan en el análisis de velocidades descrito a continuación:

- **Criterio I. Consistencia en el diseño**

Comparación entre la velocidad de diseño (V_d) y la de operación (V_{85})

Tabla 3 Criterio I de Lamm

BUENO	REGULAR	MALO
$ V_{85} - V_d \leq 10 [km/h]$	$10 < V_{85} - V_d \leq 20 [km/h]$	$ V_{85} - V_d > 20 [km/h]$

Fuente [40]

- **Criterio II. Consistencia en la velocidad de operación**

Comparación entre velocidades de operación (V_{85}) entre los elementos consecutivos del trazado.

Tabla 4 Criterio II de Lamm

BUENO	REGULAR	MALO
$ V_{85i} - V_{85i+1} \leq 10 \left[\frac{km}{h} \right]$	$10 < V_{85i} - V_{85i+1} \leq 20 \left[\frac{km}{h} \right]$	$ V_{85i} - V_{85i+1} > 20 \left[\frac{km}{h} \right]$

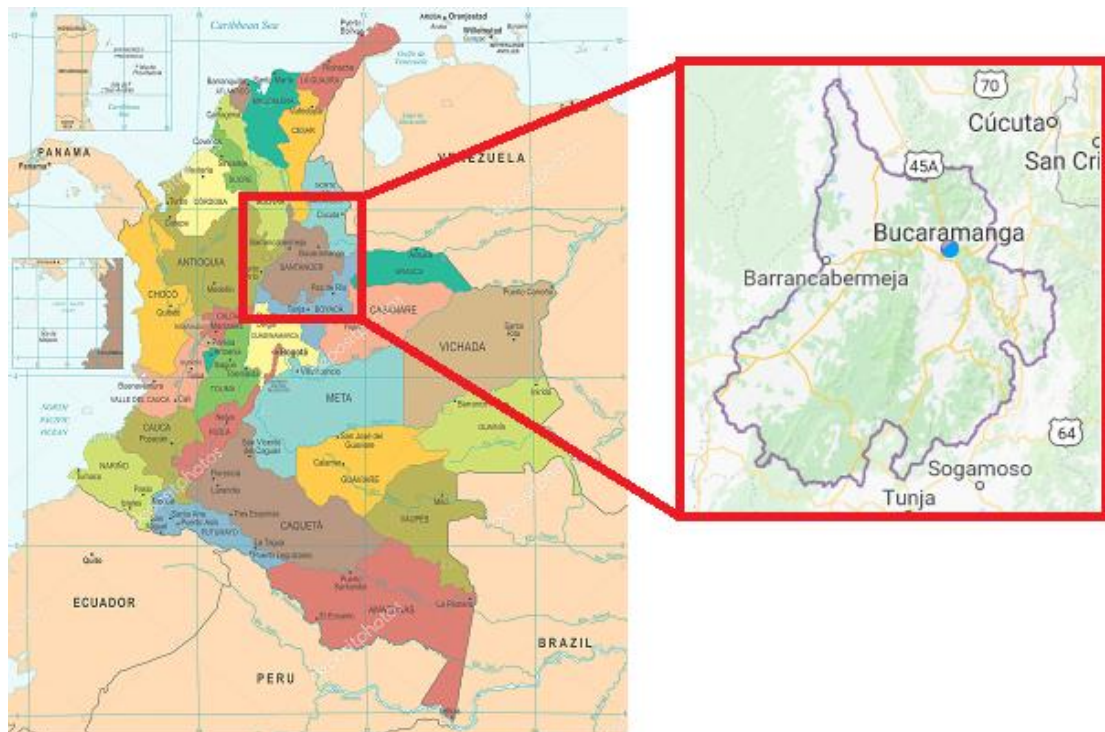
Fuente [40]

3. METODOLOGIA

3.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL PROYECTO

Este tramo en estudio hace parte de una vía nacional que representa un canal de comunicación fundamental el cual conecta a la capital del departamento de Santander (Bucaramanga) con el municipio de Barrancabermeja, el tramo en estudio está ubicado entre el Km 12+938 vía la fortuna hasta el Km 19+473 vía la Lizama.

Figura 5 Ubicación geográfica del proyecto



Fuente. Tomado y adaptado de AraBlog.co

Figura 6 Localización del proyecto, tramo de vía que comunica a Bucaramanga con Barrancabermeja el cual inicia en el Km 12+938 vía la fortuna hasta el Km 19+473m vía la Lizama.



Fuente. Google Maps

Esta vía nacional representa un crecimiento económico para las dos regiones, posee un alto flujo de vehículos de todo tipo con diferentes fines, en los últimos años ha recibido una serie de mantenimientos en cuanto a la repavimentación de algunos km de su calzada y señalización, las cuales se llevaron a cabo con la intención de aumentar la comodidad del conductor y disminuir la accidentalidad presentada en sus diferentes tramos.

Este tramo de vía está bajo la concesión vial “Ruta del cacao” la cual liderará el diseño, construcción, financiación, operación y mantenimiento de la Autopista BBY (Bucaramanga-Barrancabermeja-Yondó) en Colombia. La concesión será responsable del desarrollo, operación y mantenimiento de este proyecto. [41]

3.2 ASPECTOS TECNICOS DEL TRAMO

3.2.1 Diseño Geométrico

En la información recolectada a continuación se enseñan 2 tramos a cargo de la concesión ruta del cacao, dentro de los cuales se realizó la investigación.

3.2.1.2 Tramo vial PR00+00 vía la fortuna hasta PR14+00 Peaje rio Sogamoso

Posee una longitud de 14 km, discurre sobre terreno plano a ondulado predominando terraplenes bajos; la velocidad de diseño adoptada des de 80 km/h, exceptuando las proximidades de la intersección en la fortuna donde las curvas cumplen para la velocidad de diseño de 60 km/h. [42]

A continuación, en la tabla 5 se presenta un cuadro con los aspectos geométricos relevantes del tramo.

Tabla 5 Aspectos Geométricos relevantes del tramo vial PR00+00 vía la fortuna hasta PR14+00 Peaje rio Sogamoso

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR
Tipo de terreno	N/A	Plano a ondulado
Clasificación de la vía	N/A	Primaria de una calzada
Tipo de vehículo de Diseño		Tracto camión 3S2
Longitud	Km	14
Velocidad del proyecto	Km/h	80
Radio mínimo	m	229.0
Pte. Transversal (Bombeo normal)	%	2.00
Peralte máximo	%	8.0
Pte. Long. Máximo	%	7.00
Pte. Long. Mínimo	%	0.50
Numero de calzadas	Un	1
Número de carriles	Un	2
Ancho de carril	m	3.65
Ancho de berma exterior	m	1
Ancho de berma interior	cm	0.50

Fuente Tomado y adaptado de la ANI [42]

3.2.1.3 Tramo vial El retén PR01+00 hasta La Lizama PR30+00

Posee 29 km de longitud sobre terreno plano – ondulado. El tramo inicia en el retorno de El retén y finaliza en la intersección de la Lizama. La velocidad de diseño adoptada es de 80 km/h.

A continuación, en la tabla 6 se presenta un cuadro con los aspectos geométricos relevantes del tramo.

Tabla 6 Aspectos relevantes del Tramo vial El retén PR01+00 hasta La Lizama PR30+00

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR
Tipo de terreno	N/A	Plano a ondulado
Clasificación de la vía	N/A	Primaria de una calzada
Tipo de vehículo de Diseño		Tracto camión 3S2
Longitud	Km	29
Velocidad del proyecto	Km/h	80
Radio mínimo	m	229.0
Pte. Transversal (Bombeo normal)	%	2.00
Peralte máximo	%	8.0
Pte. Long. Máximo	%	7.00
Pte. Long. Mínimo	%	0.50
Numero de calzadas	Un	1
Número de carriles	Un	2
Ancho de carril	m	3.65
Ancho de berma exterior	m	2.00
Ancho de berma interior	m	1.00

Fuente Tomado y adaptado de la ANI [42]

3.2.2 Tránsito

El TPD (tránsito promedio diario) se refiere al volumen de tránsito promedio en el tramo de investigación, este dato es la medida de tránsito fundamental y está definida como el número total de vehículos que pasan por el tramo durante un periodo de un día.

A efecto de la investigación se darán a conocer dos TPD que hacen parte de dos estaciones usadas por el INVIAS para la recolección de datos. [43]

Estación 1.143

Esta estación es la encargada de realizar el conteo en el tramo La Lizama – Barrancabermeja, en la tabla 7 se muestra el tránsito promedio diario del 2016.

Tabla 7 Histórico Tránsito Promedio Diario (TPD) 2016, tramo La Lizama-Barrancabermeja

HISTORICO TPD 2016	
Estación	1.143
Conteo total	4.276
%Automóviles	64
%Buses	7
%Camiones	29
Año	2016

Fuente INVIAS [43]

Estación 682

Esta estación es la encargada de realizar el conteo en el tramo LA LIZAMA – LA RENTA, en la tabla 8 se muestra el tránsito promedio diario del 2016

Tabla 8 Histórico Tránsito Promedio Diario (TPD) 2016, tramo La Lizama-La Renta

HISTORICO TPD 2016	
Estación	682
Conteo total	4.993
%Automóviles	62
%Buses	10
%Camiones	29
Año	2016

Fuente INVIAS [43]

TPD años 2013 – 2014 – 2015

Tabla 9 Tramo La Lizama – Barrancabermeja

HISTORICO TPD 2013		HISTORICO TPD 2014		HISTORICO TPD 2015	
Estación	1.143	Estación	1.143	Estación	1.143
Conteo total	6770	Conteo total	4305	Conteo total	5615
%Automóviles	36	%Automóviles	61	%Automóviles	62
%Buses	9	%Buses	10	%Buses	12
%Camiones	55	%Camiones	29	%Camiones	26
Año	2013	Año	2014	Año	2015

Fuente INVIAS [43]

Tabla 10 Tramo LA LIZAMA – LA RENTA

HISTORICO TPD 2013		HISTORICO TPD 2014		HISTORICO TPD 2015	
Estación	682	Estación	682	Estación	682
Conteo total	5418	Conteo total	4999	Conteo total	4755
%Automóviles	60	%Automóviles	60	%Automóviles	51
%Buses	8	%Buses	6	%Buses	13
%Camiones	32	%Camiones	34	%Camiones	36
Año	2013	Año	2014	Año	2015

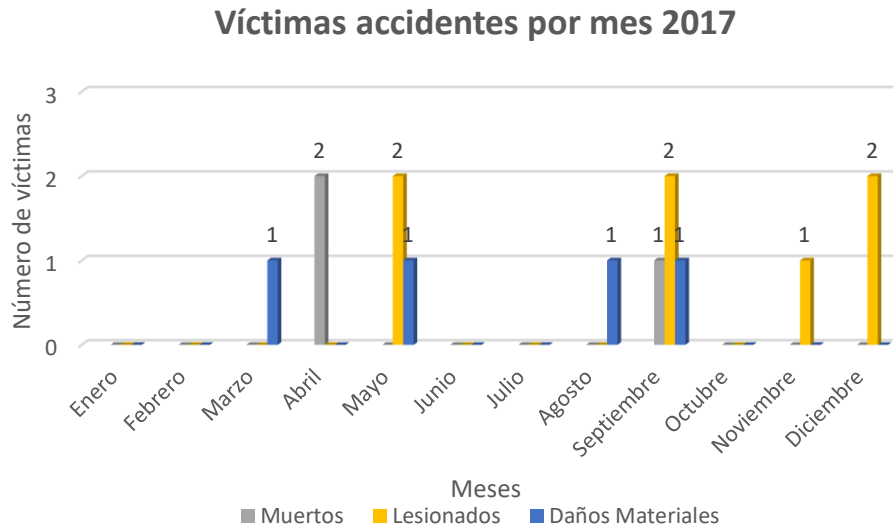
Fuente INVIAS [43]

3.2.3 Accidentalidad

Por medio de solicitudes escritas a la dirección de tránsito y transporte seccional Santander y la dirección de tránsito y transporte del Magdalena medio se logró acceder a la información de accidentalidad, para posteriormente filtrarla, procesarla y enfocarla hacia el tramo en estudio, dando como resultado la siguiente información. [44] [45]

Victimas año 2017

Figura 7 Víctimas de accidentes por mes del año 2017



Fuente Tomado y adaptado de [44] [45]

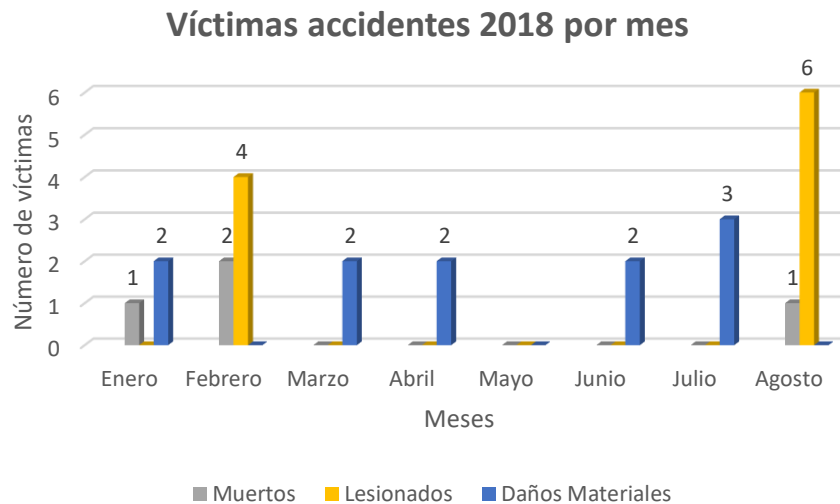
Tabla 11 Total de víctimas año 2017

Muertos	Lesionados	Daños materiales
3	7	4
Número total víctimas		14

Fuente Tomado y adaptado de [44] [45]

Victimas año 2018

Figura 8 Víctimas de accidentes por mes del 2018



Fuente Tomado y adaptado de [44] [45]

Tabla 12 Total de víctimas año 2018

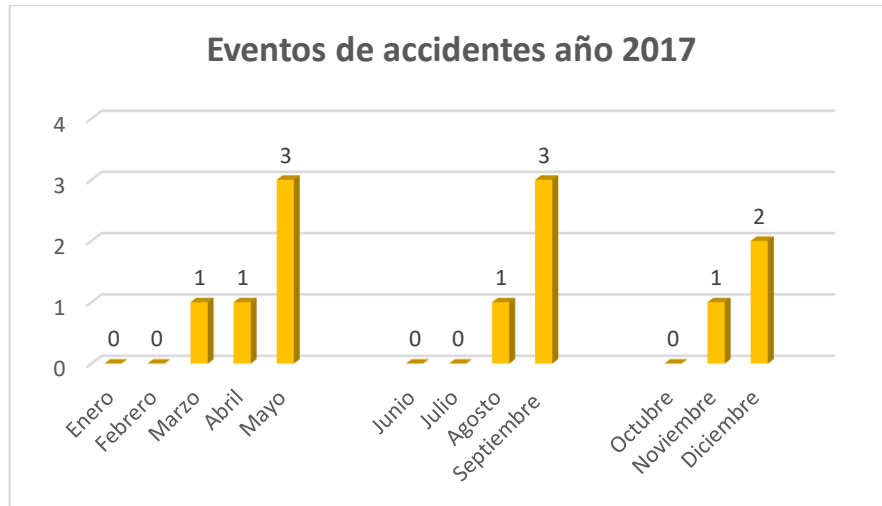
Muertos	Lesionados	Daños materiales
4	10	11
Número total víctimas		24

Fuente Tomado y adaptado de [44] [45]

Realizando una comparativa entre las víctimas del año 2017 y 2018 en un periodo que va desde el mes de enero-agosto de 2017 y enero-agosto de 2018 se encuentra que para el año 2018 a la fecha de agosto el número de víctimas aumentó en un 118% respecto al año 2017 el cual es un cambio representativo.

Eventos de accidentalidad año 2017

Figura 9 Eventos de accidentes año 2017

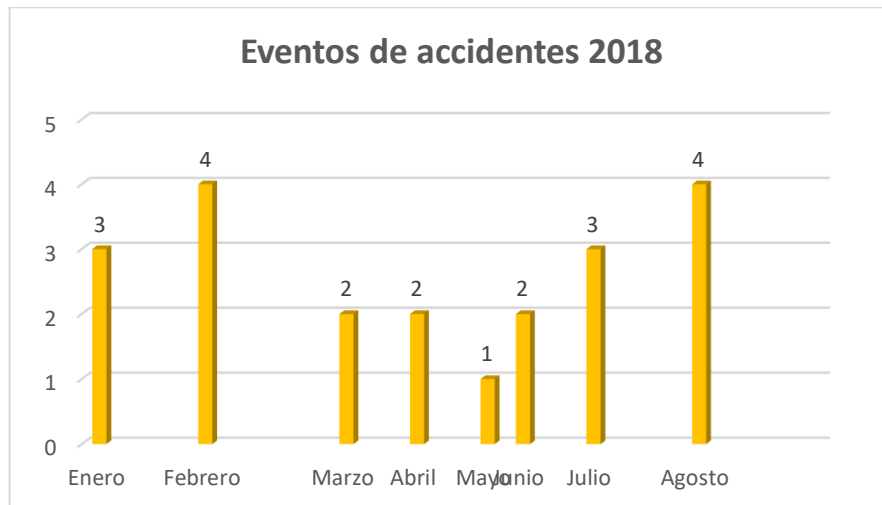


Fuente Tomado y adaptado de [44] [45]

Número de eventos en el año 2017: 12

Eventos de accidentalidad año 2018

Figura 10 Eventos de accidentes año 2018



Fuente Tomado y adaptado de [44] [45]

Numero de eventos hasta agosto del año 2018: 21

Realizando una comparativa entre los eventos accidentales del año 2017 y 2018 en un periodo que va desde el mes de enero-agosto de 2017 y enero-agosto de 2018 se encuentra que para el año 2018 a la fecha de agosto el número de víctimas aumentó en un 42%% respecto al año 2017 el cual es un cambio representativo.

3.3 RECOPIACIÓN DE DATOS

Con la intención de llevar a cabo el desarrollo de la investigación se debe hacer uso de las velocidades de operación en el tramo y de las características geométricas del mismo.

A través del recorrido de 30 kilómetros se realizó un reconocimiento de la vía en el cual se tomó nota del estado del pavimento, presencia de cruces, puentes o reductores de velocidad entre otros aspectos que influyeran en la curva alterando su velocidad, a esto se encontró que no hay presencia de ninguno de los anteriores factores en el tramo, por lo cual no se omitió ninguna curva.

3.3.1 Datos recolectados de la geometría del tramo en estudio

Se procedió a realizar el diseño geométrico en del tramo AutoCAD Civil 3D a partir del eje vial que generó el equipo Vbox.

3.3.2 Datos de la velocidad de operación en el tramo de estudio

Actualmente en Colombia no se lleva a cabo un registro de velocidades de operación por parte de ninguna entidad, se encontraron velocidades de operación en algunos otros trabajos investigativos, pero ninguno en el área del proyecto, por lo cual se realizan mediciones para determinar la velocidad a flujo libre de vehículos livianos en la zona de estudio y se realizó de la siguiente manera:

Usando dos días para la toma de datos se inició el primer día a las 10:00 am y se finalizó a las 6:00 pm, el segundo día se inició a las 2:00 pm y se finalizó a las 8:00 pm en estos dos días se tomó registro de perfiles de velocidad realizando 22 recorridos en el tramo con un equipo GPS llamado VBOX lite, el cual se instaló en cada uno de los vehículos; para proceder con la toma de datos se seleccionaron 23

personas y 20 vehículos livianos teniendo en cuenta que con los vehículos No. 19 y No. 20 se realizaron 2 recorridos cada uno con 4 conductores diferentes, distribuidos entonces en 12 viajes en sentido la Fortuna Km 12+938 hasta la Lizama Km 19+473m y 11 viajes en el sentido la Lizama Km 19+473m hasta la Fortuna Km 12+938 para un total de 23 viajes, el tramo cuenta con exactamente 30,084 kilómetros de recorrido.

Una vez se hizo la primera toma de datos se procedió a la visualización de estos en un computador donde previamente se instaló el software VBOX Tools, el cual muestra el perfil de velocidad, video del trayecto y una silueta del tramo, una vez visto el material se procedía a realizar el vaciado de las memorias para realizar otro recorrido.

Cabe aclarar que cada recorrido se realizó con el acompañamiento de una persona encargada de la manipulación de los equipos y de dar las instrucciones al piloto sobre los puntos de inicio y finalización del recorrido.

Cada recorrido tuvo una duración de 25 a 30 minutos aproximadamente sin tener en cuenta el tiempo de instalación de los equipos en el vehículo el cual era de 10 minutos aproximadamente. El clima a la hora de la toma de datos fue fresco, con poca nubosidad y buena visibilidad.

A cada uno de los conductores se les realizó una encuesta con la que se quiere complementar la investigación.

3.3.3 Medios de recolección de datos

Fue necesaria la intervención de 2 personas que conocieran el funcionamiento del equipo GPS Vbox y de los conductores que voluntariamente aceptaron facilitar su participación en la realización del recorrido, a continuación, se muestran más detalles.

Estudiantes a cargo de la tesis: Realizaron la manipulación de los equipos, insertando las memoras de datos, dando coordenadas de inicio, fin, paradas e instrucciones con alta precisión a cada uno de los conductores con el fin de minimizar el error humano en la toma de los datos.

Conductores: Estaban conformados por personas de diferentes edades y ocupaciones, cada uno con diferente experiencia de manejo, fueron seleccionados al azar, como requisitos para participar en la toma de datos se solicitó cumplir lo siguiente:

- Personas mayores de edad con licencia de conducción categoría B1 activa.
- No presentar ningún tipo de alteración en sus sentidos por bebidas alcohólicas o drogas.
- Al momento de la prueba no presentar cansancio o agotamiento.
- Debe tener pleno conocimiento del manejo de vehículo liviano.

A continuación, se presenta una tabla con la edad, género, sentido del recorrido y número de conductores que cumplió con los requisitos al momento de ejecutar la toma de datos.

Tabla 13 Sentidos de los recorridos

P-B	Bucaramanga– Barrancabermeja
B-P	Barrancabermeja- Bucaramanga

Fuente Elaboración Propia

Tabla 14 Resultados encuestas a conductores

	NÚMERO DEL CONDUCTOR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
DATOS DEL CONDUCTOR	Edad	40	32	52	23	50	55	45	25	21	35	40
	Género	M	F	M	M	M	M	M	M	F	M	M
	Sentido	P- B	B- P	P- B	B- P	P- B	B- P	P- B	B- P	P- B	B- P	P- B

	NÚMERO DEL CONDUCTOR	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
DATOS DEL CONDUCTOR	Edad	54	43	37	26	33	41	25	28	34	21	34	22
	Genero	M	M	F	F	M	M	M	M	M	M	M	M
	Sentido	B- P	P- B	B- P	P- B	B- P	P- B	B- P	P- B	B- P	P- B	B- P	P- B

Fuente Elaboración Propia

Cabe aclarar que cada uno de los conductores realizo un único recorrido.

Cada uno de los conductores recibió una explicación acerca de la toma de datos y que se deseaba lograr con esta, aclarando también que los datos recolectados únicamente tendrían usos investigativos en la tesis de grado y que no deberían sentir ningún tipo de presión relacionada a radares de velocidad o sanciones por maniobras inadecuadas de parte de alguna entidad del estado, ya que la presencia del equipo GPS con la cámara conectada podría llegar a generar que los conductores se sintieran incomodos o cohibidos para manejar a flujo libre.

A ninguno de los conductores se le dio alguna instrucción sobre normas de tránsito ni límites de velocidad del tramo, de esta manera logramos una actitud natural al momento de que estos realizaran el recorrido, teniendo como fin datos libres de algún tipo de influencia.

3.3.4 Elementos prácticos utilizados para la recolección de datos

Memoria micro SD: Se usaron en total 2 memorias marca Kingston clase 10 con una velocidad de transferencia de 45 Mb/s las cuales eran de 32 y 8 Gb de almacenamiento, en las cuales era posible albergar hasta 2 recorridos en calidad HD (Sin audio) en la de 8gb y hasta 7 recorridos en calidad HD (Sin audio), una vez se hacia el recorrido se ingresaba al PC y se descargaba la información en una carpeta previamente creada respecto al orden del recorrido.

Adaptadores micro SD a SD: Se utilizaron en total 2 adaptadores, estos dispositivos permiten convertir Micro SD a SD de tal manera que el puerto del computador aceptara este formato SD, con lo cual se logra descargar la información al computador.

Software mobil GPS Odometer: Este Software es de libre descarga desde la Apple Store de IOS o desde la Play Store de Android, con este odómetro digital fue posible realizar las mediciones de distancias desde puntos de referencia establecidos en el entorno hasta abscisas de inicio y fin en la toma de los datos, esto permitiendo una ubicación geográfica exacta para poner el punto cero con mayor precisión.

Computadoras portátiles: Se hizo uso de dos computadores previamente equipados con el software requerido para el procesamiento de la información obtenida con el Vbox Lite, de tal manera que se logró acceder a ésta y usarla para realizar tablas, graficas, siluetas del tramo, velocidades y distancias de interés para la investigación.

GPS Vbox lite: Este dispositivo una vez instalado en el vehículo y a partir de tener una velocidad superior a 3 km/h, permite capturar en video HD el recorrido y simultáneamente obtener la posición o distancia, velocidad y aceleración de un vehículo, así mismo posee un motor GPS de 10 HZ que se conecta a 8 satélites para dar medidas de alta precisión, toda esta información está integrada en tiempo real.

La toma de datos de este dispositivo es de cada 0,1 segundos donde permite también obtener datos de latitud, longitud, velocidad, altura, ángulo de Heading, velocidad vertical, aceleración longitudinal, lateral y distancia.

Los sistemas VBOX de gama alta utilizados para pruebas automotrices (es decir, Advanced Driver Assistance Systems) pueden proporcionar una precisión posicional de hasta 2 cm. Este nivel de precisión generalmente no se requiere para los usuarios de la minería, donde se muestran a continuación los productos comunes de VBOX utilizados en el sitio. [46]

En la siguiente tabla se muestra el error que puede presentar el dispositivo Vbox lite durante la toma de datos.

Tabla 15 Error posible en el dispositivo Vbox lite

Producto	Velocidad	Distancia	Posicionamiento Absoluto	Altura	Grados	Aceleración
Vbox Lite 10 Hz	0,1 Km/h	0,05%	± 3m	± 10m	0,3°	1%

Fuente Tomado y adaptado de [46]

Figura 11 Dispositivo Video BOX Lite



Fuente Tomado y adaptado de [46]

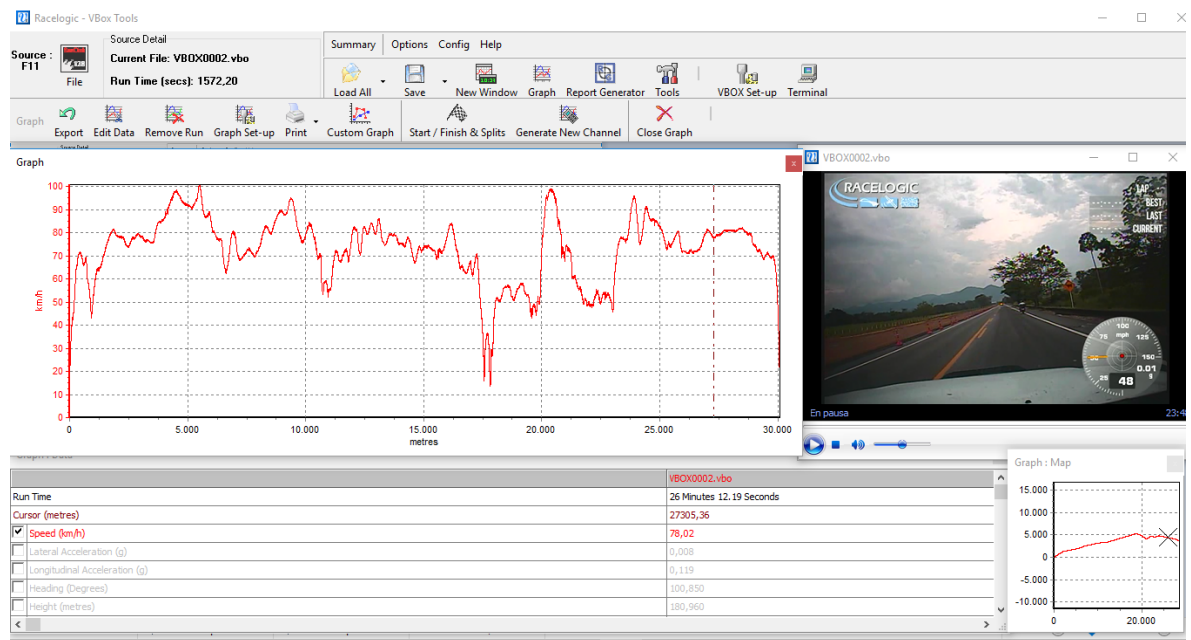
Características destacas del dispositivo Vbox lite:

- Fácil de usar, este dispositivo no requiere de un amplio conocimiento especializado o profesional en el área.
- Cuenta con dos cámaras resistentes al agua una de ellas con la capacidad de grabar en HD y la otra en Low Res (Baja resolución)
- Usa formatos de grabación comunes lo cual facilita la visualización de video en la mayoría de dispositivos.

- Posee accesorios fáciles de montar y desmontar.
- Es adaptable a cualquier tipo de vehículo.
- El software es multi-plataforma lo cual facilita la instalación del software en 32 Y 64 bits de la mayoría de versiones Windows.
- Es intuitivo con el usuario.
- Permite la grabación de video con audio o sin él.
- Multi lenguaje.
- Facilita la interpretación de datos en diferentes unidades km/h o Mph.
- Posee soportes regulables en altura y profundidad para la cámara, lo cual facilita el montaje en los vehículos.

Software de Análisis

Figura 12 Visualización de programa VBox Tools



Fuente Elaboración propia

Una vez instalado el Vbox Tools, en la parte superior despliega una barra de herramientas, debajo de ésta muestra una ventana que contiene un gráfico principal con datos de distancia vs velocidad, en la parte inferior se tiene una tabla de datos con velocidad, distancia y tiempo, adicional se tiene el visualizador de video y finalmente en la parte derecha inferior hay un recuadro con una silueta del trazado vial calculada a partir de datos de altitud y longitud en combinación con la ventana del gráfico principal que se puede usar para definir líneas de inicio/fin y puntos de división.

Cada una de estas ventanas de visualización se puede redimensionar maximizando la ventana al tamaño deseado y un dato adicional es que todas estas ventanas se pueden imprimir.

El software facilita la edición de los datos, así como la exportación en diferentes formatos ya sean textos, Excel, o imágenes.

3.4 DESARROLLO DE DATOS RECOLECTADOS

Con la información previamente recolectada en la metodología mencionada, se procede a hacer uso de los datos tomados por el GPS Vbox abordo de los vehículos que realizaron el recorrido en el tramo.

Se hace una conversión de la información del GPS Vbox lite en formato (Vbo) a formato DWG con el fin de extraer el eje vial con coordenadas geográficas de BOG Colombia.

3.4.1 Pasos conversión formato Vbo a Kml

Figura 13 Pasos conversión formato Vbo a Kml

- 1** Abrir Vbox Tools.
- 2** Cargar archivo .Vbo
- 3** Presionar “Tools”
- 4** Seleccionar “Export Data”
- 5** Export to Google Earth
- 6** Presiona Ok y Guardar

Fuente Elaboración Propia

3.4.2 Pasos conversión formato Kml a Dwg con coordenadas Bogotá Colombia.

Figura 14 Pasos conversión formato Kml a DWG

- 1** Abrir Global Mapper
- 2** Seleccionar "TOOLS"
- 3** Coordinate converter
- 4** Select Output coordinate
- 5** Search by EPSG Code
- 6** Ingresar Código 3116
- 7** Presione Aceptar - Close
- 8** Seleccione "TOOLS"
- 9** Presione Configure
- 10** Pestaña "Proyection"
- 11** Presiona Search by EPSG Code
- 12** Ingresar Código 3116

Fuente Elaboración Propia

Figura 15 Continuación pasos conversión formato Kml a DWG



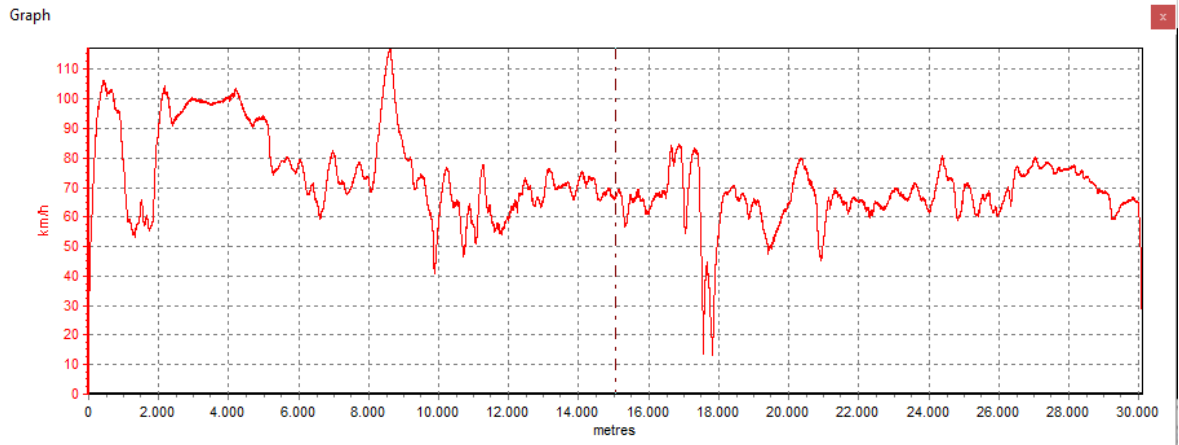
Fuente Elaboración Propia

Una vez el archivo este en formato DWG se procede a realizar el diseño de la vía en el programa AutoCAD Civil 3D, esto con el fin de obtener abscisas, elementos de la curva PC, PI, PT, radios, entretangencias y ángulos de deflexión fundamentales para cálculos de la velocidad de operación de Lamm y velocidades específicas entre otros datos.

Perfiles de velocidad

Estos perfiles muestran la velocidad y la distancia que recorre cada vehículo en determinado tramo, se obtienen a partir del dispositivo GPS Vbox y junto a las abscisas del diseño vial elaborado en AutoCAD Civil 3D es posible identificar la velocidad en el punto medio de cada curva.

Figura 16 Perfiles de velocidad del programa Vbox Tools

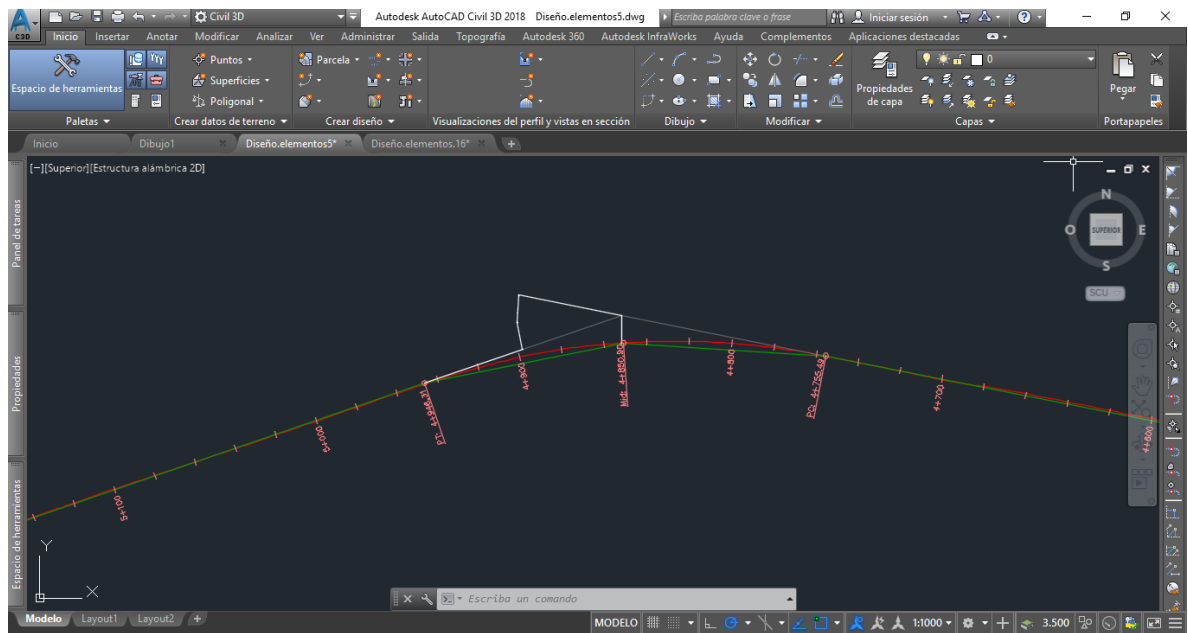


Fuente Elaboración Propia

3.4.3 Diseño vial

El diseño en AutoCAD Civil 3D del tramo vial permite visualizar abscisas, ángulos de deflexión, entretangencias y elementos de curva, fundamentales para conocer la velocidad en el punto medio de la curva (PI).

Figura 17 Diseño vial con AutoCAD Civil 3D



Fuente Elaboración Propia

3.4.4 Calculo velocidad de operación v85 con Matemática 11

Este programa es usado para calcular la velocidad de operación (V85), la desviación estándar y la media aritmética en Wolfram Mathematica es el siguiente.

A continuación, se describe un paso a paso:

Figura 18 Pasos para calcular Velocidad de Operación (V85), Desviación Estándar y la Media Aritmética en Wolfram Mathematica

- 1 Usar la función `Import[]` para importar el Excel con las velocidades de cada curva.
- 2 Guardar los datos usando la función `Lista=Import[Archivo.xlsx]`
- 3 Insertar función `Lista1=Flatten[Lista]` para eliminar el exceso de corchetes.
- 4 Insertar la función `Sort[lista1]` para ordenar los datos de mayor a menor.
- 5 Usar la función `Mean[Lista1]` para hallar la media y `StandardDeviation[Lista1]` para hallar la desviación.
- 6 Graficar la distribución normal
- 7 Usando la distribución normal calcular la función de densidad de probabilidad (PDF).
- 8 Calcular la función de Distribución Acumulada (CDF).
- 9 Calcular la función de error complementario (Erfc) por medio de la CDF.
- 10 Igualar la Erfc a 0.85 (Percentil 85) para estimar el valor de la incógnita "X", la cual corresponde a la velocidad de operación.

Fuente Elaboración Propia

4 RESULTADOS

4.1 Velocidad específica de las curvas horizontales

Para asignar la velocidad específica (V_{CH}) de las curvas horizontales incluidas en un tramo homogéneo se consideran los siguientes parámetros según el manual de diseño geométrico colombiano:

- La velocidad de diseño del tramo homogéneo (V_{TR}) en que se encuentra la curva horizontal.
- El sentido en el cual el vehículo recorre la carretera.
- La velocidad específica asignada a la curva horizontal anterior.
- La longitud del segmento recto anterior, donde se considera segmento recto a la distancia horizontal medida entre los puntos PT y PC de las curvas si son circulares es decir la entretangencia.
- El Angulo de deflexión en la curva analizada.

El tramo en estudio está conformado por una sección transversal de calzada sencilla a excepción de un tramo en doble calzada en sentido Barrancabermeja-Bucaramanga, comprendido entre la abscisa KM 18+988.77 y KM 19+675.37 que se muestra en la figura 19, en la sección que está delineada en color amarillo.

Figura 19 Tramo de doble calzada



Fuente Tomado y adaptado de INVIAS [47]

A continuación, se muestran las velocidades específicas calculadas en ambos sentidos a partir de la normativa colombiana INVIAS.

Tabla 16 Velocidad específica de las curvas horizontales sentido Bucaramanga-

No. Curva	Curvas Horizontales			Entretangencia (m)	Velocidad Específica Bucaramanga - Barrancabermeja (km/h)
	PC (m)	PI (m)	PT (m)		
1	980,14	1131,19	1282,24		100
				3473,25	
2	4755,49	4850,9	4946,31		100
				780,32	
3	5726,63	5846,22	5965,81		100
				364,95	
4	6330,76	6438,6	6546,44		100
				253,17	
5	6799,61	6888,02	6976,42		100
				821,33	
6	7797,75	8017,84	8237,92		100
				730,29	
7	8968,21	9046,85	9125,49		100
				419,51	
8	9545	9641,01	9737,01		100
				691,21	
9	10428,22	10643,9	10859,58		100
				6722,19	
10	17581,77	17720,39	17859,02		100
				511,48	
11	18370,5	18503,3	18636,09		90
				4117,79	
12	22753,88	22852,25	22950,61		100
				311,47	
13	23262,08	23359,38	23457,87		100
				4083.89	
14	27541.76	27647.06	27752.36		100

Barrancabermeja

Fuente Elaboración Propia

Tabla 17 Velocidad específica de las curvas horizontales sentido
Barrancabermeja- Bucaramanga

No. Curva	Curvas Horizontales			Entretangencia (m)	Velocidad Específica Barrancabermeja - Bucaramanga (km/h)
	PC (m)	PI (m)	PT (m)		
1	980,14	1131,19	1282,24		100
				3473,25	
2	4755,49	4850,9	4946,31		100
				780,32	
3	5726,63	5846,22	5965,81		100
				364,95	
4	6330,76	6438,6	6546,44		100
				253,17	
5	6799,61	6888,02	6976,42		100
				821,33	
6	7797,75	8017,84	8237,92		100
				730,29	
7	8968,21	9046,85	9125,49		100
				419,51	
8	9545	9641,01	9737,01		100
				691,21	
9	10428,22	10643,9	10859,58		100
				6722,19	
10	17581,77	17720,39	17859,02		100
				511,48	
11	18370,5	18503,3	18636,09		90
				352,68	
11A	18988,77	19031,9	19075,03		90
				45,26	
11B	19120,29	19169,79	19219,28		90
				237,05	
11C	19456,33	19565,85	19675,37		100
				3078,51	
12	22753,88	22852,25	22950,61		100
				311,47	
13	23262,08	23359,38	23457,87		100
				4083,89	
14	27541,76	27647,06	27752,36		100

Fuente Elaboración Propia.

4.2 Velocidad de operación de las curvas horizontales

La velocidad de operación se calculó por medio del software Wolfram Mathematica que se muestran a continuación, junto con la desviación estándar y la media aritmética de cada curva.

La media aritmética se calculó con el fin de obtener un valor representativo de los valores que se están promediando.

La desviación estándar indica qué tan dispersos están los datos con respecto a la media aritmética, mientras mayor sea la desviación estándar, mayor será la dispersión de los datos.

Tabla 18 Velocidad de operación de las curvas horizontales, Bucaramanga-Barrancabermeja

Bucaramanga-Barrancabermeja			
No. Curva	Media Aritmética	Desviación Estándar	Velocidad de Operación
1	83,3234	7,47228	91,0679
2	79,7095	10,1265	90,205
3	75,8331	12,3303	88,6127
4	76,7387	16,9764	94,3336
5	64,3586	18,4835	83,5155
6	66,5189	11,2432	78,1717
7	63,8512	14,0145	78,3762
8	68,1089	24,7563	93,7672
9	68,5083	11,9481	80,8917
10	66,3756	16,1634	83,1279
11	68,7098	13,852	83,0665
12	76,1198	20,1551	97,0093
13	74,6554	18,4261	93,7528
14	77,1892	15,3818	93,1314

Fuente Elaboración Propia

Tabla 19 Velocidad de operación de las curvas horizontales, Barrancabermeja-Bucaramanga

Barrancabermeja-Bucaramanga			
No. Curva	Media Aritmética	Desviación Estándar	Velocidad de Operación
1	69,8678	13,5163	83,8766
2	67,8959	17,6439	86,1827
3	74,6539	10,8904	85,9411
4	70,7952	11,7632	82,987
5	72,0912	11,598	84,1117
6	62,4066	14,0837	77,0035
7	71,861	10,8439	83,0999
8	69,7982	11,7102	81,935
9	56,381	13,1055	69,964
10	75,1488	14,296	89,9657
11	62,772	16,3355	79,7026
11A	57,0657	13,2887	70,8386
11B	56,5856	10,7773	67,7555
11C	58,5877	10,0976	69,0532
12	83,4915	16,7985	100,902
13	77,3198	15,0822	92,9515
14	76,2572	12,1661	88,8665

Fuente Elaboración Propia

4.3 Comparación de la velocidad de operación con la velocidad específica de las curvas horizontales

Se determinó que la velocidad específica de las curvas horizontales es la obtenida en el ítem 4.1 Velocidad específica de las curvas horizontales.

Para llevar a cabo la comparación de la velocidad de operación con la velocidad de diseño nos basamos en los criterios I y II de Lamm que se muestran a continuación.

Criterio I en este criterio se compara la velocidad de operación (V_{85}) con la velocidad de diseño, tomando su diferencia y ubicándola en su respectiva clasificación.

Criterio 2 en este criterio se compara la diferencia de la velocidad de operación entre curvas consecutivas y ubicándolo en su respectiva clasificación.

Tabla 20 Criterio I Lamm et al., Bucaramanga-Barrancabermeja.

No. Curva	Velocidad de operación (V85)	Velocidad de Diseño (Vd)	Diferencia V85-Vd	Umbral de Lamm et al.		
				Buena $ V85-Vd \leq 10$	Aceptable $10 > V85-Vd \leq 20$	Pobre $20 < V85-Vd $
1	91.068	80	11.068		X	
2	90.205	80	10.205		X	
3	88.613	80	8.613	X		
4	94.334	80	14.334		X	
5	83.516	80	3.516	X		
6	78.172	80	1.828	X		
7	78.376	80	1.624	X		
8	93.767	80	13.767		X	
9	80.892	80	0.892	X		
10	83.128	80	3.128	X		
11	83.067	80	3.067	X		
12	97.009	80	17.009		X	
13	93.753	80	13.753		X	
14	93.131	80	13.131		X	

Fuente Elaboración Propia

Tabla 21 Criterio I Lamm, Barrancabermeja-Bucaramanga

No. Curva	Velocidad de operación (V85)	Velocidad de Diseño (Vd)	Diferencia V85-Vd	Umbral de Lamm et al.		
				Buena $ V85-Vd \leq 10$	Aceptable $10 > V85-Vd \leq 20$	Pobre $20 < V85-Vd $
1	83.877	80	3.877	X		
2	86.183	80	6.183	X		
3	85.941	80	5.941	X		
4	82.987	80	2.987	X		
5	84.112	80	4.112	X		
6	77.004	80	2.997	X		
7	83.100	80	3.100	X		
8	81.935	80	1.935	X		
9	69.964	80	10.036		X	
10	89.966	80	9.966	X		
11	79.703	80	0.297	X		
11A	70.839	80	9.161	X		
11B	67.756	80	12.245		X	
11C	69.053	80	10.947		X	
12	100.902	80	20.902			X
13	92.952	80	12.952		X	
14	88.867	80	8.867	X		

Fuente Elaboración Propia

Tabla 22 Criterio II Lamm, Bucaramanga-Barrancabermeja

No. Curva	Velocidad de operación (V85)	Velocidad de Diseño (Vd)	Diferencia $ V85i - V(85i+1) $	Umbral de Lamm et al.		
				Buena $ V85i - V(85i+1) \leq 10$	Aceptable $10 > V85i - V(85i+1) \leq 20$	Pobre $20 < V85i - V(85i+1) $
1	91,068	80	0,8629	X		
2	90,205	80	1,5923	X		
3	88,613	80	5,7209	X		
4	94,334	80	10,8181		X	
5	83,515	80	5,3438	X		
6	78,172	80	0,2045	X		
7	78,376	80	15,391		X	
8	93,767	80	12,8755		X	
9	80,892	80	2,2362	X		
10	83,128	80	0,0614	X		
11	83,066	80	13,9428		X	
12	97,009	80	3,2565	X		
13	93,753	80	0,6214	X		
14	93,131	80				

Fuente Elaboración Propia

Tabla 23 Criterio II Lamm, Barrancabermeja-Bucaramanga.

No. Curva	Velocidad de operación (V85)	Velocidad de Diseño (Vd)	Diferencia $ V_{85i} - V_{(85i+1)} $	Umbral de Lamm et al.		
				Buena $ V_{85i} - V_{(85i+1)} \leq 10$	Aceptable $10 > V_{85i} - V_{(85i+1)} \leq 20$	Pobre $20 < V_{85i} - V_{(85i+1)} $
1	83,8766	80	2,3061	X		
2	86,1827	80	0,2416	X		
3	85,9411	80	2,9541	X		
4	82,987	80	1,1247	X		
5	84,1117	80	7,1082	X		
6	77,0035	80	6,0964	X		
7	83,0999	80	1,1649	X		
8	81,935	80	11,971		X	
9	69,964	80	20,0017			X
10	89,9657	80	10,2631		X	
11	79,7026	80	8,864	X		
11A	70,8386	80	3,0831	X		
11B	67,7555	80	1,2977	X		
11C	69,0532	80	31,8488			X
12	100,902	80	7,9505	X		
13	92,9515	80	4,085	X		
14	88,8665	80				

Fuente Elaboración Propia

4.4 Comparación de la velocidad de operación (V85) con la velocidad de operación por el método de Lamm.

Para llevar a cabo la comparación se utilizó la siguiente fórmula de Lamm et al. con el fin de calcular la velocidad de operación del método de Lamm:

$$V_{85} = 94.398 - \frac{3188.656}{R}$$

De acuerdo a la diferencia entre la velocidad de operación (V_{85}) y la velocidad de operación (V_{85}) Lamm se selecciona el umbral de los criterios I y II al cual pertenece el resultado de la diferencia, los resultados se muestran a continuación.

Tabla 24 Criterio I comparación velocidad de operación (V85) y la velocidad de operación por el método de Lamm (V85Lamm) sentido Bucaramanga-Barrancabermeja

No. Curva	Velocidad de Operación (V85)	RADIO	V85 Lamm	Diferencia	Umbral de Lamm et al.		
					Buena $ V85 - V85Lamm \leq 10$	Aceptable $10 > V85 - V85Lamm \leq 20$	Pobre $20 < V85 - V85Lamm $
1	91,0679	1206,427	91,757	0,689	x		
2	90,205	361,906	85,589	4,616	x		
3	88,6127	345,357	85,167	3,446	x		
4	94,3336	358,457	85,504	8,829	x		
5	83,5155	686,601	89,756	6,240	x		
6	78,1717	341,259	85,056	6,884	x		
7	78,3762	871,777	90,742	12,366		x	
8	93,7672	1161,223	91,654	2,113	x		
9	80,8917	644,315	89,451	8,559	x		
10	83,1279	650,572	89,499	6,371	x		
11	83,0665	615,538	89,220	6,153	x		
12	97,0093	558,219	88,688	8,321	x		
13	93,7528	629,825	89,337	4,415	x		
14	93,1314	534,633	88,436	4,697	x		

Fuente elaboración propia

Tabla 25 Criterio I comparación velocidad de operación (V85) y la velocidad de operación por el método de Lamm (V85Lamm) sentido Barrancabermeja-Bucaramanga

No. Curva	Velocidad de Operación (V85)	RADIO	V85 Lamm	Diferencia	Umbral de Lamm et al.		
					Buena $ V85 - V85Lamm \leq 10$	Aceptable $10 > V85 - V85Lamm \leq 20$	Pobre $20 < V85 - V85Lamm $
1	83,8766	1206,427	91,757	7,880	x		
2	86,1827	361,906	85,589	0,593	x		
3	85,9411	345,357	85,167	0,774	x		
4	82,987	358,457	85,504	2,517	x		
5	84,1117	686,601	89,756	5,644	x		
6	77,0035	341,259	85,056	8,052	x		
7	83,0999	871,777	90,742	7,642	x		
8	81,935	1161,223	91,654	9,719	x		
9	69,964	644,315	89,451	19,487		x	
10	89,9657	650,572	89,499	0,467	x		
11	79,7026	615,538	89,220	9,517	x		
11A	708,386	337,456	84.951	14.112		x	
11B	677,555	823,059	90.526	22.770			x
11C	690,532	383,507	86.085	17.032		x	
12	100,902	558,219	88,688	12.214		x	
13	929,515	629,825	89,337	3.614	x		
14	888,665	534,633	88,436	0.430	x		

Fuente Elaboración Propia

Tabla 26 Criterio II comparación velocidad de operación (V85) y la velocidad de operación por el método de Lamm (V85Lamm) sentido Bucaramanga-Barrancabermeja

No. Curva	Velocidad de Operación (V85)	RADIO	V85 Lamm	Diferencia	Umbral de Lamm et al.		
					Buena $ V85iLamm - V(85iLamm+1) \leq 10$	Aceptable $10 > V85iLamm - V(85iLamm+1) \leq 20$	Pobre $20 < V85iLamm - V(85iLamm+1) $
1	91,0679	1206,427	91,757	6,168	X		
2	90,205	361,906	85,589	0,422	X		
3	88,6127	345,357	85,167	0,337	X		
4	94,3336	358,457	85,504	4,251	X		
5	83,5155	686,601	89,756	4,700	X		
6	78,1717	341,259	85,056	5,686	X		
7	78,3762	871,777	90,742	0,911	X		
8	93,7672	1161,223	91,654	2,203	X		
9	80,8917	644,315	89,451	0,048	X		
10	83,1279	650,572	89,499	0,279	X		
11	83,0665	615,538	89,220	0,532	X		
12	97,0093	558,219	88,688	0,649	X		
13	93,7528	629,825	89,337	0,901	X		
14	93,1314	534,633	88,436				

Fuente Elaboración Propia

Tabla 27 Criterio II comparación velocidad de operación (V85) y la velocidad de operación por el método de Lamm (V85Lamm) sentido Barrancabermeja-Bucaramanga

No. Curva	Velocidad de Operación (V85)	RADIO	V85 Lamm	Diferencia	Umbral de Lamm et al.		
					Buena $ V85iLamm - V(85iLamm+1) \leq 10$	Aceptable $10 > V85iLamm - V(85iLamm+1) \leq 20$	Pobre $20 < V85iLamm - V(85iLamm+1) $
1	83,8766	1206,427	91,757	6,168	X		
2	86,1827	361,906	85,589	0,422	X		
3	85,9411	345,357	85,167	0,337	X		
4	82,987	358,457	85,504	4,251	X		
5	84,1117	686,601	89,756	4,700	X		
6	77,0035	341,259	85,056	5,686	X		
7	83,0999	871,777	90,742	0,911	X		
8	81,935	1161,223	91,654	2,203	X		
9	69,964	644,315	89,451	0,048	X		
10	89,9657	650,572	89,499	0,279	X		
11	79,7026	615,538	89,220	0,532	X		
11A	70,8386	337,456	84.951	5,575	X		
11B	67,7555	823,059	90.526	4,440	X		
11C	69,0532	383,507	86.085	2,602	X		
12	100,902	558,219	88,688	0,649	X		
13	92,9515	629,825	89,337	0,901	X		
14	88,8665	534,633	88,436				

Fuente elaboración propia

4.5 Accidentalidad

La tabla 28 muestra las abscisas donde se presentaron casos de accidentalidad reales del año 2017, con número de muertos, número de lesionados y número de daños materiales.

Tabla 28 Accidentes año 2017

ACCIDENTES 2017				
Mes	PR	Muertos	Lesionados	Solo Daños Materiales
Enero	-	0	0	0
Febrero	-	0	0	0
Marzo	KM 01+238	0	0	1
Abril	KM 11+228	2	0	0
Mayo	KM 12+188	0	1	0
Mayo	KM 09+938	0	0	1
Mayo	KM 21+058	0	1	0
Junio	-	0	0	0
Julio	-	0	0	0
Agosto	KM 05+308	0	0	1
Septiembre	KM 11+438	0	1	0
Septiembre	KM 11+918	0	0	1
Septiembre	KM 07+903	1	1	0
Octubre	-	0	0	0
Noviembre	KM 05+238	0	1	0
Diciembre	Km 07+703	0	1	0
Diciembre	km 14+638	0	1	0
Total accidentes por condición 2017		3	7	4

Fuente Tomado y adaptado de [44] [45]

La tabla 29 muestra las abscisas donde se presentaron casos de accidentalidad reales del año 2018, con número de muertos, número de lesionados y número de daños materiales.

Tabla 29 Accidentes año 2018

ACCIDENTES 2018				
Mes	PR	Muertos	Lesionados	Solo Daños Materiales
Enero	KM 06+758	0	0	1
Enero	KM 02+650	0	0	1
Enero	KM 22+758	1	0	0
Febrero	KM 10+538	0	1	0
Febrero	KM 00+908	0	1	0
Febrero	KM 20+228	1	1	0
Febrero	KM 15+938	1	1	0
Marzo	KM 03+117	0	0	1
Marzo	KM 06+338	0	0	1
Abril	KM 10+108	0	0	1
Abril	KM 04+988	0	0	1
Mayo	-	0	0	0
Junio	KM 04+673	0	0	1
Junio	KM 10+273	0	0	1
Julio	KM 11+238	0	0	1
Julio	KM 09+718	0	0	1
Julio	KM 03+168	0	0	1
Agosto	KM 12+538	0	1	0
Agosto	KM 12+068	0	1	0
Agosto	KM 23+558	1	1	0
Agosto	KM 24+058	0	3	0
Total, de accidentes por condición 2018		4	10	11

Fuente Tomado y adaptado de [44] [45]

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Velocidad específica

Las velocidades específicas se calcularon según la tabla 1 del Manual de Diseño Geométrico [5] que está en función de la velocidad de diseño para hacer una vía en terreno plano de calzada sencilla con especificaciones de ancho de carril 3.65m es de 80 km/h [42]. Las velocidades específicas se calculan según la norma la velocidad de diseño, la entretangencia entre las curvas, el ángulo de deflexión y la velocidad específica de la curva anterior.

5.2 Velocidad de operación

5.2.1 Desviación estándar

Conforme los resultados hallados, la media aritmética de la velocidad en las curvas se nota una tendencia a variar entre 7 - 25 km/h según la curva que corresponda, esta variabilidad es deficiente ya que en las medidas de dispersión de velocidades es limitada, por lo general en estudios de velocidad esta es de 8 km/h, como valor empírico para velocidades de punto en cualquier tipo de vía y de tránsito.

El promedio de las desviaciones estándar en el sentido Bucaramanga-Barrancabermeja es de 15,1 km/h si tomamos datos de ± 3 sobre el promedio o sea velocidades que van desde ± 13 hasta ± 18 km/h encontramos que el 57,14% de las velocidades se encuentran en ese rango, el 14,29% entre 20-24 km/h y el 28,57% entre 7-11 km/h.

El promedio de las desviaciones estándar en el sentido Barrancabermeja-Bucaramanga es de 13,176 km/h si tomamos datos de ± 3 sobre el promedio o sea velocidades que van desde ± 10 hasta ± 16 km/h encontramos que el 82,35% de las velocidades se encuentran en ese rango y el 17,65% entre 16-17 km/h.

5.2.2 Comparación entre la velocidad de operación y la velocidad específica de las curvas horizontales.

Sentido Bucaramanga – Barrancabermeja

Para realizar esta comparación tomamos la diferencia entre las velocidades de operación y las velocidades específicas de las curvas. De los resultados en esta diferencia se puede observar que el promedio es de 11,50 km/h.

El promedio de las diferencias es razonable, con lo cual podemos concluir que no genera alta peligrosidad para los conductores, pero aun así de analizarse las curvas por separado cabe resaltar que se presentaron diferencias superiores a 20 km/h, esto se le es atribuye a la inconsistencia del diseño con el trazado existente.

En la tabla 30 se presenta la diferencia mínima, máxima y promedio de la velocidad en las curvas horizontales obtenidas en el sentido Bucaramanga-Barrancabermeja.

Tabla 30 Diferencia de velocidades de las curvas horizontales en sentido Bucaramanga-Barrancabermeja

Bucaramanga-Barrancabermeja	
Diferencia $ V_{85}-V_d $	Km/h
Mínimo	2,9907
Máximo	21,8283
Promedio	11,4979

Fuente Elaboración Propia

Sentido Barrancabermeja-Bucaramanga

Para realizar esta comparación tomamos la diferencia entre las velocidades de operación y las velocidades específicas de las curvas. De los resultados en esta diferencia se puede observar que el promedio es de 16,27 km/h.

El promedio de las diferencias es razonable, con lo cual podemos concluir que no genera alta peligrosidad para los conductores, pero aun así de analizarse las curvas por separado cabe resaltar que se presentaron diferencias superiores a 29 km/h, esto se le es atribuye a la inconsistencia del diseño con el trazado existente.

En la tabla 31 se presenta la diferencia mínima, máxima y promedio de la velocidad en las curvas horizontales obtenidas en el sentido Barrancabermeja-Bucaramanga

Tabla 31 Diferencia de velocidades de las curvas horizontales en sentido Barrancabermeja-Bucaramanga

Barrancabermeja-Bucaramanga	
Diferencia V85-Vd	Km/h
Mínimo	0,902
Máximo	30,9468
Promedio	16,2745235

Fuente. Elaboración Propia

Análisis de consistencia

Este análisis se realizó para ambos sentidos en base a los criterios I y II de Lamm et al, junto a los respectivos umbrales.

Criterio I:

Sentido Bucaramanga-Barrancabermeja

Aplicando el primer criterio de Lamm se obtiene que el 50% de las curvas poseen un nivel de consistencia bueno y el 50% poseen una consistencia aceptable.

Cabe mencionar que el criterio se aplicó en el sentido de la circulación vehicular.

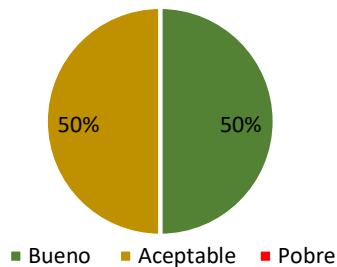
Tabla 32 Evaluación de consistencia de las curvas horizontales según criterio I - Bucaramanga-Barrancabermeja

Bucaramanga-Barrancabermeja		
Umbral de Lamm et al.	Número de Curvas	Porcentaje
Bueno	7	50%
Aceptable	7	50%
Pobre	0	0%

Fuente. Elaboración propia.

Figura 20 Evaluación en porcentaje sobre la consistencia de las curvas horizontales según criterio I sentido Bucaramanga-Barrancabermeja.

Porcentaje consistencia de las curvas horizontales según criterio I sentido Bucaramanga-Barrancabermeja.



Fuente. Elaboración Propia

Realizando el análisis de la consistencia del tramo desde la variable “Longitud” se logra obtener la distancia en metros con consistencia Buena, aceptable y pobre. A continuación, se presenta una tabla con la información del sentido Bucaramanga-Barrancabermeja acompañada de su correspondiente porcentaje respecto a la longitud total de las curvas.

Tabla 33 Análisis consistencia del tramo desde la variable “Longitud” con sentido Bucaramanga-Barrancabermeja Criterio I

Criterio I					
Bucaramanga-Barrancabermeja					
Consistencia Bueno		Consistencia Aceptable		Consistencia Pobre	
No. Curva	Longitud (m)	No. Curva	Longitud (m)	No. Curva	Longitud (m)
3	239,18	1	302,1	No Presenta	
5	176,81	2	190,82		
6	440,17	4	215,68		
7	157,28	8	192,01		
9	431,36	12	196,73		
10	277,25	13	195,79		
11	265,59	Total	1293,13		
14	210,6	Porcentaje	37,04%		
Total	2198,24				
Porcentaje	62,96%				

Fuente. Elaboración propia.

Sentido Barrancabermeja- Bucaramanga

Aplicando el primer criterio de Lamm se obtiene que el 71% de las curvas poseen un nivel de consistencia bueno, el 23% poseen una consistencia aceptable y el 6% posee un nivel de consistencia pobre.

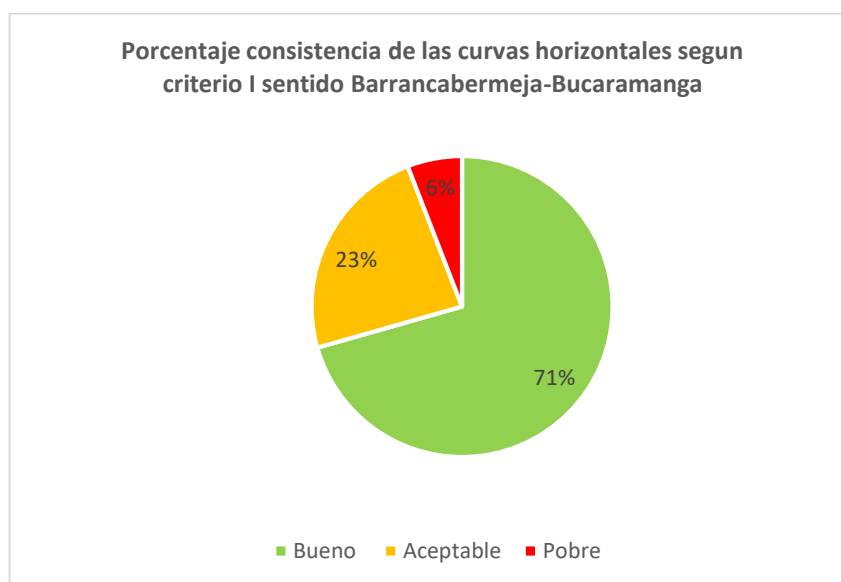
Cabe mencionar que el criterio se aplicó en el sentido de la circulación vehicular.

Tabla 34 Evaluación de consistencia de las curvas horizontales según criterio I
Barrancabermeja-Bucaramanga

Barrancabermeja-Bucaramanga		
Umbral de Lamm et al.	Número de Curvas	Porcentaje
Bueno	12	71%
Aceptable	4	23%
Pobre	1	6%

Fuente. Elaboración propia.

Figura 21 Evaluación en porcentaje sobre la consistencia de las curvas horizontales según criterio I sentido Barrancabermeja-Bucaramanga



Fuente. Elaboración propia.

Realizando el análisis de la consistencia del tramo desde la variable “Longitud” se logra obtener la distancia en metros con consistencia Buena, aceptable y pobre. A continuación, se presenta una tabla con la información del sentido Barrancabermeja-Bucaramanga acompañada de su correspondiente porcentaje respecto a la longitud total de las curvas.

Tabla 35 Análisis, consistencia del tramo desde la variable “Longitud” con sentido Barrancabermeja-Bucaramanga criterio I

CRITERIO I					
Barrancabermeja-Bucaramanga					
Consistencia Buena		Consistencia Aceptable		Consistencia Pobre	
No. Curva	Longitud (m)	No. Curva	Longitud (m)	No. Curva	Longitud (m)
1	302,1	9	431,36	12	196,73
2	190,82	11B	98,99	Total	196,73
3	239,18	11C	219,04	Porcentaje	5,08%
4	215,68	13	195,79		
5	176,81	Total	945,18		
6	440,17	Porcentaje	24,26%		
7	157,28				
8	192,01				
10	277,25				
11	265,59				
11A	86,26				
14	210,6				
Total	2753,75				
Porcentaje	70,66%				

Fuente. Elaboración propia.

A manera general respecto al criterio I de Lamm se da un gran porcentaje de curvas con criterio bueno en el sentido Bucaramanga-Barrancabermeja, conservando este porcentaje de consistencia buena en el otro sentido, es decir, Barrancabermeja-Bucaramanga, evidenciando de forma general que el tramo en cuanto a consistencia se puede clasificar como bueno-aceptable pues más del 90% de las curvas se encuentran en estas dos categorías (Buenas y aceptables para ambos sentidos).

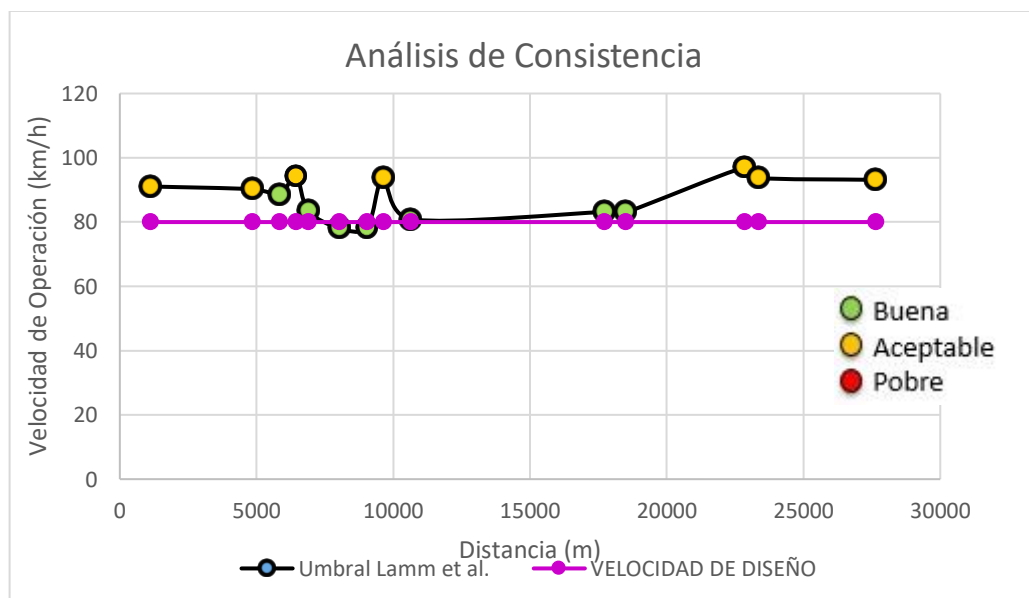
Perfil de análisis de consistencia, Criterio I:

Las figuras 22 y 23 muestran el comportamiento de la velocidad de diseño contra el comportamiento de la velocidad de operación (Grafica color morado) que contiene su correspondiente umbral ya sea bueno (Círculos verdes), aceptable (Círculos amarillos) o pobre (círculos rojos), esto en base al criterio I de Lamm et al.

Se puede observar que el número de curvas con consistencia pobre es bastante menor al número de curvas con consistencia buena y aceptable.

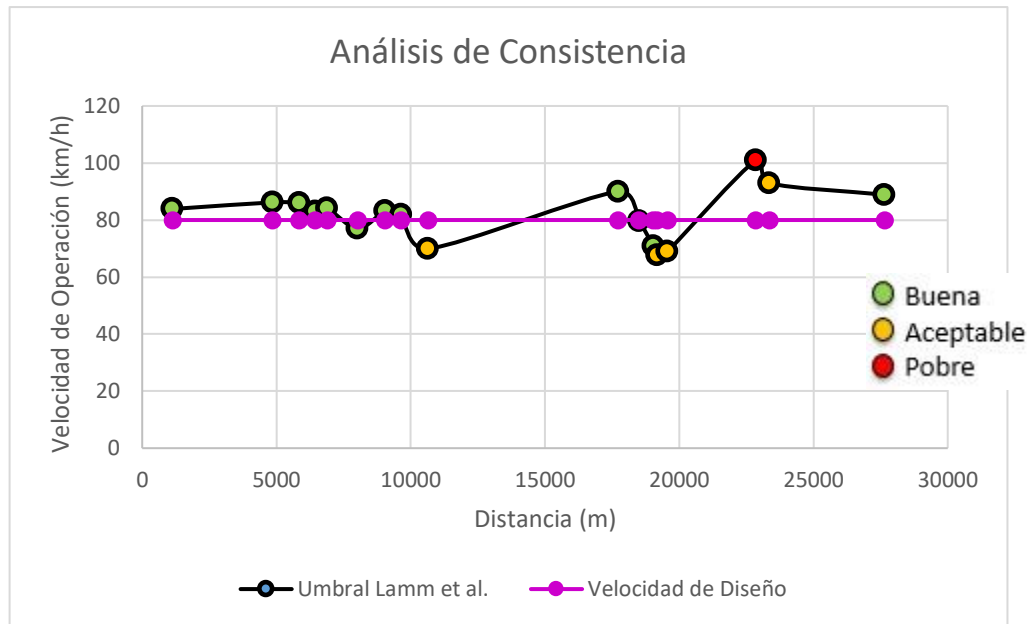
De la misma forma se puede observar que los puntos verdes se acercan más a la velocidad de diseño pues la diferencia de velocidades en esa curva es menor o igual a 10km/h, esto ya que los conductores se sienten con más confianza al conducir en curvas de entretangencias grandes y en los puntos amarillos su diferencia de velocidades es entre 10 y 20 km/h, en los rojos se representan las diferencias de velocidad mayores a 20, o sea más alejadas de la velocidad de diseño.

Figura 22 Análisis de consistencia según el criterio I Bucaramanga-Barrancabermeja



Fuente Elaboración propia.

Figura 23 Análisis de consistencia según el criterio I Barrancabermeja-Bucaramanga



Fuente Elaboración propia.

Criterio II:

Sentido Bucaramanga-Barrancabermeja

Conforme los resultados obtenidos en el análisis de consistencia utilizando el criterio II de Lamm et al se encontró que el 69% de las curvas poseen un nivel de consistencia bueno, el 31% poseen una consistencia aceptable y el 0% ósea ninguna curva posee un nivel de consistencia pobre.

Cabe mencionar que el criterio se aplicó en el sentido de la circulación vehicular.

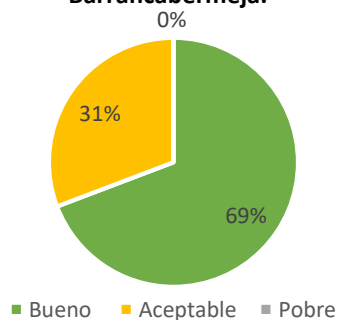
Tabla 36 Evaluación de consistencia de las curvas horizontales según criterio II - Bucaramanga-Barrancabermeja

Bucaramanga-Barrancabermeja		
Umbral de Lamm et al.	Número de Curvas	Porcentaje
Bueno	9	69%
Aceptable	4	31%
Pobre	0	0%

Fuente. Elaboración propia.

Figura 24 Evaluación en porcentaje sobre la consistencia de las curvas horizontales según criterio II sentido Bucaramanga-Barrancabermeja

Porcentaje consistencia de las curvas horizontales según criterio II sentido Bucaramanga-Barrancabermeja.



Fuente. Elaboración Propia

Realizando el análisis de la consistencia del tramo desde la variable “Longitud” se logra obtener la distancia en metros con consistencia Buena aceptable y pobre. A continuación, se presenta una tabla con la información del sentido Bucaramanga-Barrancabermeja acompañada de su correspondiente porcentaje respecto a la longitud total de las curvas.

Tabla 37 Análisis consistencia del tramo desde la variable “Longitud” con sentido Bucaramanga-Barrancabermeja criterio II

CRITERIO II					
Bucaramanga-Barrancabermeja					
Consistencia Buena		Consistencia Aceptable		Consistencia Pobre	
No. Curva	Longitud (m)	No. Curva	Longitud (m)	No. Curva	Longitud (m)
1	302,1	4	215,68	No Presenta	
2	190,82	7	157,28		
3	239,18	8	192,01		
5	176,81	11	265,59		
6	440,17	Total	830,56		
9	431,36	Porcentaje	23,79%		
10	277,25				
12	196,73				
13	195,79				
14	210,6				
Total	2660,81				
Porcentaje	76,21%				

Fuente. Elaboración propia.

Sentido Barrancabermeja- Bucaramanga

Aplicando el primer criterio de Lamm se obtiene que el 75% de las curvas poseen un nivel de consistencia bueno, el 13% poseen una consistencia aceptable y el 13% posee un nivel de consistencia pobre.

Cabe mencionar que el criterio se aplicó en el sentido de la circulación vehicular.

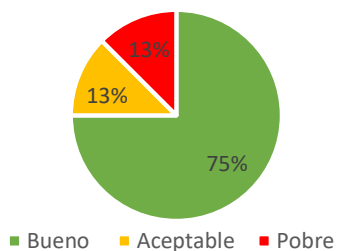
Tabla 38 Evaluación de consistencia de las curvas horizontales según criterio II
Barrancabermeja-Bucaramanga

Barrancabermeja-Bucaramanga		
Umbral de Lamm et al.	Número de Curvas	Porcentaje
Bueno	12	75%
Aceptable	2	13%
Pobre	2	13%

Fuente. Elaboración propia.

Figura 25 Evaluación en porcentaje sobre la consistencia de las curvas horizontales según criterio II sentido Barrancabermeja-Bucaramanga

Porcentaje consistencia de las curvas horizontales según criterio II sentido Barrancabermeja-Bucaramanga.



Fuente. Elaboración propia.

Realizando el análisis de la consistencia del tramo desde la variable “Longitud” se logra obtener la distancia en metros con consistencia Buena aceptable y pobre. A continuación, se presenta una tabla con la información del sentido acompañada de su correspondiente porcentaje respecto a la longitud total de las curvas.

Tabla 39 Análisis consistencia del tramo desde la variable “Longitud” con sentido Barrancabermeja-Bucaramanga criterio II

CRITERIO II					
Barrancabermeja-Bucaramanga					
Consistencia Buena		Consistencia Aceptable		Consistencia Pobre	
No. Curva	Longitud (m)	No. Curva	Longitud (m)	No. Curva	Longitud (m)
1	302,1	8	192,01	9	431,36
2	190,82	10	277,25	11C	219,04
3	239,18	Total	469,26	Total	650,4
4	215,68	Porcentaje	12,05%	Porcentaje	16,71%
5	176,81				
6	440,17				
7	157,28				
11	265,59				
11A	86,26				
11B	98,99				
12	196,73				
13	195,79				
14	210,6				
Total	2775,39				
Porcentaje	71,24%				

Fuente. Elaboración propia.

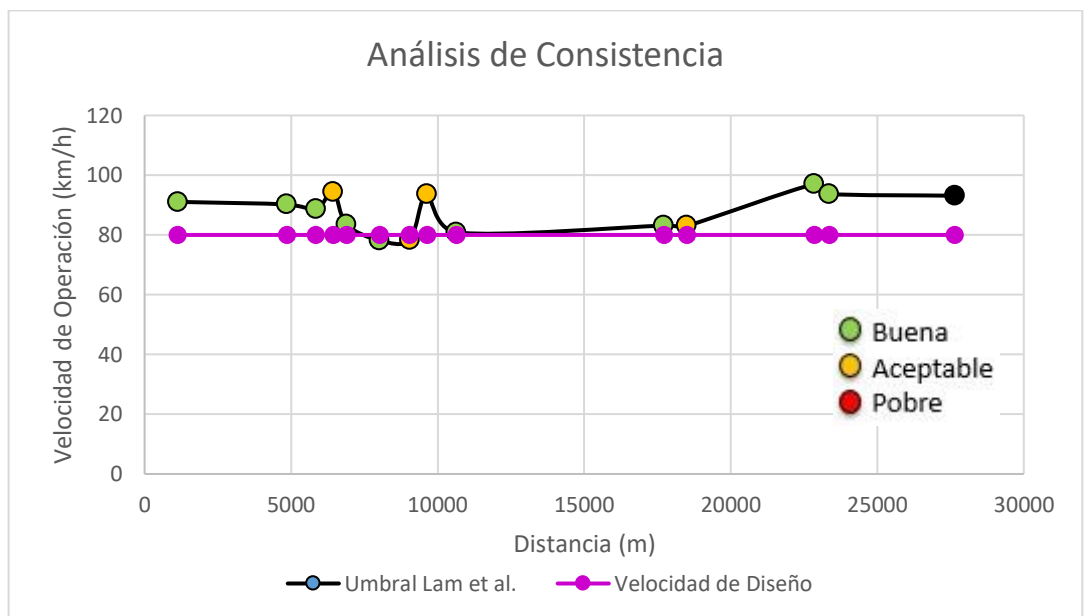
De manera general respecto al criterio II de Lamm se puede clasificar la vía con una consistencia buena aceptable pues más del 85% de las curvas pertenecen a esa clasificación (Buenas y aceptables para ambos sentidos).

Perfil de análisis de consistencia, Criterio II:

En las figuras 26 y 27 se muestra el comportamiento de la velocidad de diseño (Grafica en color morado) contra el comportamiento de la velocidad de operación (Grafica en color negro) que contiene su correspondiente umbral ya sea bueno (Círculos verdes), aceptable (Círculos amarillos) o pobre (Círculos rojos), esto en base al criterio II de Lamm et al.

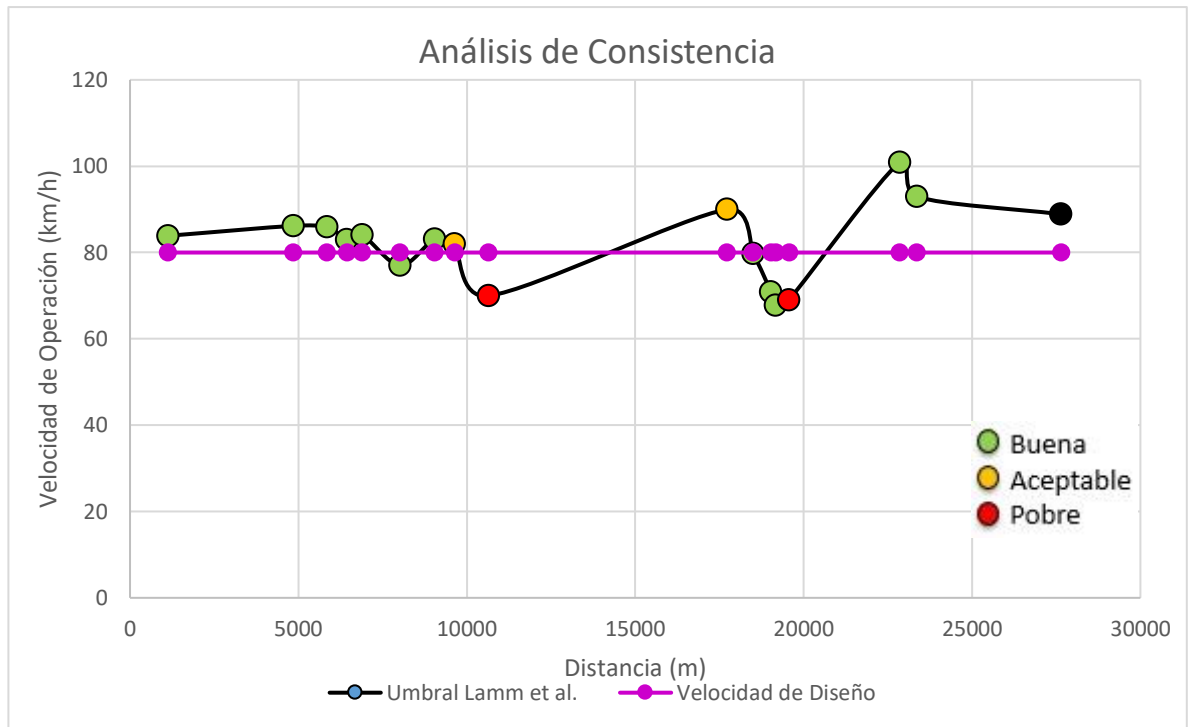
Es de destacar que el número de curvas con consistencia pobre en el sentido Bucaramanga- Barrancabermeja es 0%, esto nos indica que según este criterio la consistencia en este sentido es muy buena, respecto al sentido Barrancabermeja- Bucaramanga las curvas con consistencia buena y aceptable son de 87% dándole un excelente calificativo a la consistencia de ese sentido.

Figura 26 Análisis de consistencia según el criterio II Bucaramanga- Barrancabermeja



Fuente Elaboración propia.

Figura 27 Análisis de consistencia según el criterio II Barrancabermeja-Bucaramanga



Fuente Elaboración propia.

5.2.3 Comparación entre la velocidad de operación y la velocidad de operación de Lamm et al. de las curvas horizontales.

Sentido Bucaramanga-Barrancabermeja

Para llevar a cabo esta comparación tomamos la diferencia entre las velocidades de operación y las velocidades de operación por el método de Lamm et al. De los resultados en esta diferencia se puede observar que el promedio es de 5,97 km/h.

El promedio obtenido en la diferencia es aceptable y no representa una alerta de peligrosidad para los usuarios del tramo, pero cabe mencionar que al analizarse la diferencia por separado encontramos diferencias con un máximo de 12,36 km/h,

esto puede atribuirse a pequeñas inconsistencias del diseño con el trazado existente.

En la tabla 42 se presenta la diferencia mínima, máxima y promedio de la velocidad en las curvas horizontales obtenidas en el sentido Bucaramanga-Barrancabermeja.

Tabla 40 Diferencia de velocidades de las curvas horizontales en sentido Bucaramanga-Barrancabermeja

Bucaramanga-Barrancabermeja	
Diferencia V85-V85 Lamm 	Km/h
Mínimo	0,68903913
Máximo	12,3661444
Promedio	5,97855406

Fuente Elaboración Propia

Sentido Barrancabermeja-Bucaramanga

Para llevar a cabo esta comparación tomamos la diferencia entre las velocidades de operación y las velocidades de operación por el método de Lamm et al. De los resultados en esta diferencia se puede observar que el promedio es de 8,38 km/h.

El promedio obtenido en la diferencia es aceptable y no representa una alerta de peligrosidad para los usuarios del tramo, pero cabe mencionar que al analizarse la diferencia por separado encontramos diferencias con un máximo de 22,77 km/h, esto puede atribuirse a pequeñas inconsistencias del diseño con el trazado existente.

En la tabla 41 se presenta la diferencia mínima, máxima y promedio de la velocidad en las curvas horizontales obtenidas en el sentido Barrancabermeja-Bucaramanga.

Tabla 41 Diferencia de velocidades de las curvas horizontales en sentido
Barrancabermeja-Bucaramanga

Barrancabermeja-Bucaramanga	
Diferencia V85-V85 Lamm 	Km/h
Mínimo	0,43070348
Máximo	22,7703427
Promedio	8,38053018

Fuente. Elaboración propia

Análisis de consistencia

Este análisis se realizó para ambos sentidos en base a los criterios I y II de Lamm et al, junto a los respectivos umbrales.

Criterio I:

Sentido Bucaramanga-Barrancabermeja

Por medio del primer criterio de Lamm Se obtiene que el 93% de las curvas poseen un nivel de consistencia bueno, el 7% poseen una consistencia aceptable y ninguna curva posee un nivel de consistencia pobre.

Cabe mencionar que el criterio se aplicó en el sentido de la circulación vehicular.

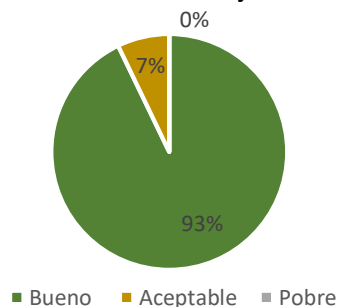
Tabla 42 Evaluación de consistencia de las curvas horizontales según criterio I -
Bucaramanga-Barrancabermeja

Bucaramanga-Barrancabermeja		
Umbral de Lamm et al.	Número de Curvas	Porcentaje
Bueno	13	93%
Aceptable	1	7%
Pobre	0	0%

Fuente. Elaboración propia.

Figura 28 Evaluación en porcentaje sobre la consistencia de las curvas horizontales según criterio I sentido Bucaramanga-Barrancabermeja

Porcentaje consistencia de las curvas horizontales según criterio I sentido Bucaramanga-Barrancabermeja.



Fuente. Elaboración Propia

Realizando el análisis de la consistencia del tramo desde la variable “Longitud” se logra obtener la distancia en metros con consistencia Buena aceptable y pobre. A continuación, se presenta una tabla con la información del sentido acompañada de su correspondiente porcentaje respecto a la longitud total de las curvas.

Tabla 43 Análisis consistencia del tramo desde la variable “Longitud” con sentido Bucaramanga-Barrancabermeja Criterio I

CRITERIO I					
Bucaramanga-Barrancabermeja					
Consistencia Buena		Consistencia Aceptable		Consistencia Pobre	
No. Curva	Longitud (m)	No. Curva	Longitud (m)	No. Curva	Longitud (m)
1	302,1	7	157,28	No Presenta	
2	190,82	Total	157,28		
3	239,18	Porcentaje	4,51%		
4	215,68				
5	176,81				
6	440,17				
8	192,01				
9	431,36				
10	277,25				
11	265,59				
12	196,73				
13	195,79				
14	210,6				
Total	3334,09				
Porcentaje	95,49%				

Fuente. Elaboración propia.

Sentido Barrancabermeja-Bucaramanga

Aplicando el primer criterio de Lamm se obtiene que el 70% de las curvas poseen un nivel de consistencia bueno, el 24% poseen una consistencia aceptable y el 6% posee un nivel de consistencia pobre.

Cabe mencionar que el criterio se aplicó en el sentido de la circulación vehicular.

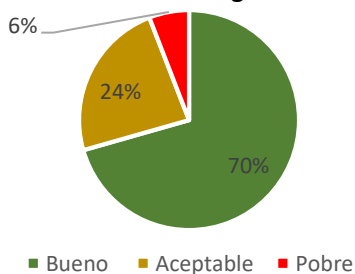
Tabla 44 Evaluación de consistencia de las curvas horizontales según criterio I
Barrancabermeja-Bucaramanga

Barrancabermeja-Bucaramanga		
Umbral de Lamm et al.	Número de Curvas	Porcentaje
Bueno	12	70%
Aceptable	4	24%
Pobre	1	6%

Fuente. Elaboración propia.

Figura 29 Evaluación en porcentaje sobre la consistencia de las curvas horizontales según criterio I sentido Barrancabermeja-Bucaramanga

Porcentaje consistencia de las curvas horizontales según criterio I sentido Barrancabermeja-Bucaramanga.



Realizando el análisis de la consistencia del tramo desde la variable “Longitud” se logra obtener la distancia en metros con consistencia Buena aceptable y pobre. A continuación, se presenta una tabla con la información del sentido acompañada de su correspondiente porcentaje respecto a la longitud total de las curvas.

Tabla 45 Análisis consistencia del tramo desde la variable “Longitud” con sentido Barrancabermeja-Bucaramanga criterio I

CRITERIO I					
Barrancabermeja-Bucaramanga					
Consistencia Buena		Consistencia Aceptable		Consistencia Pobre	
No. Curva	Longitud (m)	No. Curva	Longitud (m)	No. Curva	Longitud (m)
1	302,1	9	431,36	11B	98,38
2	190,82	11A	86,26	Total	98,38
3	239,18	11C	219,04	Porcentaje	2,53%
4	215,68	12	196,73		
5	176,81	Total	933,39		
6	440,17	Porcentaje	23,96%		
7	157,28				
8	192,01				
10	277,25				
11	265,59				
13	195,79				
14	210,6				
Total	2863,28				
Porcentaje	73,51%				

Fuente Elaboración Propia

De forma general respecto al criterio I de Lamm se presenta un considerable número de curvas con consistencia buena en ambos sentidos lo cual nos lleva a determinar que bajo estos parámetros de evaluación la consistencia del tramo en ambos sentidos es en un 80% buena.

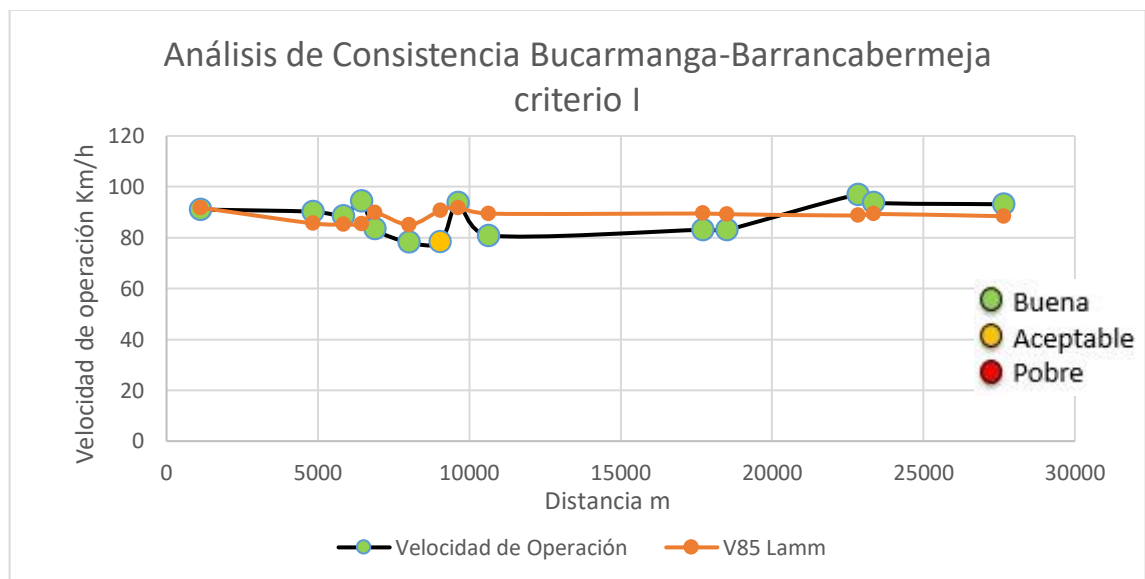
Perfil de análisis de consistencia, Criterio I:

Las figuras 30 y 31 muestran el comportamiento de la velocidad de operación de Lamm (Grafica color naranja) contra el comportamiento de la velocidad de operación tomada en el presente estudio (Grafica color negro) que contiene su correspondiente umbral ya sea bueno (Círculos verdes), aceptable (Círculos amarillos) o pobre (círculos rojos), esto en base al criterio I de Lamm et al.

Se puede observar que en el sentido Bucaramanga-Barrancabermeja tenemos un gran número de curvas con criterio bueno de lo cual podemos determinar que las velocidades de operación se ajustan a las velocidades de operación de Lamm.

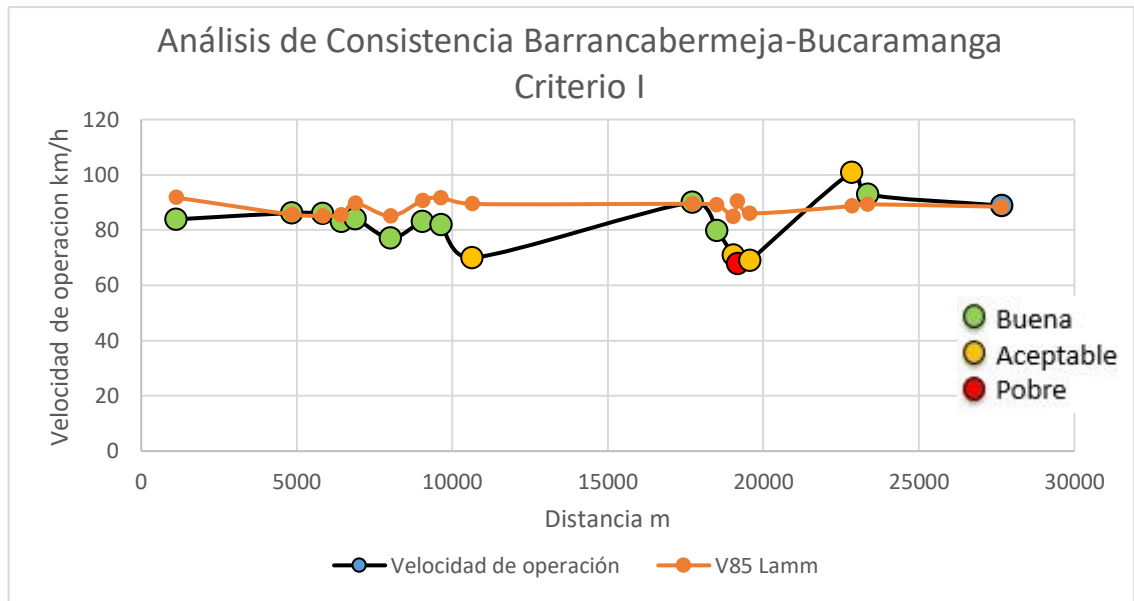
Respecto al sentido Barrancabermeja-Bucaramanga se observa que las curvas con criterio bueno persisten, pero en menos cantidad, esto se puede dar por entretangencias más cortas en el sentido de circulación o imperfecciones en el carril los cuales ocasionan que el conductor disminuya la velocidad.

Figura 30 Análisis de consistencia según el criterio I Bucaramanga-Barrancabermeja



Fuente Elaboración propia.

Figura 31 Análisis de consistencia según el criterio I Barrancabermeja-Bucaramanga



Fuente Elaboración propia.

Criterio II:

Sentido Bucaramanga-Barrancabermeja

Conforme los resultados obtenidos en el análisis de consistencia utilizando el criterio II de Lamm et al encontramos que el 100% de las curvas poseen un nivel de consistencia bueno, dejando 0% para la consistencia pobre o aceptable.

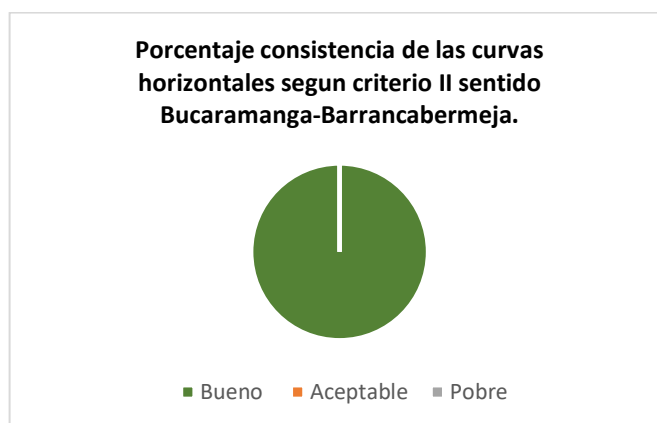
Cabe mencionar que el criterio se aplicó en el sentido de la circulación vehicular.

Tabla 46 Evaluación de consistencia de las curvas horizontales según criterio II - Bucaramanga-Barrancabermeja

Bucaramanga-Barrancabermeja		
Umbral de Lamm et al.	Número de Curvas	Porcentaje
Bueno	13	100%
Aceptable	0	0%
Pobre	0	0%

Fuente. Elaboración propia.

Figura 32 Evaluación en porcentaje sobre la consistencia de las curvas horizontales según criterio II sentido Bucaramanga-Barrancabermeja.



Fuente. Elaboración propia.

Realizando el análisis de la consistencia del tramo desde la variable “Longitud” se logra obtener la distancia en metros con consistencia Buena aceptable y pobre. A continuación, se presenta una tabla con la información del sentido acompañada de su correspondiente porcentaje respecto a la longitud total de las curvas.

Tabla 47 Análisis consistencia del tramo desde la variable “Longitud” con sentido Bucaramanga-Barrancabermeja criterio II

CRITERIO II					
Bucaramanga-Barrancabermeja					
Consistencia Buena		Consistencia Aceptable		Consistencia Pobre	
No. Curva	Longitud (m)	No. Curva	Longitud (m)	No. Curva	Longitud (m)
1	302,1	No Presenta		No Presenta	
2	190,82				
3	239,18				
4	215,68				
5	176,81				
6	440,17				
7	157,28				
8	192,01				
9	431,36				
10	277,25				
11	265,59				
12	196,73				
13	195,79				
14	210,6				
Total	3491,37				
Porcentaje	100%				

Fuente Elaboración propia.

Sentido Barrancabermeja- Bucaramanga

Aplicando el segundo criterio de Lamm se obtiene que el 100% de las curvas poseen un nivel de consistencia bueno dejando 0% para la consistencia pobre o aceptable.

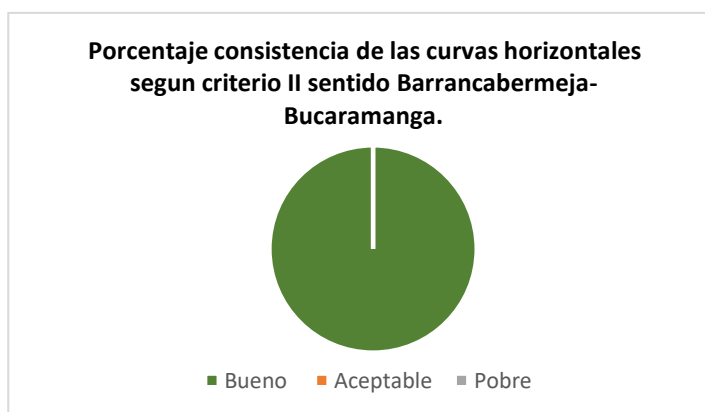
Cabe mencionar que el criterio se aplicó en el sentido de la circulación vehicular.

Tabla 48 Evaluación de consistencia de las curvas horizontales según criterio II
Barrancabermeja-Bucaramanga

Barrancabermeja-Bucaramanga		
Umbral de Lamm et al.	Número de Curvas	Porcentaje
Bueno	16	1
Aceptable	0	0
Pobre	0	0

Fuente. Elaboración propia.

Figura 33 Evaluación en porcentaje sobre la consistencia de las curvas horizontales según criterio II sentido Barrancabermeja-Bucaramanga



Fuente. Elaboración propia.

Realizando el análisis de la consistencia del tramo desde la variable “Longitud” se logra obtener la distancia en metros con consistencia Buena aceptable y pobre. A continuación, se presenta una tabla con la información del sentido acompañada de su correspondiente porcentaje respecto a la longitud total de las curvas.

Tabla 49 Análisis consistencia del tramo desde la variable “Longitud” con sentido Barrancabermeja-Bucaramanga criterio II

CRITERIO II					
Barrancabermeja-Bucaramanga					
Consistencia Buena		Consistencia Aceptable		Consistencia Pobre	
No. Curva	Longitud (m)	No. Curva	Longitud (m)	No. Curva	Longitud (m)
1	302,1	No Presenta		No Presenta	
2	190,82				
3	239,18				
4	215,68				
5	176,81				
6	440,17				
7	157,28				
8	192,01				
9	431,36				
10	277,25				
11	265,59				
11A	86,26				
11B	98,38				
11C	219,04				
12	196,73				
13	195,79				
14	210,6				
Total	3895,05				
Porcentaje	100%				

Fuente. Elaboración propia.

Respecto al criterio II de Lamm se puede clasificar la vía con una consistencia buena en toda su longitud y sentidos pues en base al análisis realizado en este criterio, la totalidad de las curvas clasifican en el umbral Bueno.

Perfil de análisis de consistencia, Criterio II:

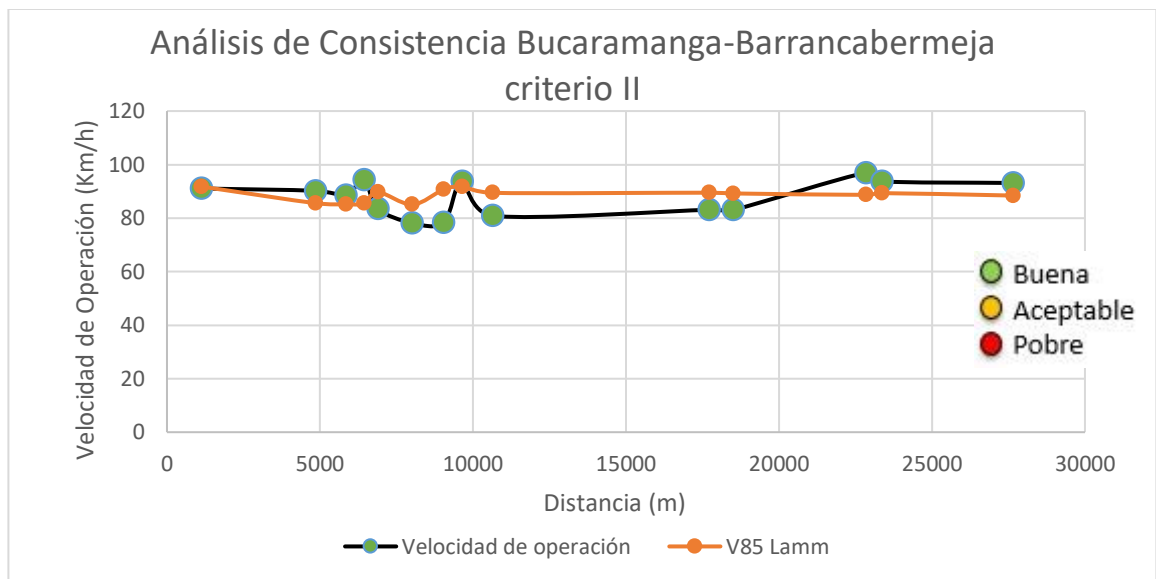
Las figuras 34 y 35 muestran el comportamiento de la velocidad de operación de Lamm (Grafica color naranja) contra el comportamiento de la velocidad de operación tomada en el presente estudio (Grafica color negro) que contiene su

correspondiente umbral ya sea bueno (Círculos verdes), aceptable (Círculos amarillos) o pobre (círculos rojos), esto en base al criterio II de Lamm et al.

Es de destacar que el número de curvas con consistencia pobre en ambos sentidos es 0%, esto nos indica que según este criterio la consistencia en este sentido es excelente.

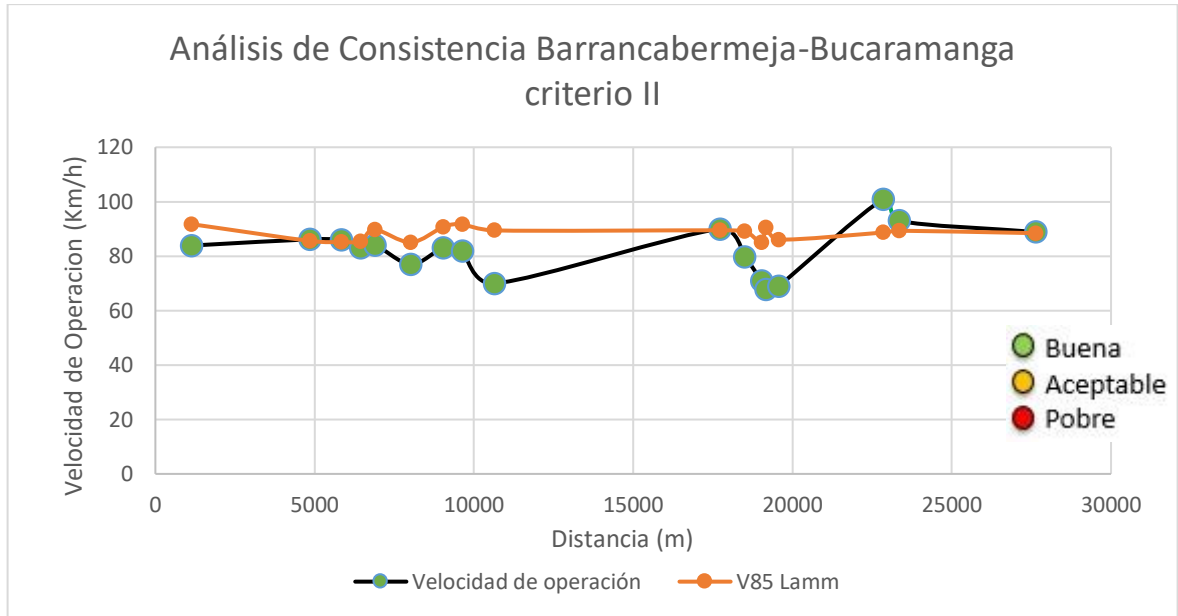
Podemos notar la cercanía que presenta una gráfica de la otra, lo cual nos indica que las velocidades son muy similares, con lo que entonces las velocidades de operación varían en un rango sobresaliente para el criterio de Lamm et al.

Figura 34 Análisis de consistencia según el criterio II Bucaramanga-Barrancabermeja



Fuente Elaboración Propia

Figura 35 Análisis de consistencia según el criterio II Barrancabermeja-Bucaramanga



Fuente Elaboración propia.

5.3 Análisis de perfiles de velocidad continuos

Las figuras 36 y 37 representan de manera individual los perfiles de velocidad de seis conductores diferentes de los cuales 3 realizaron el recorrido Bucaramanga-Barrancabermeja y otros 3 realizaron el recorrido Barrancabermeja Bucaramanga.

Cabe resaltar que el tramo es de 30 km en topografía plana-ondulada con pocas curvas, lo cual genera entretangencias altas en algunos tramos, esto le permite al conductor tomar si así lo desea altas velocidades sin incrementar en gran medida la probabilidad de accidente.

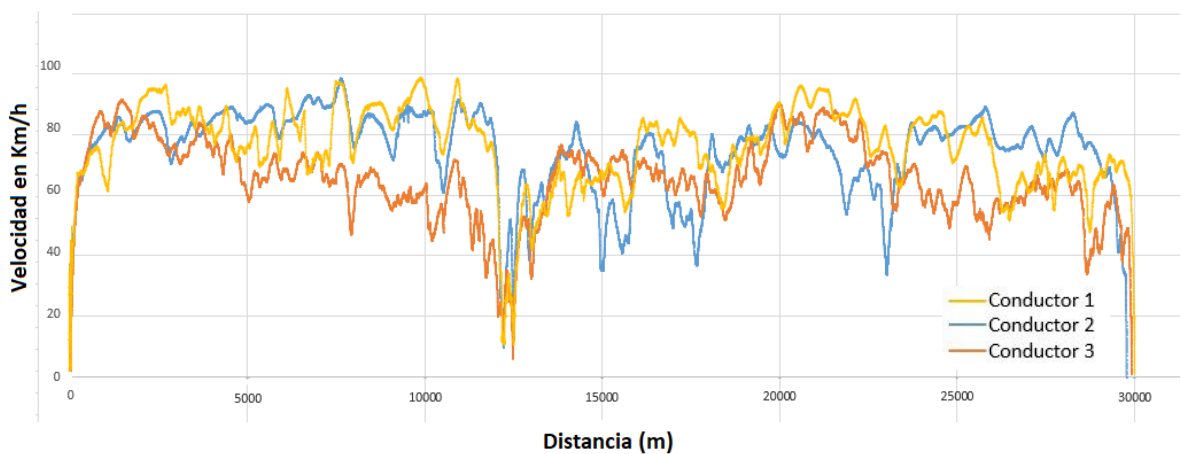
En el perfil de velocidad con sentido Bucaramanga-Barrancabermeja se observan valles de velocidad en los Pr 10+481, Pr 17+500 y Pr 23+002 ya que en estos puntos se presentan pendientes considerables las cuales restan potencia al vehículo que

realiza el recorrido, en el Pr 12 + 198 se encontraba un reductor de velocidad el cual forzaba a los conductores a disminuir la velocidad pues en el sector había presencia de algunas casas, los picos de velocidad se presentan en las rectas y bajadas del recorrido, se observan pequeñas variantes entre las velocidades de los primeros cinco kilómetros esto puede darse por el flujo libre al que cada conductor realizaba el recorrido.

En el perfil de velocidad con sentido Barrancabermeja-Bucaramanga se observa que los primeros cinco kilómetros la tendencia en la formación de pequeños picos y valles es muy similares en los 3 conductores, se observan también valles que corresponden a subidas que disminuyen la velocidad del vehículo, es de notar también que en el Pr 12+ 198 persiste el valle pues el reductor de velocidad obliga al conductor a disminuir la velocidad del vehículo, en el área central del perfil de velocidad se puede ver una gran coincidencia en las velocidades esto es así ya que el terreno es plano y parejo sin cambios bruscos en su topografía.

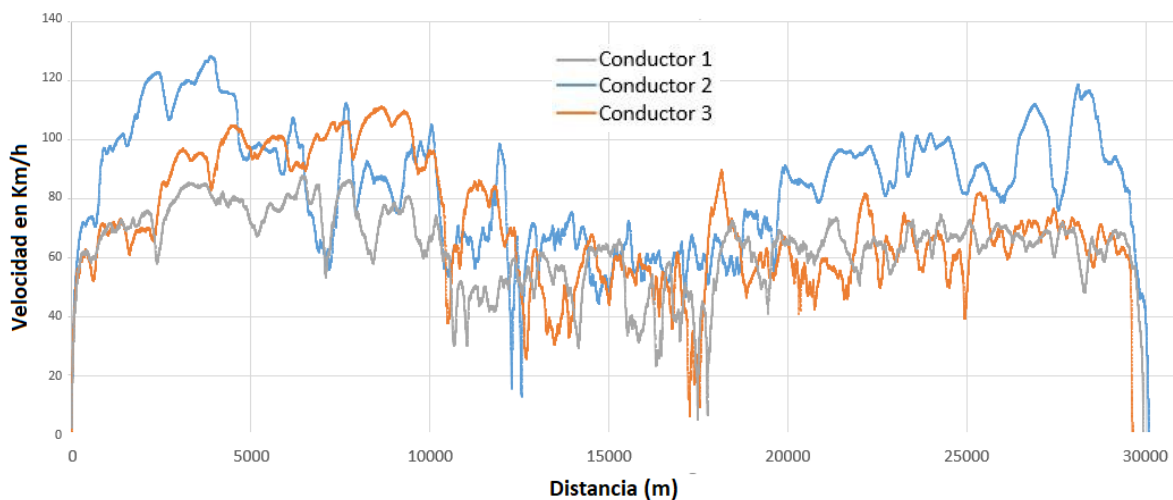
Algunos otros factores que influyeron en la variación de los perfiles de velocidad son los vehículos de carga que transitan en la vía y el estado de esta en diferentes puntos del tramo.

Figura 36 Perfiles de velocidad individual continuos Bucaramanga-Barrancabermeja



Fuente. Elaboración propia.

Figura 37 Perfiles de velocidad individual continuos Barrancabermeja-Bucaramanga



Fuente. Elaboración propia.

5.4 Relación curvas consistencia pobre con datos reales de accidentalidad

Se usan las abscisas donde se presentan puntos de consistencia buena, aceptable o pobre obtenidos a partir del criterio I y criterio II de Lamm et al. y se relacionan con las abscisas que contienen datos de accidentalidad reales obtenidos por la Dirección de Tránsito y Transporte de la seccional Santander y seccional Magdalena Medio. [45] [46]

Los datos presentados a continuación están para el año 2017 y 2018 tabulados con su respectivo sentido y criterio.

Cabe mencionar que este análisis se realizó usando los datos de la comparación de velocidad de operación (V85) con velocidad específica con ítems **4.3 y 5.3.2.**

- Año 2017

Criterio I

Consistencia Buena

Tabla 50 Consistencia buena del criterio I relacionada con abscisas de accidente real en sentido Bucaramanga-Barrancabermeja año 2017

Sentido Bucaramanga-Barrancabermeja					
Consistencia Buena Criterio I				Informe de accidentalidad 2017	
Curva	Abscisa Curva			Abscisas Accidente cercanas a Abscisas curva	Víctimas
	PC	PI	PT		
6	7797.75	8017.84	8237.92	Km 7+903	1

Fuente Tomado y adaptado de [44] [45]

Tabla 51 Consistencia buena del criterio I relacionada con abscisas de accidente real en sentido Barrancabermeja-Bucaramanga año 2017

Sentido Barrancabermeja-Bucaramanga					
Consistencia Buena Criterio I				Informe de accidentalidad 2017	
Curva	Abscisa Curva			Abscisas Accidente cercanas a Abscisas curva	Víctimas
	PC	PI	PT		
1	980.14	1131.19	1282.24	Km 1+238	1
6	7797.75	8017.84	8237.92	Km 7+903	1

Fuente Tomado y adaptado de [44] [45]

Consistencia Aceptable

Tabla 52 Consistencia aceptable del criterio I relacionada con abscisas de accidente real en sentido Bucaramanga-Barrancabermeja año 2017

Sentido Bucaramanga-Barrancabermeja					
Consistencia Aceptable Criterio I				Informe de accidentalidad 2017	
Curva	Abscisa Curva			Abscisas Accidente cercanas a Abscisas curva	Víctimas
	PC	PI	PT		
1	980.14	1131.19	1282.24	Km 1+238	1

Fuente Tomado y adaptado de [44] [45]

En el sentido Barrancabermeja-Bucaramanga no presenta ninguna relación de consistencia aceptable con abscisas de accidente real en el año 2017

Consistencia Pobre

En el año 2017 no presenta una relación las abscisas de consistencia pobre con las abscisas de accidentes reales.

Criterio II

Consistencia Buena

Tabla 53 Consistencia buena del criterio II relacionada con abscisas de accidente real en sentido Bucaramanga-Barrancabermeja año 2017

Sentido Bucaramanga-Barrancabermeja					
Consistencia Buena Criterio II				Informe de accidentalidad 2017	
Curva	Abscisa Curva			Abscisas Accidente cercanas a Abscisas curva	Víctimas
	PC	PI	PT		
1	980.14	1131.19	1282.24	Km 1+238	1
6	7797.75	8017.84	8237.92	Km 7+903	1

Fuente Tomado y adaptado de [44] [45]

Tabla 54 Consistencia buena del criterio II relacionada con abscisas de accidente real en sentido Barrancabermeja-Bucaramanga año 2017

Sentido Barrancabermeja-Bucaramanga					
Consistencia Buena Criterio II				Informe de accidentalidad 2017	
Curva	Abscisa Curva			Abscisas Accidente cercanas a Abscisas curva	Víctimas
	PC	PI	PT		
1	980.14	1131.19	1282.24	Km 1+238	1
6	7797.75	8017.84	8237.92	Km 7+903	1

Fuente Tomado y adaptado de [44] [45]

Consistencia Aceptable

Para consistencia aceptable en el criterio II no hay relación o coincidencia con los accidentes reales para el año 2017 en ambos sentidos.

Consistencia Pobre

Para consistencia pobre en el criterio II no hay relación o coincidencia con los accidentes reales para el año 2017 en ambos sentidos.

- **Año 2018**

Criterio I

Consistencia Buena

Tabla 55 Consistencia buena del criterio I relacionada con abscisas de accidente real en sentido Bucaramanga-Barrancabermeja año 2018

Sentido Bucaramanga-Barrancabermeja					
Consistencia Buena Criterio I				Informe de accidentalidad 2018	
Curva	Abscisa Curva			Abscisas Accidente cercanas a Abscisas curva	Víctimas
	PC	PI	PT		
5	6799.61	6888.02	6976.42	Km 6+758	1
9	10428.22	10643.9	10859.58	Km 10+538	1

Fuente Tomado y adaptado de [44] [45]

Tabla 56 Consistencia buena del criterio I relacionada con abscisas de accidente real en sentido Barrancabermeja-Bucaramanga año 2018

Sentido Barrancabermeja-Bucaramanga					
Consistencia Buena Criterio I				Informe de accidentalidad 2018	
Curva	Abscisa Curva			Abscisas Accidente cercanas a Abscisas curva	Víctimas
	PC	PI	PT		
1	980.14	1131.19	1282.24	Km 0+908	1
2	4755.49	4850.9	4946.31	Km 4+673	1
				Km 4+988	1
4	6330.76	6438.6	6546.44	Km 6+338	1
5	6799.61	6888.02	6976.42	Km 6+758	1
8	9545	9641.01	9737.01	Km 9+718	1

Fuente Tomado y adaptado de [44] [45]

Consistencia Aceptable

Tabla 57 Consistencia aceptable del criterio I relacionada con abscisas de accidente real en sentido Bucaramanga-Barrancabermeja año 2018

Sentido Bucaramanga-Barrancabermeja					
Consistencia Aceptable Criterio I				Informe de accidentalidad 2018	
Curva	Abscisa Curva			Abscisas Accidente cercanas a Abscisas curva	Víctimas
	PC	PI	PT		
1	980.14	1131.19	1282.24	Km 0+908	1
2	4755.49	4850.9	4946.31	Km 4+673	1
				Km 4+988	1
4	6330.76	6438.6	6546.44	Km 6+338	1
8	9545	9641.01	9737.01	Km 9+718	1
12	22753.88	22852.25	22950.61	Km 22+758	1

Fuente Tomado y adaptado de [44] [45]

Tabla 58 Consistencia aceptable del criterio I relacionada con abscisas de accidente real en sentido Barrancabermeja-Bucaramanga año 2018

Sentido Barrancabermeja-Bucaramanga					
Consistencia Aceptable Criterio I				Informe de accidentalidad 2018	
Curva	Abscisa Curva			Abscisas Accidente cercanas a Abscisas curva	Víctimas
	PC	PI	PT		
9	10428.22	10643.9	10859.58	Km 10+538	1

Fuente Tomado y adaptado de [44] [45]

Consistencia Pobre

Tabla 59 Consistencia pobre del criterio I relacionada con abscisas de accidente real en sentido Barrancabermeja-Bucaramanga año 2018

Sentido Barrancabermeja-Bucaramanga					
Cosistencia Pobre Criterio I				Informe de accidentalidad 2018	
Curva	Abscisa Curva			Abscisas Accidente cercanas a Abscisas curva	Víctimas
	PC	PI	PT		
12	22753.88	22852.25	22950.61	Km 22+758	1

Fuente Tomado y adaptado de [44] [45]

En el sentido Bucaramanga-Barrancabermeja no presenta ninguna relación de consistencia pobre para el criterio I con abscisas de accidente real en el año 2018.

Criterio II

Consistencia Buena

Tabla 60 Consistencia buena del criterio II relacionada con abscisas de accidente real en sentido Bucaramanga-Barrancabermeja año 2018

Sentido Bucaramanga-Barrancabermeja					
Consistencia Buena Criterio II				Informe de accidentalidad 2018	
Curva	Abscisa Curva			Abscisas Accidente cercanas a Abscisas curva	Víctimas
	PC	PI	PT		
1	980.14	1131.19	1282.24	Km 0+908	1
2	4755.49	4850.9	4946.31	Km 4+673	1
				Km 4+988	1
5	6799.61	6888.02	6976.42	Km 6+758	1
9	10428.22	10643.9	10859.58	Km 10+538	1
12	22753.88	22852.25	22950.61	Km 22+758	1

Sentido Bucaramanga-Barrancabermeja					
Cosistencia Buena Criterio II				Informe de accidentalidad 2018	
Curva	Abscisa Curva			Abscisas Accidente cercanas a Abscisas curva	Víctimas
	PC	PI	PT		
1	980.14	1131.19	1282.24	Km 0+908	1
2	4755.49	4850.9	4946.31	Km 4+673	1
				Km 4+988	1
3	5726.63	5846.22	5965.81	No presenta	
5	6799.61	6888.02	6976.42	Km 6+758	1
6	7797.75	8017.84	8237.92	No presenta	
9	10428.22	10643.9	10859.58	Km 10+538	1
10	17581.77	17720.39	17859.02	No presenta	
12	22753.88	22852.25	22950.61	Km 22+758	1

Fuente Tomado y adaptado de [44] [45]

Tabla 61 Consistencia buena del criterio II relacionada con abscisas de accidente real en sentido Barrancabermeja-Bucaramanga año 2018

Sentido Barrancabermeja-Bucaramanga					
Consistencia Buena Criterio II				Informe de accidentalidad 2018	
Curva	Abscisa Curva			Abscisas Accidente cercanas a Abscisas curva	Víctimas
	PC	PI	PT		
1	980.14	1131.19	1282.24	Km 0+908	1
2	4755.49	4850.9	4946.31	Km 4+673	1
				Km 4+988	1
4	6330.76	6438.6	6546.44	Km 6+338	1
5	6799.61	6888.02	6976.42	Km 6+758	1
12	22753.88	22852.25	22950.61	Km 22+758	1

Sentido Barrancabermeja-Bucaramanga					
Cosistencia Buena Criterio II				Informe de accidentalidad 2018	
Curva	Abscisa Curva			Abscisas Accidente cercanas a Abscisas curva	Víctimas
	PC	PI	PT		
1	980.14	1131.19	1282.24	Km 0+908	1
2	4755.49	4850.9	4946.31	Km 4+673	1
				Km 4+988	1
3	5726.63	5846.22	5965.81	No presenta	
4	6330.76	6438.6	6546.44	Km 6+338	1
5	6799.61	6888.02	6976.42	Km 6+758	1
6	7797.75	8017.84	8237.92	No presenta	
7	8968.21	9046.85	9125.49	No presenta	
11	18370.5	18503.3	18636.09	No presenta	

11A	18988.77	19031.9	19075.03	No presenta	
11B	19120.29	19169.79	19219.28	No presenta	
12	22753.88	22852.25	22950.61	Km 22+758	1

Fuente Tomado y adaptado de [44] [45]

Consistencia Aceptable

Tabla 62 Consistencia aceptable del criterio II relacionada con abscisas de accidente real en sentido Bucaramanga-Barrancabermeja año 2018

Sentido Bucaramanga-Barrancabermeja					
Consistencia Aceptable Criterio II				Informe de accidentalidad 2018	
Curva	Abscisa Curva			Abscisas Accidente cercanas a Abscisas curva	Víctimas
	PC	PI	PT		
4	6330.76	6438.6	6546.44	Km 6+338	1
8	9545	9641.01	9737.01	Km 9+718	1

Sentido Bucaramanga-Barrancabermeja					
Cosistencia Aceptable Criterio II				Informe de accidentalidad 2018	
Curva	Abscisa Curva			Abscisas Accidente cercanas a Abscisas curva	Víctimas
	PC	PI	PT		
4	6330.76	6438.6	6546.44	Km 6+338	1
7	8968.21	9046.85	9125.49	No presenta	
8	9545	9641.01	9737.01	Km 9+718	1

Fuente Tomado y adaptado de [44] [45]

Tabla 63 Consistencia aceptable del criterio II relacionada con abscisas de accidente real en sentido Barrancabermeja-Bucaramanga año 2018

Sentido Barrancabermeja-Bucaramanga					
Consistencia Aceptable Criterio II				Informe de accidentalidad 2018	
Curva	Abscisa Curva			Abscisas Accidente cercanas a Abscisas curva	Víctimas
	PC	PI	PT		
8	9545	9641.01	9737.01	Km 9+718	1

Sentido Barrancabermeja-Bucaramanga					
Consistencia Aceptable Criterio II				Informe de accidentalidad 2018	
Curva	Abscisa Curva			Abscisas Accidente cercanas a Abscisas curva	Víctimas
	PC	PI	PT		
8	9545	9641.01	9737.01	Km 9+718	1

Fuente Tomado y adaptado de [44] [45]

Consistencia Pobre

Tabla 64 Consistencia pobre del criterio II relacionada con abscisas de accidente real en sentido Barrancabermeja-Bucaramanga año 2018

Sentido Barrancabermeja-Bucaramanga					
Consistencia Pobre Criterio II				Informe de accidentalidad 2018	
Curva	Abscisa Curva			Abscisas Accidente cercanas a Abscisas curva	Víctimas
	PC	PI	PT		
9	10428.22	10643.9	10859.58	Km 10+538	1

Sentido Barrancabermeja-Bucaramanga					
Cosistencia Pobre Criterio II				Informe de accidentalidad 2018	
Curva	Abscisa Curva			Abscisas Accidente cercanas a Abscisas curva	Víctimas
	PC	PI	PT		
9	10428.22	10643.9	10859.58	Km 10+538	1

Fuente Tomado y adaptado de [44] [45]

En el sentido Bucaramanga-Barrancabermeja no presenta ninguna relación de consistencia pobre para el criterio II con abscisas de accidente real en el año 2018.

6. CONCLUSIONES

En esta investigación comparamos la velocidad de operación (V85) obtenida a partir del procesamiento de velocidades individuales de las curvas vs dos velocidades, la velocidad de diseño en la norma colombiana y la velocidad de operación por el método de Lamm et al. en un tramo vial de 30 km aproximadamente en Santander el cual comunica a Bucaramanga con Barrancabermeja, esto con el fin de localizar posibles puntos negros de accidentalidad, para esto fue necesario realizar una visita de campo con la colaboración de personas seleccionadas al azar en posesión de vehículos livianos en los cuales se instaló un equipo GPS el cual recolecta perfiles de velocidad a lo largo del recorrido del tramo a flujo libre.

Fue necesario el diseño en planta del tramo en AutoCAD Civil 3D, usando como referencia el eje vial proporcionado por el GPS Vbox lite, de esta manera entonces se obtienen los parámetros geométricos necesarios para llevar a cabo la investigación.

Para la toma de datos se hizo uso del equipo Vbox lite, un dispositivo de alta tecnología capaz de generar datos con alta precisión, básicamente está conformado por un GPS que permite la recolección de datos continuos de velocidad en los

cuales se generan perfiles (Graficas de velocidad vs distancia), los cual facilitan el análisis de datos al momento de realizar un seguimiento a la velocidad del vehículo en determinada distancia, por ejemplo para esta investigación la velocidad del vehículo en el punto medio de la curva.

Conforme el análisis acerca de la desviación estándar se concluye que el sentido Bucaramanga-Barrancabermeja refleja una mayor dispersión de datos con respecto a la media aritmética en comparación al sentido Barrancabermeja Bucaramanga, esto probablemente es generado por las pendientes positivas en este sentido, ya que los conductores tienden a acelerar al momento de circular por estas, en cambio por el sentido contrario los vehículos se encuentran con pendientes negativas en terrenos con amplia visibilidad y entretangencias grandes, dándoles la sensación de seguridad al momento de conducir, con lo cual aumentan la velocidad.

Al comparar la velocidad de operación con la velocidad de diseño de las curvas horizontales del tramo, se encontró un promedio de diferencia que oscila entre 11 y 16 km/h correspondientes al sentido Bucaramanga-Barrancabermeja y Barrancabermeja-Bucaramanga respectivamente, diferencia que en cualquiera de los dos sentidos no está contemplada en los parámetros del manual de diseño geométrico, pues éste manifiesta un límite máximo de 10 km/h.

Realizando la comparación de la velocidad de operación con la velocidad de diseño de las curvas horizontales del tramo y con el fin de analizar la consistencia en el tramo vial de posibles puntos de accidentalidad, se aplicaron los criterios I y II de Lamm et al. Respecto a los resultados arrojados por el criterio I se tiene que el tramo presenta una consistencia bueno-aceptable pues más del 90% de las curvas se encuentran en estas 2 categorías para ambos sentidos. En cuanto al criterio II de Lamm et al. el tramo se puede clasificar como bueno-aceptable ya que más del 85% de las curvas pertenecen a esa clasificación para ambos sentidos.

Al comparar la velocidad de operación tomada y calculada en campo con la velocidad de operación por el método de Lamm et al. se encuentra que en el criterio

I la consistencia del tramo en ambos sentidos es un 80% buena. Para el criterio II se puede clasificar la vía con una consistencia buena en toda su longitud y sentidos, ya que el 100% de sus curvas clasifican en el umbral bueno. Se puede decir de forma general que el método de Lamm et al. se acerca más a las velocidades que llevan los conductores en el punto medio de las curvas.

Con respecto a la accidentalidad encontramos que algunas curvas con consistencia buena presentan coincidencias con accidentes registrados en las bases de datos de accidentalidad realizadas por los organismos de tránsito competentes, esto quiere decir que se deben analizar a fondo otros factores además de la consistencia para determinar la causa del accidente en estas curvas, las cuales se identifican como curva N°1 y N°2. En cuanto a las curvas con consistencia aceptable se encuentran coincidencias de accidentes en las curvas N°1 y N°8, y como consistencia pobre se determinaron posibles puntos críticos en las curvas N°9 y N°12. Para determinar que las curvas mencionadas coincidían con el informe de accidentalidad, se realizó una clasificación de acuerdo a los criterios I y II, el año del accidente y el sentido del mismo.

Finalmente se puede concluir que el tramo vial presenta una consistencia de diseño geométrico bueno, pues les permite a los conductores manejar con comodidad y visibilidad sin manifestar imprevistos en la vía que cambien drásticamente su velocidad, evidenciando pocos puntos de accidentalidad a lo largo de 30 km.

7. RECOMENDACIONES

Se recomienda para futuros estudios tomar muestras de datos más amplias a fin de afinar los patrones de comportamiento en el manejo de los conductores ya que en muestras pequeñas puede ser más difícil identificar una tendencia.

Se recomienda analizar la información de este estudio con los parámetros de diseño originales de la vía ya que los que se usaron en este proyecto, son producto de un diseño realizado a partir de un eje vial proporcionado por un dispositivo GPS y adaptado en AutoCAD Civil 3D.

Al momento de realizar la toma de datos se recomienda llevar un registro de la vía sobre: pendientes y obstáculos tales como reductores de velocidad, intersecciones, averías de la malla vial y resaltos, esto con el fin de facilitar la interpretación de picos y valles en los perfiles de velocidad, así como también ayuda a una interpretación y análisis eficiente de los datos recolectados y procesados.

Usar el equipo Vbox lite para estudios de distancias de visibilidad, aceleración y desaceleración en el tramo vial de esta investigación, estos serían un gran aporte para tener en cuenta al mejoramiento de la vía en sus diferentes aspectos de diseño.

Para futuras investigaciones se recomienda analizar el tramo vial con modelos de consistencia de países que presenten características topográficas similares al área de proyecto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E. TIEMPO, «EL TIEMPO,» 13 12 2017. [En línea]. Available: <http://www.eltiempo.com/justicia/servicios/cifras-de-accidentes-de-transito-en-colombia-2017-161390>.
- [2] L. L. B. Elejalde, «La República,» 29 Junio 2018. [En línea]. Available: <https://www.larepublica.co/infraestructura/en-lo-que-va-del-ano-han-ocurrido-20238-accidentes-de-transito-en-el-pais-2744124>.
- [3] J. J. Posada Henao , S. Cadavid Agudelo y L. Castro Gómez, Consistencia en el Diseño: predicción de la velocidad de operación en carreteras, Medellín, 2015.
- [4] J. F. Sánchez Ordóñez, Metodología para la evaluación de la consistencia del trazado de carreteras interurbanas de dos carriles, Madrid, 2011.
- [5] J. Cárdenas Grisales, Diseño geométrico de carreteras, ECOE EDICIONES, 2008.
- [6] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS), Manual de diseño geométrico de carreteras, Bogotá, 2008.

- [7] AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORT OFFICIALS, (AASHTO), A policy on Geometric Design of Highways and Streets, Washington, D.C., 2004.
- [8] A. M. Pérez Zuriaga, F. J. Camacho Torregrosa y A. García García, La velocidad de operación y su aplicación en el análisis de la consistencia de carreteras para la mejora de la seguridad vial, Plataforma Tecnológica Española de la Carretera, 2011.
- [9] D. Méndez, Abril 2009. [En línea]. Available: <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/velocidad-ingenieria-de-transito.pdf>.
- [10] A. M. Pérez Zuriaga, Caracterización y modelización de la velocidad de operación en carreteras convencionales a partir de la observación naturalística de la evolución de vehículos ligeros, Valencia, 2012.
- [11] Easa, S.M., Dong, H. y Li, J., Use of Satellite imagery for Establish Road Horizontal Alignments Journal of Surveying Engineering, 2007.
- [12] Dong, H., Easa, S.M. y Li, J., Approximate Extraction of Spiralled Horizontal Curves from Stellite Imagery, Journal of Surveying Engineering, 2007.
- [13] Ben Arieh, D., Chang, S., Rys, M. Y Zhang, G., Geometric Modeling of Highways Using Global Positioning System Data and B-Spline Approximation, Journal of Transportation Engineering, 2004, pp. 632-636.
- [14] Nehate, G., y Rys, M., 3D Calculation of Stopping-Sight Distance from GPS Data, Journal of Transportation Engineering, 2006.
- [15] Imran, M., Hassan, Y. y Patterson, D., GPS-GIS-Based Procedure for Tracking Vehicle Path on Horizontal Alignments., vol. 21, 2006, pp. 383-394.
- [16] Wasielewski, P., Speed as a measure of driver risk: observed speeds versus driver en vehicle characteristics, vol. 16, 1984, pp. 80-103.
- [17] Williams, A.F., Kyrychencko, S.Y y Retting, R.A, Characteristics of speeders, vol. 37, Journal of Safety Research, 2006, pp. 227-232.
- [18] Jorgensen, F. y Polak, J., The effect of personal characteristics on drivers' speed selection. An economic approach, Journal of Transport Economics and Policy, 1993, pp. 237-252.

- [19] Gibreel, G.M., Easa, S. M., y El-Dimeery, I. A., Prediction of operating speed on three-dimensional highway alignments, *Journal of Transportation Engineering-ASCE*, 2001, pp. 21-30.
- [20] Fitzpatrick, K., y Collins, J. M., Speed-profile model for two-lane rural highways, vol. 1737, *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 2000, pp. 42-49.
- [21] Castro, M., Sánchez, J.F., Ardila, N. y Melo, J., Speed models for highway consistency analysis. A Colombian case study. 4th International Symposium on Highway Geometric Design, Valencia, 2010.
- [22] Wang, J. et al., Operating Speed Model for Low Speed Urban Tangent Streets Base don In-Vehicle GPS Data. 85th TRB Annual Meeting CD-ROM, 2006.
- [23] F. Bella, Assumptions of operating speed-profile models on deceleration and acceleration rates: verification in the driving simulador, Washington D.C.: 87th Annual Meeting Transportation Research Board, 2008.
- [24] Ibrahim, A.T. y Hall, F.L., Effect of adverse weather conditions on speed-flow-occupancy relationships, vol. 1457, *Transportation Research*, 1994, pp. 184-191.
- [25] H. Morales, *Ingeniería Vial I*, Santo Domingo: Editora Búho, 2006.
- [26] Y. García Ramírez, *Aceleraciones y desaceleraciones de vehículos livianos en caminos de montaña*, Tesis doctoral, 2014.
- [27] Trapp, K., & Oellers, F. W., Road characteristics and driving behavior on two-lane rural roads. *Research Road Construction and Road Traffic Technique (Forschung Strassenbau und Strassenverkehrs-technik)*, Bonn, Alemania: Minister of Transportation, 1974.
- [28] Koeppel, G., & Bock, H., Operating speed as a function of curvature change rate. *Research Road Construction and Road Traffic Technique (Forschung Strassenbau und Strassenverkehrs-technik)*, Bonn, Alemania: Minister of Transportation, 1979.
- [29] Trapp, K. H., & Kraus, D., Measurement and examination of the influence: longitudinal grade classes, curvature change rate, passing possibility and lane width in the design procedure (RAS-Q). *Research Road Construction and Road Traffic Technique*, Bonn, Alemania: Minister of Transportation, 1983.

- [30] Al-Kassar, B., Hoffmann, G., & Zmeck, D., The influence of road sectional features in the momentary speed of free moving passenger cars. Research Road Construction and Road Traffic Technique (ForschungStrassenbau und Strassenverkehrs-technik), Bonn, Alemania: Minister of Transportation, 1981.
- [31] Leong, H. J., The distribution and trend of free speeds on two-lane two-way rural highways in New South Wales, Australian Road Research Board, 1968, pp. 791-814.
- [32] Figueroa, A., & Tarko, A, Free-flow speed changes in the vicinity of horizontal curves. . 133, págs. 1-19. Chicago, Illinois: Transportation Research Board., vol. 133, Chicago: 3rd International Symposium on Highway Geometric Design, 2005, pp. 1-19.
- [33] McLean, J. R., Two-lane highway traffic operations: theory and practice. Melbourne: Gordon and Breach Science Publishers., 1989.
- [34] Polus, A., Borovsky, S., & Livneh, M., Limited sight distance effect on speed, vol. 5, American Society of Civil Engineers, 1979, pp. 549-560.
- [35] Bennett, C. R., A speed prediction model for rural two-lane highways. Tesis de Doctorado de Filosofía en Ingeniería, Auckland: University of Auckland., 1994, p. 456.
- [36] Lamm, R., Psarianos, B., y Mailaender, T., Highway design and traffic safety engineering handbook (Primera ed), New York, 1999.
- [37] Pérez, A., García, A., Camacho, F., & D'Attoma, P., Use of gps data to model operating speed and deceleration on two-lane rural roads, Transportation Research Board, 2010, pp. 11-20.
- [38] A GARCIA GARCIA GARCIA, F. J. CAMACHO TORREGROSA y A.M. PEREZ ZURIAGA, Plataforma tecnológica española de la carretera (PTC), Madrid, 2011.
- [39] Islam, M. N., y Seneviratne, P. N., Evaluation of design consistency of two-lane highways, vol. 64, 1994, pp. 28-31.
- [40] Tomás Echaveguren y Álvaro Díaz, Perfiles de velocidad de operación en curvas horizontales aisladas, Universidad de Concepción..
- [41] Roberto Nielsen; Estrella Cabrera, Carlos Javier Cortes Sanchez, Estudio de velocidad de operación y análisis del perfil de velocidades del trayecto

Tumaco-pasto K6+850 – K25+000 mediante la utilización de radar, Universidad de Nariño, 2013.

- [42] RUTA DEL CACAO, [En línea]. Available: <http://rutadelcacao.com.co/>.
- [43] AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA (ANI), «Informe final de estudios y diseños estructuración corredor vial Bucaramanga-Barrancabermeja-Yondó,» 2013.
- [44] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS), «Volúmenes de Tránsito,» 2016.
- [45] DIRECCIÓN DE TRÁNSITO Y TRANSPORTE SECCIONAL SANTANDER, «Informe de accidentalidad,» 2017-2018.
- [46] DIRECCIÓN DE TRÁNSITO Y TRANSPORTE SECCIONAL MAGDALENA MEDIO, «Informe de accidentalidad,» 2017-2018.
- [47] RACELOGIC SUPPORT CENTRE, «Racelogic Support,» [En línea]. Available:
https://racelogic.support/VBOX_Mining/FAQ/VBOX_Mining_Hardware_FAQ/How_accurate_is_VBOX%3F.
- [48] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, «Mapa de carreteras,» 2014. [En línea]. Available: <https://hermes.invias.gov.co/carreteras/>.

ANEXOS

ANEXO A. Velocidades individuales de las curvas presentes tramo, sentido Bucaramanga-Barrancabermeja

No.	Abscisa	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12
1	1131,19		84,915	82,751	80,258	77,966	70,986	88,154	88,394	73,025	96,854	85,019	88,235
2	4850,9		67,179	85,311	64,138	69,346	75,374	85,323	76,885	80,177	94,05	85,58	93,442
3	5846,22	44,3	68,242	79,307	68,656	88,322	75,875	83,351	69,515	80,392	88,513	76,634	86,89
4	6438,6	61,788	66,358	87,424	71,305	90,573	80,234	35,757	73,827	84,141	98,208	77,563	93,686
5	6888,02	18,387	56,818	90,804	72,327	77,631	71,399	58,288	72,956	62,313	62,617	79,893	48,87
6	8017,84	65,182	49,098	76,173	60,927	74,956	74,678	47,487	65,275	55,34	81,411	72,269	75,431
7	9046,85	66,201	46,119	73,031	55,66	56,296	81,95	53,484	62,869	84,306	76,328	39,741	70,229
8	9641,01	29,593	26,926	87,508	57,879	81,417	94,335	74,128	63,373	88,825	94,527	80,359	38,437
9	10643,9	75,048	42,746	74,07	63,187	66,145	81,054	65,184	73,038	83,313	61,869	81,388	55,058
10	17720,39	81,645	75,828	45,956	55,394	93,862	69,18	54,542	41,819	83,387	56,648	61,767	76,479
11	18503,3	81,975	67,546	70,341	54,495	91,427	60,819	81,047	43,37	80,245	54,985	73,268	65
12	22852,25	28,031	97,804	60,681	74,239	100,403	78,292	76,266	60,221	74,606	85,547	78,919	98,429
13	23359,38	93,733	101,995	67,707	65,439	93,22	63,277	42,772	55,83	67,074	87,899	64,617	92,302
14	27647,06	56,047	109,988	77,531	64,647	91,865	64,784	85,017	64,833	72,896	81,365	66,42	90,877

**ANEXO B. Velocidades individuales de las curvas presentes tramo, sentido
Barrancabermeja-Barrancabermeja**

No.	Abscisa	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11
1	1131,19	96,399	54,193	57,546	67,53	90,816	66,313	66,146	74,866	68,214	54,904	71,619
2	4850,9	78,681	60,59	36,761	81,424	95,837	64,531	39,17	74,334	65,37	78,454	71,703
3	5846,22	85,367	73,851	56,39	67,044	97,996	73,962	65,628	81,179	74,565	71,79	73,421
4	6438,6	83,815	54,168	62,832	56,741	94,052	66,382	67,223	79,821	69,854	74,994	68,865
5	6888,02	87,904	57,691	74,355	74,894	88,771	63,343	51,503	74,424	67,163	72,742	80,213
6	8017,84	62,073	34,395	58,989	80,606	75,415	62,401	49,124	48,738	65,191	76,995	72,546
7	9046,85	76,11	71,786	74,077	58,968	89,437	69,322	53,23	74,022	61,063	84,934	77,522
8	9641,01	61,953	63,333	61,777	55,053	70,263	64,146	63,607	97,381	76,726	78,967	74,574
9	10643,9	63,169	43,643	68,798	53,584	82,201	51,616	33,828	50,099	50,053	64,357	58,843
10	17720,39	94,966	54,046	84,075	60,222	89,895	57,576	66,364	78,21	68,91	88,166	84,207
11	18503,3	86,989	52,398	81,787	82,15	43,803	49,191	39,58	69,841	58,453	56,582	69,718
11A	19031,9	69,327	49,667	62,032	82,819	70,385	45,136	35,37	56,208	52,753	49,553	54,473
11B	19169,79	73,893	49,418	56,454	75,68	63,522	46,468	41,6	54,869	58,295	52,754	49,489
11C	19565,85	61,341	40,034	66,153	41,28	65,468	57,582	51,438	68,803	64,225	66,834	61,307
12	22852,25	87,01	57,448	97,918	105,245	106,772	66,861	72,999	68,495	71,51	90,418	93,73
13	23359,38	76,189	55,356	91,237	98,968	98,331	79,811	59,061	67,145	64,412	74,387	85,621
14	27647,06	67,939	57,227	78,988	79,836	89,534	63,086	62,495	74,009	92,758	85,235	87,722