

**DESARROLLO DE UN MÉTODO PARA EVALUAR CONSISTENCIA DEL
DISEÑO GEOMÉTRICO DE CARACTERES EN COLOMBIA, BASADO EN EL
PERFIL DE VELOCIDADES DE OPERACIÓN FASE II**

Néstor Guillermo Ardila Arrieta

Universidad del Cauca

Facultad de ingeniería civil

Instituto de Estudios de Posgrado en Ingeniería Civil

Popayán, febrero de 2010

**DESARROLLO DE UN MÉTODO PARA EVALUAR CONSISTENCIA DEL
DISEÑO GEOMÉTRICO DE CARACTERES EN COLOMBIA, BASADO EN EL
PERFIL DE VELOCIDADES DE OPERACIÓN FASE II**

Néstor Guillermo Ardila Arrieta

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería de vías terrestres

Director: Ing. José Fernando Sánchez Ordoñez
Ingeniero civil, Magíster en Ingeniería de Vías Terrestres

Universidad del Cauca

Facultad de ingeniería civil

Instituto de Estudios de Posgrado en Ingeniería Civil

Popayán, febrero de 2010

Nota de aceptación

Firma del presidente jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Popayán, febrero de 2010

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. JUSTIFICACIÓN.....	5
3. OBJETIVOS.....	7
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	7
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
4. ALCANCE.....	8
5. METODOLOGÍA.....	11
6. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA FASE I.....	14
6.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	19
6.2 RESUMEN DEL CAPÍTULO.....	20
7. TOMA Y REDUCCIÓN DE LA INFORMACIÓN PRIMARIA.....	21
7.1 SELECCIÓN DE LOS SITIOS PARA TOMA DE VELOCIDADES.....	21
7.2 SELECCIÓN DE LAS VARIABLES GEOMÉTRICAS UTILIZADAS.....	26
7.3 RECOLECCIÓN DE VELOCIDADES EN CAMPO.....	27
7.4 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE CAMPO.....	31
7.5 RESUMEN DEL CAPÍTULO.....	34
8. VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES DE PRONÓSTICO DE VELOCIDADES DE OPERACIÓN DEL MÓDULO DE CONSISTENCIA DE DISEÑO DEL IHSDM.....	35
8.1 VELOCIDADES PRONOSTICADAS VS PERCENTIL 85 DE VELOCIDADES OBSERVADAS.....	41
8.2 ESTADÍSTICOS DE LAS ECUACIONES DE PRONÓSTICO DE VELOCIDADES.....	42
8.3 RESUMEN DEL CAPÍTULO.....	47
9. ECUACIONES PRELIMINARES PARA PRONOSTICAR VELOCIDADES DE OPERACIÓN.....	49
9.1 CURVAS VERTICALES EN RECTAS HORIZONTALES.....	56
9.1.1 Curvas convexas.....	59

9.1.1.1	Curvas convexas sin limitaciones en la distancia de visibilidad	60
9.1.1.2	Curvas convexas con limitaciones en la distancia de visibilidad.....	61
9.1.2	Curvas cóncavas	61
9.2	CURVAS VERTICALES SOBRE CURVAS HORIZONTALES	63
9.2.1	Curvas verticales convexas combinadas con curvas horizontales	67
9.2.1.1	Curvas horizontales combinadas con curvas verticales convexas sin limitaciones en la distancia de visibilidad	71
9.2.1.2	Curvas horizontales combinadas con curvas verticales convexas con limitaciones en la distancia de visibilidad	74
9.2.2	Curvas horizontales combinadas con curvas verticales cóncavas	77
9.3	RESUMEN DEL CAPÍTULO	80
10.	VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES PRELIMINARES PARA PRONOSTICAR VELOCIDADES DE OPERACIÓN	83
10.1	VELOCIDADES PRONOSTICADAS Vs PERCENTIL 85 DE VELOCIDADES OBSERVADAS	87
10.2	ESTADÍSTICOS DE LAS ECUACIONES PRELIMINARES.....	89
10.3	RESUMEN DEL CAPÍTULO	95
11.	ECUACIONES PARA PRONOSTICAR VELOCIDADES DE OPERACIÓN	96
11.1	CURVAS VERTICALES SOBRE RECTAS	96
11.2	CURVAS VERTICALES COMBINADAS CON CURVAS HORIZONTALES	97
11.2.1	Curvas verticales convexas combinadas con curvas horizontales	98
11.2.1.1	Curvas verticales convexas sin limitaciones en la distancia de visibilidad combinadas con curvas horizontales.....	100
11.2.1.2	Curvas verticales convexas con limitaciones en la distancia de visibilidad combinadas con curvas horizontales.....	102
11.2.2	Curvas verticales cóncavas combinadas con curvas horizontales	103
11.2.3	Selección del modelo para curvas verticales convexas	105
11.3	ECUACIONES ADOPTADAS DE OTRAS INVESTIGACIONES.....	106
11.4	RESUMEN DEL CAPÍTULO	108
12.	MÉTODO PARA EVALUAR LA CONSISTENCIA DEL DISEÑO GEOMÉTRICO DE CARRETERAS	110
12.1	EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA DEL DISEÑO GEOMÉTRICO DE CARRETERAS COLOMBIANAS CON BASE EN EL PERFIL DE VELOCIDADES DE OPERACIÓN	110

12.1.1	Seleccionar la velocidad deseada	112
12.1.2	Pronosticar las velocidades de operación.....	113
12.1.3	Seleccionar la menor velocidad en cada elemento	116
12.1.4	Ajustar las velocidades por aceleraciones y desaceleraciones	116
12.1.5	Evaluar la consistencia del diseño geométrico	118
12.1.6	Completar el perfil de velocidades de operación	119
12.1.6.1	Diferencia entre las velocidades de operación pronosticadas (V_{85}) y la velocidad de diseño del tramo de vía en estudio.....	120
12.1.6.2	Diferencia de velocidades de operación entre dos elementos consecutivos.....	120
12.1.6.3	Desaceleraciones forzadas.....	121
12.2	EJEMPLO DE CONSTRUCCIÓN DEL PERFIL DE VELOCIDADES DE OPERACIÓN	121
12.3	EJEMPLO DE LA EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA DEL DISEÑO GEOMÉTRICO.....	132
12.3.1	Evaluación de la consistencia de diseño aplicando la metodología desarrollada	133
12.3.2	Evaluación de la consistencia de diseño aplicando IHSDM	137
12.3.3	Utilización del programa SIMCAR para elaborar perfiles de velocidades de operación	139
12.4	CONSIDERACIONES Y LIMITACIONES DEL MÉTODO DESARROLLADO	142
13.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	146
13.1	CONCLUSIONES	146
13.2	RECOMENDACIONES	150
	BIBLIOGRAFÍA.....	151
	ANEXOS	154

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Modelos de aceleraciones y desaceleraciones	17
Tabla 2. Matriz de los sitios de estudio	24
Tabla 3. Cálculo del percentil 85 de velocidades (V_{85})	32
Tabla 4. Ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación del IHSDM.....	36
Tabla 5. Rangos de las principales variables utilizadas en las ecuaciones de pronóstico de velocidades del IHSDM	37
Tabla 6. Estadísticas descriptivas para los sitios seleccionados en Colombia.	38
Tabla 7. Estadísticos de las ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación de IHSDM	43
Tabla 8. Estadísticas de las ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación del IHSDM....	46
Tabla 9. Variables independientes para estimar los modelos de pronóstico de velocidades de operación (V_{85})	54
Tabla 10. Estimación preliminar de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas verticales convexas	59
Tabla 11. Estimación preliminar de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas verticales convexas sin limitaciones en la distancia de visibilidad	60
Tabla 12. Estimación preliminar de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas verticales cóncavas	62
Tabla 13. Estimación preliminar de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas horizontales combinadas con verticales convexas	67
Tabla 14. Estimación de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas horizontales combinadas con verticales convexas	68
Tabla 15. Estimación de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas horizontales combinadas con verticales convexas	69
Tabla 16. Estimación preliminar de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas horizontales combinadas con verticales convexas sin limitaciones en la distancia de visibilidad ...	71
Tabla 17. Estimación de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas horizontales combinadas con verticales convexas sin limitaciones en la distancia de visibilidad	72
Tabla 18. Estimación preliminar de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas horizontales combinadas con verticales convexas con limitaciones en la distancia de visibilidad ..	74
Tabla 19. Estimación de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas horizontales combinadas con verticales convexas con limitaciones en la distancia de visibilidad.....	75
Tabla 20. Estimación preliminar de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas horizontales combinadas con verticales cóncavas	77

Tabla 21. Estimación preliminar de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas horizontales combinadas con verticales cóncavas	78
Tabla 22. Ecuaciones preliminares de regresión obtenidas	81
Tabla 23. Estadísticas descriptivas de las variables utilizadas en el análisis de regresión de las ecuaciones preliminares	85
Tabla 24. Estadísticas descriptivas de los sitios seleccionados para el proceso de validación	86
Tabla 25. Estadísticos de las ecuaciones preliminares.....	90
Tabla 26. Parámetros de la ecuación de regresión (Modelo 1)	98
Tabla 27. Parámetros de la ecuación de regresión (Modelo 2)	99
Tabla 28. Parámetros de la ecuación de regresión (Modelo 3)	99
Tabla 29. Parámetros de la ecuación de regresión (Modelo 1)	100
Tabla 30. Parámetros de la ecuación de regresión (Modelo 2)	101
Tabla 31. Parámetros de la ecuación de regresión (Modelo 3)	101
Tabla 32. Parámetros de la ecuación de regresión.....	102
Tabla 33. Parámetros de la ecuación de regresión (Modelo 1)	103
Tabla 34. Parámetros de la ecuación de regresión (Modelo 2)	104
Tabla 35. Parámetros de la ecuación de regresión (Modelo 3)	104
Tabla 36. Resultados de la prueba F	106
Tabla 37. Ecuaciones de regresión obtenidas.....	109
Tabla 38. Ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación (V_{85}) para vehículos tipo autos.	114
Tabla 39. Tasas de variación de aceleraciones y desaceleraciones	117
Tabla 40. Datos de diseño en planta de la vía Patico - Coconuco.....	123
Tabla 41. Datos del diseño en perfil de la vía Patico - Coconuco	124
Tabla 42. Tasas de variación de aceleraciones y desaceleraciones	126
Tabla 43. Tasas de variación de aceleraciones y desaceleraciones	127
Tabla 44. Tasas de aceleraciones y desaceleraciones.....	129
Tabla 45. Cálculo de las distancias de desarrollo de la aceleración y de la desaceleración	130
Tabla 46. Tasas de variación de aceleraciones y desaceleraciones	131
Tabla 47. Diferencia entre las velocidades de operación y la velocidad de diseño.....	134
Tabla 48. Diferencia de velocidades de operación entre dos elementos consecutivos	135
Tabla 49. Sitios que presentan desaceleraciones forzadas	135
Tabla 50. Ubicación de los sitios que presentan inconsistencias en su diseño geométrico realizada por IHSDM en un tramo de la vía Patico – Coconuco	139
Tabla 51. Criterios de evaluación de la consistencia de diseño geométrico	147
Tabla 52. Resultados obtenidos en ambas fases de la investigación.....	148

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Rata de aceleraciones en curvas horizontales	18
Figura 2. Rata de desaceleraciones en curvas horizontales.....	18
Figura 3. Curva horizontal combinada con curva vertical convexa.	25
Figura 4. Curva cóncava en recta	25
Figura 5. Ubicación en campo del dispositivo de medición de velocidades	29
Figura 6. Localización del radar en curvas horizontales	30
Figura 7. Localización puntos dispuestos para medición de velocidades en curvas verticales	31
Figura 8. Polígono de frecuencias acumuladas, llamada también ojiva.	33
Figura 9. Velocidad calculada Vs percentil V_{85} de velocidad medida en el centro de las curvas	41
Figura 10. Diagrama de caja del valor absoluto de la diferencia de las velocidades observadas y las pronosticadas con las ecuaciones de IHSDM con todos los datos	44
Figura 11. Diagramas de caja del valor absoluto de la diferencia de las velocidades observadas y las pronosticadas con cada una de las ecuaciones de IHSDM	45
Figura 12. Percentil 85 de velocidades observadas Vs K	55
Figura 13. Percentil 85 de velocidades observadas Vs $1/K$	57
Figura 14. Percentil 85 de velocidades observadas Vs L_v	58
Figura 15. Percentil 85 de velocidades observadas Vs R en curvas horizontales y verticales combinadas.	64
Figura 16. Percentil 85 de velocidades observadas Vs K en curvas horizontales y verticales combinadas.	65
Figura 17. Percentil 85 de velocidades observadas Vs Longitud de curva horizontal combinada con curva vertical.....	66
Figura 18. Percentil 85 de velocidades observadas Vs inverso de longitud de curva horizontal combinada con curva vertical convexa.	70
Figura 19. Percentil 85 de velocidades observadas Vs inverso de longitud de curva horizontal combinada con curva vertical convexa sin limitaciones en la distancia de visibilidad.	73
Figura 20. Percentil 85 de velocidades observadas Vs inverso de longitud de curva horizontal combinada con curva vertical convexa con limitaciones en la distancia de visibilidad.....	76
Figura 21. Percentil 85 de velocidades observadas Vs inverso del radio de curva horizontal combinada con curva vertical cóncava.	79
Figura 22. Velocidad calculada Vs percentil V_{85} de velocidades medidas en el centro de las curvas	87
Figura 23. Diagrama de caja del valor absoluto de la diferencia de las velocidades medidas y las calculadas con las ecuaciones preliminares para todos los datos	91

Figura 24. Diagramas de caja del valor absoluto de la diferencia de las velocidades medidas y las calculadas con cada una de las ecuaciones preliminares	92
Figura 25. Diagramas de caja del valor absoluto de la diferencia de las velocidades medidas y las calculadas con cada una de las ecuaciones preliminares (Continuación)	93
Figura 26. Diagramas de caja del valor absoluto de la diferencia de las velocidades medidas y las calculadas con cada una de las ecuaciones preliminares (Continuación)	94
Figura 27. Diagrama de flujo del método para evaluar la consistencia del diseño geométrico ...	111
Figura 28. Diagrama de flujo de la metodología para pronosticar la velocidad de diseño a cada elemento geométrico, en el proceso de evaluación de consistencia de diseño	115
Figura 29. Diseño en planta de la vía Patico – Coconuco.....	123
Figura 30. Diseño en perfil vía Patico – Coconuco.	124
Figura 31. Perfil modificado de la vía Patico – Coconuco y asignación de velocidades de operación.	125
Figura 32. Perfil de velocidades de operación. Vía Patico – Coconuco.	128
Figura 33. Perfil de velocidades de operación con los ajustes de velocidades por aceleración y desaceleración. Vía Patico – Coconuco.....	132
Figura 34. Evaluación de la consistencia del diseño geométrico en un tramo de la vía Patico – Coconuco	136
Figura 35. Evaluación de la consistencia del diseño geométrico con IHSDM en un tramo de la vía Patico – Coconuco.....	138
Figura 36. Perfil de velocidades de la vía Patico- Coconuco generado por SIMCAR	141

1. INTRODUCCIÓN

El presente informe contiene el trabajo realizado con el propósito de completar la investigación “Desarrollo de un método para evaluar la consistencia de diseño geométrico de carreteras en Colombia basado en el perfil de velocidades de operación”, cuya fase I fue elaborada por el ingeniero John Andrés Melo Benavides entre los años 2003 y 2005 como requisito en sus aspiraciones a Magister en Vías Terrestres.

El tema central de la investigación es la evaluación de la consistencia de diseño geométrico. Se entiende por consistencia de diseño a la relación entre las características geométricas reales de una carretera y las que espera encontrar el conductor de un vehículo que circula por ella¹.

En la evaluación de la consistencia de diseño se pueden diferenciar dos métodos fundamentales, aquellos basados en el nivel de atención y los basados en el perfil de velocidad de operación. Los métodos basados en las velocidades de operación son más objetivos y se encuentran más desarrollados².

La FHWA (Federal Highway Administration) realizó un estudio en 1999 cuyo propósito fue demostrar la relación existente entre el diseño geométrico y la accidentalidad, del cual resultó que la reducción de velocidad en una curva horizontal con relación a una curva o recta precedente presenta la más fuerte y sensible relación con la frecuencia de accidentes³. Los resultados demostraron

¹ SÁNCHEZ, J y CASTRO, M. Procedimientos de evaluación de la consistencia de trazado de carreteras: IHSDM. En: Revista Rutas N°96. España 2003. p 5

² Ibid., p 6

³ FITZPATRICK, K. et al. Speed prediction for two-lane highways. Final report FHWA-RD_99-171. Junio de 1999. p 181-206

que en las curvas sobre las cuales se requerían una reducción de velocidad mayores a 20 km/h fue seis veces mayor a aquellas que requerían menos de 10 km/h.

Considerando lo anterior, la FHWA (Federal Highway Administration) incorporó en el programa computacional IHSDM (Interactive Highway Safety Design Model), un módulo que evalúa la consistencia de diseño basándose en el perfil de velocidades.

El IHSDM es una herramienta informática desarrollada por la FHWA, que permite evaluar diferentes aspectos de la seguridad vial, en cualquiera de sus etapas de planeamiento, diseño, rehabilitación y construcción, por parte de diseñadores, planificadores y administradores. También se puede utilizar para la evaluación de carreteras existentes⁴.

El módulo de consistencia del IHSDM realiza la evaluación utilizando un conjunto de ecuaciones con las cuales se calculan (pronostican) las velocidades de operación y las aceleraciones, a partir de la geometría de la carretera, con ellas se construye el perfil de velocidades y sobre él se ubican las inconsistencias de acuerdo con unos criterios establecidos.

Los primeros estudios que se realizaron para la evaluación de la consistencia del diseño solamente consideraban el diseño geométrico de la vía en planta⁵. En la presente investigación se tendrá en cuenta también al diseño en perfil, como parte de las variables geométricas que influyen en el comportamiento de los conductores al transitar por una carretera, por lo cual se aspira a obtener tres grupos de ecuaciones, así: un primer grupo que pronostique una velocidad de operación considerando únicamente el efecto de las curvas horizontales en pendientes uniformes, un segundo grupo que pronostique una velocidad de operación teniendo en cuenta solamente el efecto de las curvas verticales en

⁴ SÁNCHEZ, J y CASTRO, Op. Cit. p. 6

⁵ FITZPATRICK, K. et al. Op. Cit. p. 21

rectas horizontales, y un tercero el cual pronostica la velocidad en aquellos casos en los cuales se combinan curvas verticales y curvas horizontales.

Como punto de partida, en nuestra investigación se adoptaron las diez combinaciones geométricas utilizadas por la FHWA en el IHSDM (cuatro casos de curvas horizontales sobre pendientes, tres casos en curvas verticales sobre rectas horizontales y tres casos de curvas verticales combinadas con horizontales).

En la primera fase de la presente investigación se desarrollaron ecuaciones para tres de las combinaciones consideradas en el primer grupo, y las ecuaciones para calcular las tasas de desaceleraciones antes de entrar en las curvas y de aceleración después de salir de ellas. Estas ecuaciones se describen en el capítulo 6.

En esta segunda fase se desarrollaron las restantes ecuaciones de pronóstico de velocidades (segundo y tercer grupo), se elaboró el procedimiento para la construcción de perfiles de velocidades y se establecieron los pasos para la evaluación de la consistencia de diseño de carretas en Colombia, con base en las mediciones de velocidades de recorrido en carreteras colombianas.

La primera parte del informe presenta la evaluación realizada al programa computacional IHSDM (Interactive Highways Safety Design Model) a través de un proceso de validación para verificar su posible aplicación en carreteras de Colombia. Cabe anotar que el programa IHSDM es el único de los modelos estudiados, entre nacionales e internacionales, que elabora perfiles de velocidad de operación y evalúa la consistencia teniendo en cuenta el diseño geométrico en planta y en perfil.

En la segunda parte se desarrollaron los modelos de pronóstico de velocidades de operación utilizando parte de los registros de las mediciones realizadas en la presente investigación. La parte complementaria de los registros se utilizó en el proceso de validación de los modelos desarrollados.

En la tercera parte se seleccionaron las ecuaciones con mayor valoración estadística en el pronóstico de velocidades de operación en nuestras carreteras, se ajustó el procedimiento para la elaboración de perfiles de velocidades de operación con los resultados obtenidos en ambas fases, y se desarrolló la metodología de evaluación de la consistencia del diseño geométrico para carreteras colombianas.

La metodología desarrollada permitirá evaluar la consistencia de diseño geométrico, de acuerdo con los criterios establecidos, de un tramo de carretera o de vías proyectadas, conociendo su información geométrica y utilizando como principal herramienta el perfil de velocidades de operación. El perfil permite detectar gráficamente, de una manera más extensa y a simple vista, los sitios en donde se presentan inconsistencias de diseño geométrico utilizando una convención de símbolos y de colores adoptados para este propósito. Teniendo en cuenta los resultados de la evaluación, se pueden realizar correctivos al diseño geométrico. También puede aplicarse tramos de carreteras existentes en los cuales se presente una de accidentalidad alta, en la verificación de la efectividad de dispositivos de control de velocidades, para evaluar problemas de visibilidad en curvas, verificar si la velocidad de diseño del tramo es razonable, entre otros.

Se espera que los resultados obtenidos de este trabajo sean de utilidad para la aplicación del concepto de consistencia de diseño geométrico en el trazado y construcción de vías en Colombia, lo cual redundaría en carreteras más homogéneas, más cómodas y más seguras para los usuarios.

2. JUSTIFICACIÓN

En la investigación “Desarrollo de un método para evaluar la consistencia del diseño geométrico de carreteras en Colombia basado en el perfil de velocidades de operación, fase I”, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Valor de la velocidad deseada.
- Ecuación de pronóstico de velocidad de operación en curvas horizontales en pendientes uniformes entre 0% y 4%.
- Ecuación de pronóstico de velocidad de operación en curvas horizontales en pendientes uniformes entre 4% y el 9%.
- Ecuación de pronóstico de velocidad de operación en curvas horizontales en pendientes uniformes entre -9% y el -4 %.
- El modelo de pronóstico de desaceleraciones entre el punto medio de la recta precedente y el punto medio de la curva horizontal considerada.
- El modelo de pronóstico de aceleraciones entre el punto medio de la curva considerada y de la recta siguiente.

A pesar de los resultados positivos obtenidos en la primera fase, no son suficientes para desarrollar la metodología para evaluar la consistencia del diseño geométrico, lo cual se pretende alcanzar con este trabajo, en el que se busca establecer las ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación en las siguientes condiciones y combinaciones de trazado:

- Curvas verticales cóncavas.
- Curvas verticales convexas con limitaciones en la distancia de visibilidad.
- Curvas verticales convexas sin limitaciones en la distancia de visibilidad.
- Curvas horizontales combinadas con curvas verticales cóncavas.
- Curvas horizontales combinadas con curvas verticales convexas con limitaciones en la distancia de visibilidad.
- Curvas horizontales combinadas con curvas verticales convexas sin limitaciones en la distancia de visibilidad.

La obtención de las ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación para diferentes combinaciones geométricas de curvatura en planta y en perfil, a partir de mediciones realizadas en diferentes regiones de país, son necesarias para la elaboración del procedimiento que nos permitirá la construcción del perfil de velocidades de operación que se espera alcanzar en un determinado tramo de vía y en el cual se basará el desarrollo de la metodología de la consistencia de diseño geométrico de las carreteras colombianas.

Este trabajo se hace con el propósito de ampliar el conocimiento sobre este tema para que los diseñadores de vías, administradores viales y planificadores colombianos puedan contar con una herramienta que ayudará a mejorar la seguridad vial y a obtener diseños más adecuados y consistentes.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Completar el conjunto de ecuaciones para el pronóstico de velocidades de operación, el procedimiento de elaboración de perfiles de velocidades de operación y la metodología para la evaluación de la consistencia del diseño geométrico para las carreteras colombianas, iniciados en la fase I de la presente investigación.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar los resultados arrojados por el programa computacional IHSDM con los resultados obtenidos en esta investigación.
- Comparar los perfiles de velocidad de operación obtenidos utilizando los modelos desarrollados por investigadores internacionales con los obtenidos de las mediciones de campo realizadas en las carreteras colombianas.
- Evaluar el programa SIMCAR para utilizarlo como herramienta en la elaboración de perfiles de velocidad de operación.
- Validar los resultados obtenidos en la investigación evaluando la consistencia del diseño geométrico en vías diferentes a las utilizadas en el desarrollo de la metodología final.

4. ALCANCE

En esta segunda fase de la investigación se busca obtener las ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación para las siguientes combinaciones geométricas:

- Curva vertical cóncava localizada en recta.
- Curva vertical cóncava combinada con curva horizontal.
- Curva vertical convexa sin limitaciones en su distancia de visibilidad localizada en recta.
- Curva vertical convexa sin limitaciones en su distancia de visibilidad combinada con curva horizontal.
- Curva vertical convexa con limitaciones en su distancia de visibilidad localizada en recta.
- Curva vertical convexa con limitaciones en su distancia de visibilidad combinada con curva horizontal.

Para la presente investigación, se asume que una curva horizontal está combinada con una curva vertical cuando la distancia entre sus centros es inferior o igual a 30 m (este criterio se asumió también en la investigación realizada por la FHWA), garantizando que al menos la mitad de la curva vertical quede localizada dentro de la curva horizontal y que el traslapo entre ellas sea significativo.

La investigación se fundamenta en la metodología planteada en el desarrollo del módulo de evaluación de consistencia del programa computacional IHSDM, donde se obtiene un conjunto de ecuaciones para estimar la velocidad de operación, haciéndose la evaluación con base en ese perfil.

Con las ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación obtenidas en ambas fases de la investigación y con los modelos de aceleración y desaceleración obtenidos en la fase I, se configurará un procedimiento para construir perfiles de velocidad de operación, los cuales serán la principal base para el desarrollo de la metodología de evaluación de consistencia del diseño geométrico de las carreteras colombianas.

Para cumplir los objetivos trazados se medirán velocidades de recorrido a flujo libre de vehículos tipo automóvil en vías localizadas en terrenos montañoso y ondulado, donde las características del alineamiento vial cumplen con las combinaciones de diseño geométrico en planta y en perfil requeridas.

Las vías de estudio se localizan en el departamento del Cauca, en primer lugar por su proximidad al centro de investigación (la Universidad del Cauca), lo que facilita el trabajo de campo, y en segundo lugar porque la topografía es representativa de las carreteras colombianas.

Los puntos escogidos para realizar las mediciones de las velocidades fueron seleccionados de los planos de diseño geométrico.

Se compararán los resultados de evaluación de consistencia obtenidos con la metodología desarrollada con los arrojados por el programa IHSDM, para verificar su aplicación en carreteras colombianas.

Se estudiará el programa SIMCAR⁶ (Modelo analítico de simulación microscópica de carreteras de dos carriles) desarrollado por la Universidad del Cauca, con el propósito de elaborar perfiles de velocidades de operación y verificar su aplicabilidad en el método de evaluación de consistencia, que es el objetivo central de esta investigación.

⁶ BUSTAMANTE MUÑOZ, Ary; SOLANO, Efraín de Jesús y ARBOLEDA VÉLEZ, Carlos Alberto. Simcar Modelo para simular los efectos de la circulación de vehículos en vías de dos carriles. En revista Ingeniería hoy. Popayán .N° 24, Junio de 2006. p 37-46

5. METODOLOGÍA

Para la realización del presente trabajo, “Desarrollo de un método para evaluar la consistencia del diseño geométrico de carreteras en Colombia basado en el perfil de velocidades de operación, fase II”, se utilizó la misma metodología empleada en la primera fase.

1. Recopilación y análisis bibliográfico de los estudios publicados por la FHWA sobre diferentes métodos de evaluación de la consistencia del diseño geométrico y del informe final de la investigación “Desarrollo de un método para evaluar la consistencia del diseño geométrico de carreteras en Colombia basado en el perfil de velocidades de operación, fase I”.
2. Estudio de la versión de prueba del programa IHSDM y de sus manuales.
3. Selección de las vías a estudiar y obtención de sus datos geométricos, los cuales permitirán la selección de las curvas horizontales combinadas con verticales y de las curvas verticales sobre rectas para el desarrollo de las ecuaciones de pronóstico de velocidad de operación complementarias. Los criterios de orden técnico para la selección de las vías son los siguientes:
 - Vías principales o primarias.
 - Poseer un tráfico promedio diario comprendido entre 400 y 4.000 vehículos diarios.
 - Estar localizadas en terrenos ondulados o montañosos.
 - Su pavimento debe estar en buen estado.
 - Preferiblemente vías con diferentes velocidades de diseño.

4. Selección de los puntos de estudios de acuerdo con los siguientes criterios técnicos de selección:
 - Estar localizados fuera de la influencia de poblaciones.
 - No deben encontrarse cerca de intersecciones.
 - No deben poseer tercer carril o carril de ascenso.
 - Carentes de dispositivos que reduzcan la velocidad de operación.

5. Las curvas localizadas en los sitios seleccionados debieron cumplir los siguientes requisitos de orden técnico:
 - Curvas verticales Tipo I y Tipo III definidos en Manual de diseño geométrico para carreteras del INVIAS⁷.
 - El traslapo de las curvas horizontales con las curvas verticales debe ser significativo, y la distancia entre sus centros no debe ser superior a 30 metros.

6. Medición de velocidades de operación de vehículos tipo automóvil que se desplazan en condiciones de flujo libre, utilizando radares de mano.

7. Validación de las ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación del módulo de consistencia del programa IHSDM, con el fin de verificar su posible aplicación en las vías colombianas.

8. Reducción de los datos de campo y obtención de las ecuaciones de pronóstico de velocidades, para completar el conjunto de ecuaciones y desarrollar el método de evaluación de la consistencia.

⁷ MINISTERIO DE TRANSPORTE, Instituto Nacional de Vías. Manual de diseño geométrico para carreteras, Santafé de Bogotá. 1998.

9. Validación de las ecuaciones de pronóstico de velocidades obtenidas con los datos de campo, para verificar que los valores proporcionados por éstas se ajusten a datos medidos en otras vías.
10. Definición del método de evaluación de la consistencia del diseño geométrico de carreteras en Colombia utilizando los resultados de las dos fases de la investigación.
11. Aplicación del programa IHSDM a una carretera colombiana y comparación de sus resultados con los obtenidos utilizando el método desarrollado.
12. Aplicación del programa SIMCAR (Modelo analítico de simulación microscópica de carreteras de dos carriles) a una carretera colombiana para obtener el perfil de velocidad de operación y compararlo con el obtenido con el método desarrollado.

6. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA FASE I

En la fase I de la presente investigación se desarrollaron las ecuaciones de predicción de velocidades de operación en el centro de las curvas horizontales localizadas sobre pendientes uniformes y las ecuaciones de predicción de aceleraciones y desaceleraciones, es decir, ecuaciones de predicción de cambios de velocidades entre en punto medio de la tangente precedente y el punto medio de la curva horizontal considerada.

Después de seleccionar las vías a estudiar, de obtener la información de sus elementos geométricos, localizar en ellas los sitios que cumplieron con los requisitos predeterminados, necesarios para el desarrollo de la metodología de evaluación de la consistencia del diseño geométrico, se realizó la recolección de las velocidades de recorrido, algunas con mediciones de radar y otras de diferentes estudios realizados con anterioridad por investigadores de la Universidad del Cauca.

Obtenidas las velocidades de operación de campo el primer paso consistió en realizar el proceso de validación de las ecuaciones de predicción de velocidades y de aceleraciones desarrollados por investigadores de Estados Unidos, Europa y Australia. El propósito de este trabajo consiste en estudiar la posibilidad de poder utilizarlos para evaluar la consistencia de los diseños geométricos de nuestras carreteras a pesar de las diferencias de velocidades y de trazado existentes con las carreteras de los países desarrollados, prestando especial atención a los modelos utilizados en el módulo de evaluación de consistencia de diseño geométrico del programa computacional IHSDM, el cual presenta una metodología completa, coherente y que considera combinaciones de curvaturas verticales y horizontales en su análisis.

El paso siguiente consistió en el desarrollo de las ecuaciones de predicción de velocidades y de aceleraciones a partir de la información geométrica y de velocidades de campo recopiladas de las carreteras colombianas. Las ecuaciones para desarrollar la metodología de evaluación de consistencia de diseño geométrico para carreteras colombianas se seleccionaron de aquellas que aprobaron el proceso de validación y las restantes se desarrollaron con los datos recopilados en la investigación.

Los datos obtenidos en la fase I fueron los siguientes

- Ecuación de pronóstico de velocidad de operación para curvas horizontales en pendientes uniformes entre 0% y 4%.

$$V_{85} = 94.398 - \frac{3188.656}{R} \quad R^2 = 0.79$$

Donde V_{85} = Percentil 85 de velocidad en el punto medio de la curva
(km/h)

R = Radio de la curva (m)

R^2 = Coeficiente de correlación

Esta ecuación aprobó el proceso de validación, fue desarrollada en Estados Unidos por Lamm et al, por lo cual se ajusta a las condiciones de las carreteras colombianas.

- Para el pronóstico de velocidades de operación en el centro de curvas horizontales localizadas sobre pendientes uniformes entre el 4% y el 9% se obtuvo la siguiente ecuación:

$$V_{85} = 37.18 + 0.10R_n + 0.04R_{n-1}$$

$$R^2 = 0.55$$

Donde V_{85} = Percentil 85 de velocidad en el punto medio de la curva (km/h)

R_n = Radio de la curva (m)

R_{n-1} = Radio de la curva precedente (m)

R^2 = Coeficiente de correlación

Esta ecuación se obtuvo del análisis de regresión de los datos recopilados en la fase I de esta investigación, para un rango de radios entre 20 metros hasta 225 metros.

- Para las curvas horizontales con radios entre 25 metros y 225 metros, localizadas sobre pendientes uniformes comprendidas entre el -9% y el -4 % se obtuvieron dos ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación en sus centros:

$$V_{85} = 33.92 + 0.19R_n + 0.04R_{n-1}$$

$$R^2 = 0.73$$

$$V_{85} = 35.43 + 0.21R_n$$

$$R^2 = 0.72$$

Donde V_{85} = Percentil 85 de velocidad en el punto medio de la curva (km/h)

R_n = Radio de la curva (m)

R_{n-1} = Radio de la curva precedente (m)

R^2 = Coeficiente de correlación múltiple

- A partir de los datos recopilados en la fase I de esta investigación se obtuvo el valor de la velocidad deseada sobre rectas largas localizadas sobre pendientes uniformes comprendidas entre 4% y -4%, el cual es el siguiente:

$$V_d = 96.27$$

Donde V_d = Velocidad deseada (km/h)

El modelo de pronóstico de aceleraciones y desaceleraciones entre el punto medio de la recta precedente y el punto medio de la curva horizontal considerada, fue obtenido de la información recopilada para la investigación, debido a que los modelos de los investigadores internacionales no aprobaron el proceso de validación. Las ecuaciones obtenidas se resumen en la tabla 1 y se puede observar mejor su rango de aplicación en las figuras 1 y 2, que se muestran a continuación:

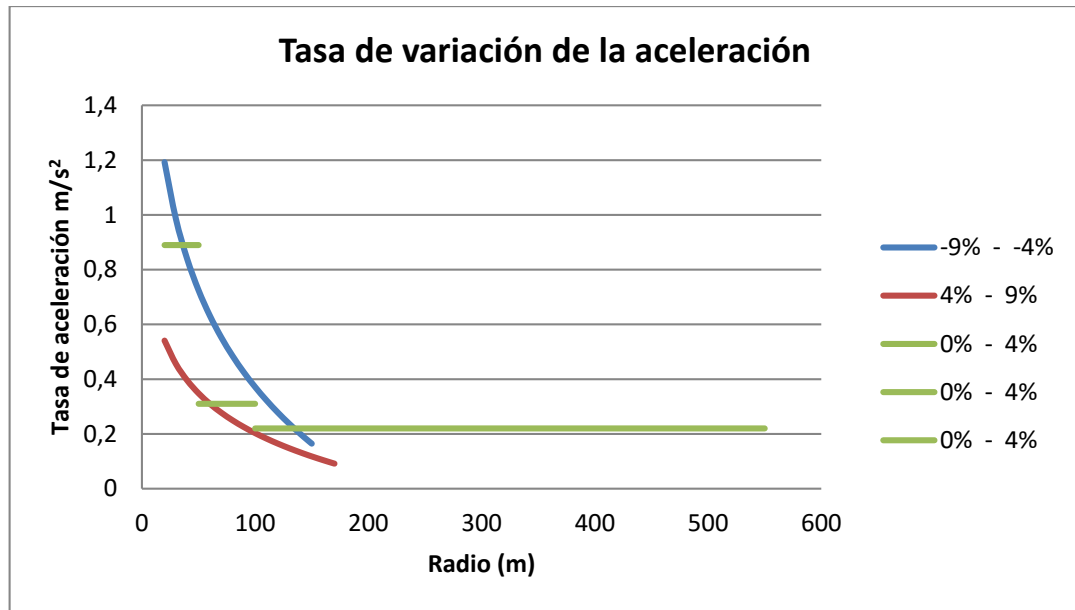
Tabla 1. Modelos de aceleraciones y desaceleraciones

RANGO DE PENDIENTES	RADIOS	MODELOS
Entre -9% y -4%	Entre 20 y 150	$a = -0.51 \ln(R) + 2.72$
Entre 4% y 9%	Entre 20 y 170	$a = -0.21 \ln(R) + 1.17$
Entre 0% y 4%	Entre 20 y 50	$a = 0.89$
	Entre 50 y 100	$a = 0.31$
	Entre 100 y 550	$a = 0.22$
Entre -9% y -4%	Entre 20 y 200	$d = 0.64 \ln(R) - 3.39$
Entre 4% y 9%	Entre 20 y 200	$d = 0.78 \ln(R) - 4.07$
Entre 0% y 4%	Entre 145 y 550	$d = 0.27 \ln(R) - 1.89$

Donde: a = Aceleración (m/s^2)

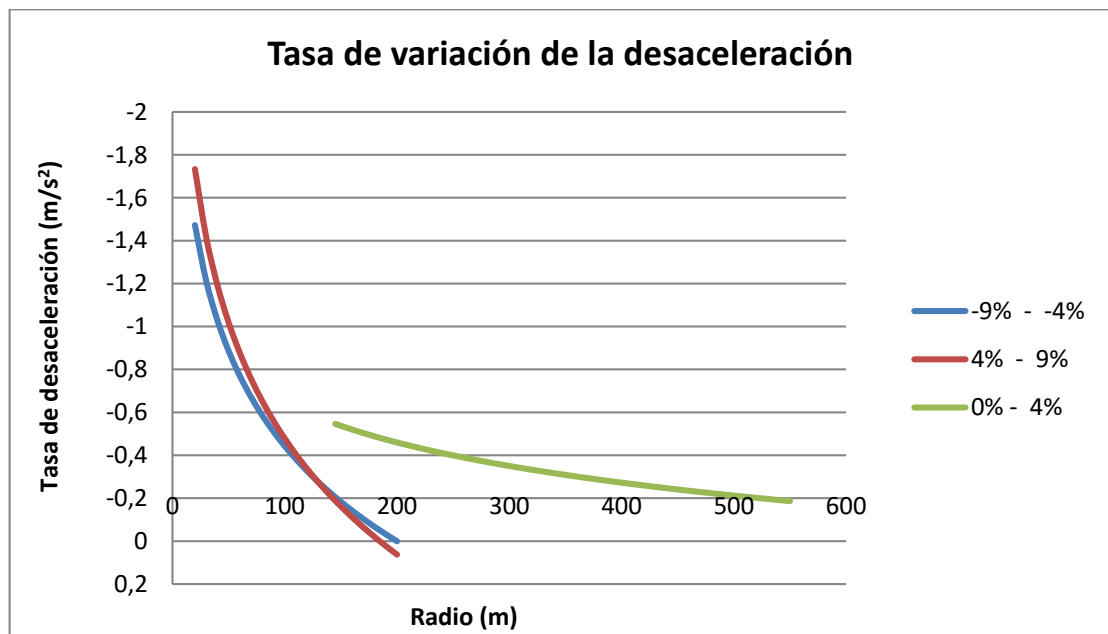
d = Desaceleración (m/s^2)

Figura 1. Rata de aceleraciones en curvas horizontales



FUENTE: Elaboración propia

Figura 2. Rata de desaceleraciones en curvas horizontales



FUENTE: Elaboración propia

6.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones de la fase I fueron:

- Los modelos de pronóstico de velocidades y de aceleraciones utilizados por el programa computacional IHSDM en su módulo de consistencia de diseño no se ajustaron a las condiciones de diseño geométricas y de velocidades de operación predominantes en las carreteras colombianas.
- Se pudo validar uno de las ecuaciones de pronóstico de velocidades desarrollada por investigadores internacionales (Lamm y Choueiri.).
- El radio de la curva precedente resultó del análisis de regresión como variable a considerar en el pronóstico de velocidades de operación.

Las recomendaciones para utilizar los modelos desarrollados y mejorar el trabajo en futura investigaciones son las siguientes:

- Es necesario utilizar con prudencia las ecuaciones de pronóstico de velocidades en el centro de curvas horizontales localizadas en pendientes uniformes comprendidas entre -4% y -9% y entre 4% y 9%, porque fueron desarrolladas utilizando rangos de radios entre 20 metros y 225 metros y entre 25 y 225 metros respectivamente.
- También se recomienda utilizar prudentemente las ecuaciones de pronóstico de aceleraciones desaceleraciones desarrolladas ya que trabajan en función del radio de la curva y presenta rangos limitados.

6.2 RESUMEN DEL CAPÍTULO

En la fase I de la presente investigación se establecieron las bases de la metodología para la evaluación de la consistencia de diseño geométrico de las carreteras colombianas aplicable en tramos de vías localizadas sobre rectas y curvas horizontales con pendiente uniforme. El resultado de lo anterior consiste en un conjunto de ecuaciones para el pronóstico de velocidades de operación en el centro de curvas horizontales, la determinación de la velocidad deseada en rectas largas y el conjunto de ecuaciones de pronóstico de cambios de velocidades de los vehículos de un elemento geométrico a otro (aceleración y desaceleración).

Se verificó el comportamiento de los modelos internacionales en las condiciones prevalecientes en las vías colombianas, de los cuales solamente una de las ecuaciones de pronóstico de velocidades obtuvo buenos resultados y fue incorporada la metodología final de evaluación de consistencia de diseño geométrica, donde el resto de ecuaciones fueron desarrolladas con la información de campo obtenidas de nuestras carreteras.

7. TOMA Y REDUCCIÓN DE LA INFORMACIÓN PRIMARIA

En este capítulo se describen las actividades realizadas con el propósito de obtener la información necesaria para desarrollar las ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación en curvas verticales localizadas en rectas y en curvas horizontales combinadas con curvas verticales, en función únicamente de la geometría de la vía.

El trabajo de oficina y de campo realizado fue el siguiente:

- Selección, sobre planos, de los sitios donde se medirían velocidades, de acuerdo con los criterios de selección preestablecidos
- Medición de velocidades en los sitios seleccionados
- Reducción de la información de campo y de oficina para desarrollar las ecuaciones de pronóstico de velocidades.

7.1 SELECCIÓN DE LOS SITIOS PARA TOMA DE VELOCIDADES

El desarrollo de la investigación comenzó con la selección de las vías en las cuales se realizaría el trabajo de campo. Inicialmente se escogió el tramo Popayán – Santander de Quilichao, localizado en la vía Popayán – Cali, el cual pertenece a la Troncal de Occidente o carretera Panamericana. Se escogió esta vía porque su topografía y sus especificaciones técnicas se ajustan a los requisitos preestablecidos, así como también por encontrarse cerca del centro de trabajo (Popayán).

Gracias a la gestión del Instituto de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil, ante el Instituto Nacional de Concesiones (INCO), se logró que la concesión Malla Vial del Cauca y Valle del Cauca suministrara a la Universidad del Cauca los planos de diseño geométrico actualizados del tramo seleccionado.

Con el propósito de determinar el número de sitios necesarios para desarrollar las ecuaciones de pronóstico de velocidades para cada combinación geométrica considerada, se diseñó una matriz de trabajo en la cual se organizaron los sitios de acuerdo con su curvatura vertical, dos grupos para las convexas (sin limitaciones en su distancia de visibilidad SLDV y con limitaciones en su distancia de visibilidad CLDV) y un grupo para las cóncavas, mientras que la curvatura horizontal, representada por el radio (R) de las curvas, se agrupó en cinco intervalos acordes con las velocidades de diseño más utilizadas en nuestras carreteras. De esta manera obtenemos curvas verticales combinadas con una amplia gama de curvatura horizontal, con el propósito de realizar un buen análisis estadístico.

El rango de radios abarca valores menores de 100 metros hasta infinito (el radio de una recta se considera infinito). La clasificación de las curvas convexas en CLDV y SLDV depende de la velocidad de diseño de la vía y del valor de K (coeficiente que determina la variación de la longitud por unidad de porcentaje).

En cada grupo de curvas verticales localizadas sobre recta se proyectaron ocho sitios: cinco para obtener cada modelo preliminar y tres para validarlo. Para cada grupo de curvas verticales combinadas con horizontales se proyectaron 17 sitios: 13 para obtener cada modelo preliminar y cuatro para validarlo.

De acuerdo con lo anterior, se obtiene un total de 75 sitios proyectados para realizar las mediciones de velocidades, 24 para curvas verticales sobre rectas y 51 para curvas verticales combinadas con horizontales tal como se presenta en la tabla 2.

El número de sitios seleccionados en el tramo inicialmente elegido (Popayán – Santander de Quilichao) para realizar las mediciones de velocidad fue de 25, menor al número proyectados (75), debido a que debían cumplir con algunos criterios (fuera de poblaciones, sin tercer carril, sin influencia de intersecciones, alejados de peajes, etc).

Para completar la información necesaria se seleccionaron adicionalmente los tramos Mojarras – Piedra Sentada y Piedra Sentada – Timbío, pertenecientes a la carretera Mojarras – Popayán de la Troncal de Occidente, el tramo Piendamó – Silvia, de la carretera Piendamó – Totoró, y la variante Popayán, los cuales reunían los requisitos preestablecidos para la investigación; con esto se logró una cantidad suficiente de sitios (68) para el desarrollo de las ecuaciones de pronóstico y para realizar el proceso de validación.

Una parte de los planos de estos tramos se obtuvo de los archivos del Departamento de Vías y Transporte de la Universidad del Cauca y la otra fue facilitada por la firma Paulo Emilio Bravo.

Todos los sitios seleccionados para realizar la recopilación de los datos de campo están localizados en el departamento del Cauca, a lo largo de 240 kilómetros desde la población de Mojarras, en el sur del departamento, hasta Santander de Quilichao, en el norte, sobre la carretera Panamericana, pasando por la variante Popayán, y desde el municipio de Piendamó hasta Silvia, en el centro del departamento.

De los 68 sitios obtenidos, 54 se usaron para desarrollar las ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación y 14 para su validación. Después de verificar la validez de las ecuaciones se utilizó la información de todos los sitios para el desarrollo de las ecuaciones definitivas e implementar el método de evaluación de consistencia de diseño.

Tabla 2. Matriz de los sitios de estudio

Tipo de curva vertical		Alineamiento horizontal, Rango de radios en metros					
		Recta	3500 – 400	399 - 200	199 - 100	< 100	Total
Convexa	SLDV	8/8/2	3/2/1	4/2/1	5/6/1	5/3/1	25/21/6
	CLDV	8/4/0	3/2/1	4/2/1	5/4/1	5/3/1	25/15/4
Cóncava		8/5/2	3/2/0	4/1/1	5/5/1	5/4/1	25/18/4
Total		24/17/4	9/6/2	12/5/3	15/15/3	15/10/3	75/54/14
SLDV = Sin limitaciones en la distancia de visibilidad CLDV = Con limitaciones en la distancia de visibilidad m/n/o/=Número de los sitios programados/Número de sitios para el desarrollo de ecuaciones /Número de sitios para la validación de las ecuaciones.							

FUENTE: Elaboración propia

En la tabla 2 se muestran separados por barras inclinadas (/) la cantidad de sitios programados inicialmente, la cantidad utilizada en el desarrollo de las ecuaciones de pronóstico y la cantidad utilizada en el proceso de validación. El total de sitios estudiados es la suma de las dos últimas cantidades mencionadas.

A modo de ejemplo de los sitios estudiados, en la figura 3 se observa una curva horizontal combinada con una curva vertical sin limitaciones en su distancia de visibilidad, mientras que en la figura 4 podemos observar una curva cóncava localizada sobre una recta.

Figura 3. Curva horizontal combinada con curva vertical convexa.



Figura 4. Curva cóncava en recta



7.2 SELECCIÓN DE LAS VARIABLES GEOMÉTRICAS UTILIZADAS

En esta fase de la investigación interesaba obtener información de diseño geométrico de curvas verticales localizadas completamente sobre rectas y de curvas horizontales combinadas con curvas verticales, ya que sus elementos geométricos representan las variables independientes para realizar los pronósticos de velocidades.

La información geométrica de los sitios seleccionados se obtuvo de los planos actualizados de las vías. Los planos del tramo Popayán – Santander de Quilichao corresponden al diseño de la última rectificación realizada a su alineamiento y de la construcción del carril de ascenso. De la vía Mojarras - Popayán los planos corresponden a los elaborados para el diseño de la rehabilitación del pavimento.

Para las curvas verticales localizadas sobre rectas la información geométrica recopilada estuvo conformada por la pendiente de entrada (S_1), la pendiente de salida (S_2), la longitud de la curva vertical (L_v) y las abscisas del inicio de la curva (PCV), del punto medio (PIV) y de su final (PTV).

Para las curvas combinadas, además de los datos de las curvas verticales anteriormente mencionados se recopilaron de las curvas horizontales el radio (R), la longitud de curva horizontal (L_H), el ángulo de deflexión (Δ), el peralte (e) y las abscisas del inicio de la curva (PC) y de su final (PT). También se tuvieron en cuenta los anchos del carril y de bermas y se verificó la distancia entre los centros de las curvas horizontal y vertical.

Cabe anotar que los planos correspondientes a la vía Panamericana no presentaban los parámetros del diseño en perfil, lo que obligó a calcularlos gráficamente, originándose un retraso en los trabajos.

En las visitas a campo se verificó visualmente que la información coincidiera con la obtenida en los planos, que no hubiera cambios debido a deformaciones del suelo o a trabajos en la vía, y se observó el estado del pavimento.

El anexo 1, titulado Archivo Maestro, contiene la información geométrica de las curvas encontradas en sitios seleccionados para realizar las mediciones de velocidades.

7.3 RECOLECCIÓN DE VELOCIDADES EN CAMPO

La recolección de las velocidades se realizó en dos etapas, debido a la búsqueda de suficientes sitios que cumplieran con todos los criterios de selección predeterminados para realizar las mediciones.

En la primera etapa se recolectaron los datos destinados para el desarrollo de las ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación, entre los meses de julio y agosto del año 2006. La segunda etapa se realizó entre los meses de octubre y noviembre del año 2007, y consistió en la recolección de los datos faltantes para el desarrollo de las ecuaciones de pronóstico, y de los datos destinados a la validación de dichas ecuaciones.

Para determinar el tamaño de la muestra, el Manual de Diseño Geométrico para Carreteras del Instituto Nacional de Vías de 1998⁸ en el numeral 3.1.3.3, “Tamaño de la muestra de velocidades”, recomienda lo siguiente:

$$n = \left(\frac{KS}{E} \right)^2$$

⁸ MINISTERIO DE TRANSPORTE, Instituto Nacional de Vías. Manual de diseño geométrico para carreteras, Santafé de Bogotá. 1998.

Donde: n = tamaño mínimo de la muestra

K = constante correspondiente al nivel de confiabilidad deseado

S = desviación normal de la muestra de velocidades, (km/h)

E = error normal en la estimación de la velocidad media, (km/h)

Como en los sitios seleccionados no se consiguieron datos de estudios realizados con anterioridad, se siguió la recomendación del Manual de Diseño Geométrico para Carreteras de tomar 8.0 km/h como desviación normal y como error normal permitido 1.5 km/h. Trabajando con un nivel de confiabilidad del 95% obtenemos que el tamaño de la muestra es de 26 vehículos.

Se realizaron 40 observaciones por sitio, aunque en aquéllos en los cuales el tráfico resultó muy bajo se realizaron 25 observaciones. Se le dio prioridad a la medición de velocidades de vehículos tipo automóvil, pero también se registraron velocidades de buses y camiones. Las velocidades fueron obtenidas utilizando radares de mano, los cuales proporcionan de manera inmediata la velocidad puntual a flujo libre de los vehículos.

Los operadores de los radares se posicionaron en un sitio en donde se pudiera ver el punto seleccionado sobre la vía y al mismo tiempo estar disimulados de la vista de los conductores para evitar influenciarlos a realizar un cambio en su velocidad.

Se utilizaron dos radares de mano, Kustom's FALCON, los cuales fueron puestos a disposición en la realización de la investigación por parte de la Universidad del Cauca. Estos dispositivos se chequearon para verificar su correcta lectura utilizando un diapasón que vienen incorporado con el equipo. La prueba consiste en apuntar el radar hacia el diapasón en vibración, con lo cual el equipo debe presentar una lectura de 80 km/h.

En la figura 5 se observa una de las maneras como se localizó el radar durante las mediciones de velocidades.

Figura 5. Ubicación en campo del dispositivo de medición de velocidades



Después de verificar el buen funcionamiento de los dispositivos de lectura de velocidades y la buena disposición del sitio seleccionado, se eligió cuidadosamente el lugar donde se ubicarían las estaciones de toma de datos, como sigue:

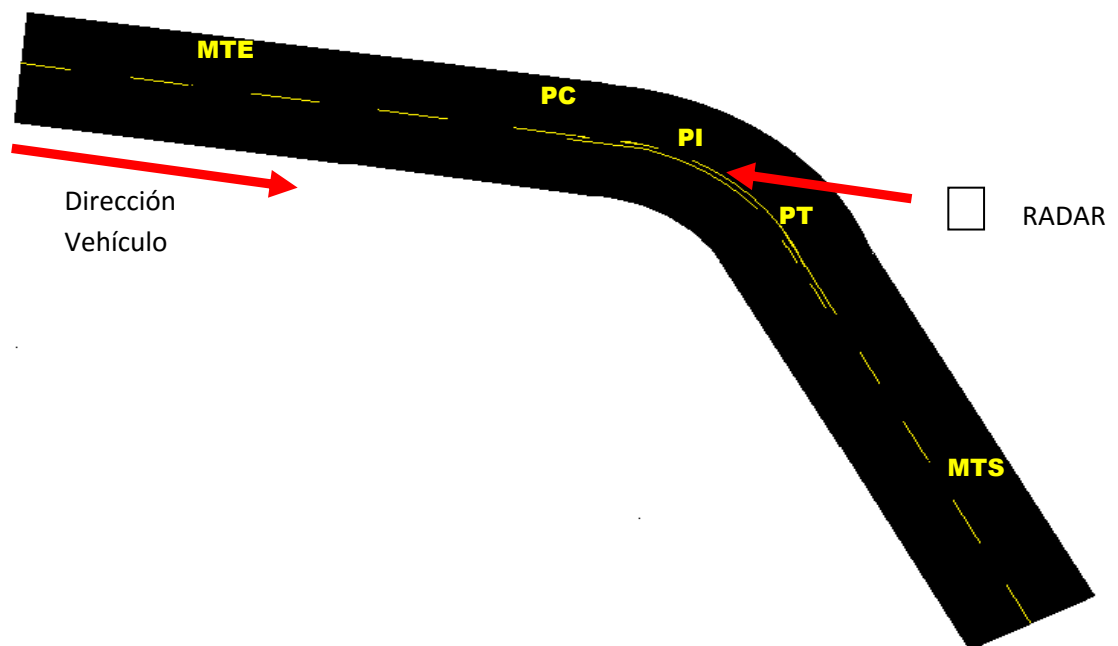
- En los sitios con curvas verticales cóncavas y con convexas sin limitaciones en su distancia de visibilidad, localizadas sobre rectas, se realizaron mediciones de velocidades en dos lugares que fueron el punto medio de la curva y el punto medio de la recta precedente. En curvas convexas con limitaciones en su distancia de visibilidad, localizadas sobre rectas, las mediciones se realizaron

en tres lugares: el punto medio de la curva vertical, el punto de distancia mínima de visibilidad y el punto medio de la recta precedente. El punto de distancia mínima de visibilidad se define como el punto que tiene una elevación de 1.15 metros por debajo del punto máximo de la curva vertical, antes de llegar a su cima, y que corresponde a la altura del ojo del conductor.

- Para las curvas verticales combinadas con curvas horizontales, las mediciones se realizaron en el punto medio de la curva horizontal, en el punto medio de la curva vertical y en el punto medio de la recta precedente.

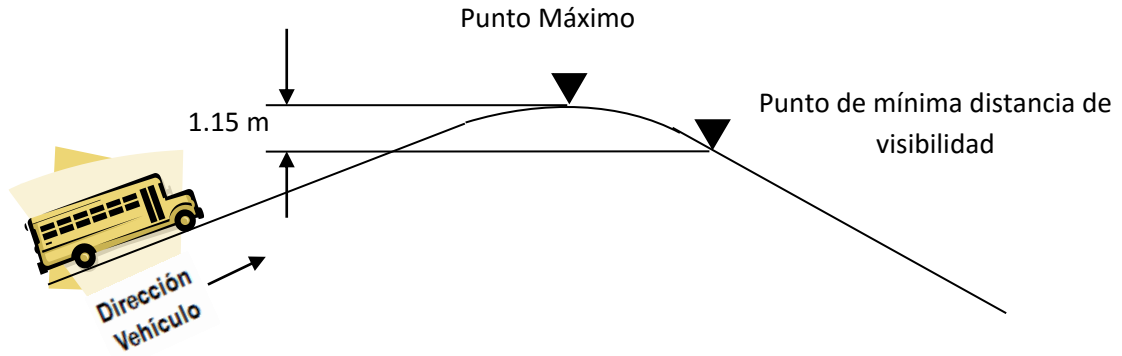
En las figuras 6 y 7 se observan los puntos de toma de velocidades y los lugares donde se instalaron las estaciones de medición de velocidades.

Figura 6. Localización del radar en curvas horizontales



FUENTE: Elaboración propia

Figura 7. Localización puntos dispuestos para medición de velocidades en curvas verticales



FUENTE: Elaboración propia

Para recolectar las velocidades se diseñó un formato de campo que recoge la información general y particular del sitio donde se realizó el aforo, como su ubicación, los datos geométricos del alineamiento de la vía en inmediaciones del sitio, los registros de velocidades y la fecha, nombre del aforador y las observaciones de campo (ver anexo 2).

7.4 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE CAMPO

Los datos de velocidades recopilados en campo fueron revisados para detectar posibles errores en el proceso de entrada, como son los de escritura, de transcripción, el tipo de dato, o datos con valores fuera de lo razonable. Los errores detectados fueron corregidos, o eliminados.

La información recopilada fue sometida a un análisis estadístico, utilizando para ello las herramientas de manejo de datos, macros y funciones estadísticas del programa computacional Excel 2007, el cual hace parte del paquete informático

Microsoft® Office. Los datos estadísticos obtenidos fueron el promedio de velocidad, el percentil 85 de velocidad (V_{85}) y la desviación estándar.

Para calcular el percentil 85 de velocidad, los datos de campo, de cada sitio, fueron ordenados en intervalos de clase para determinar las frecuencias absolutas y relativas, como también las frecuencias absolutas y relativas acumuladas. Después de esto se construyó el polígono de frecuencia, y se calculó el percentil 85 de velocidad realizando la interpolación lineal correspondiente, como se puede observar en la tabla 3 y en la figura 8.

El promedio se calculó utilizando la siguiente fórmula:

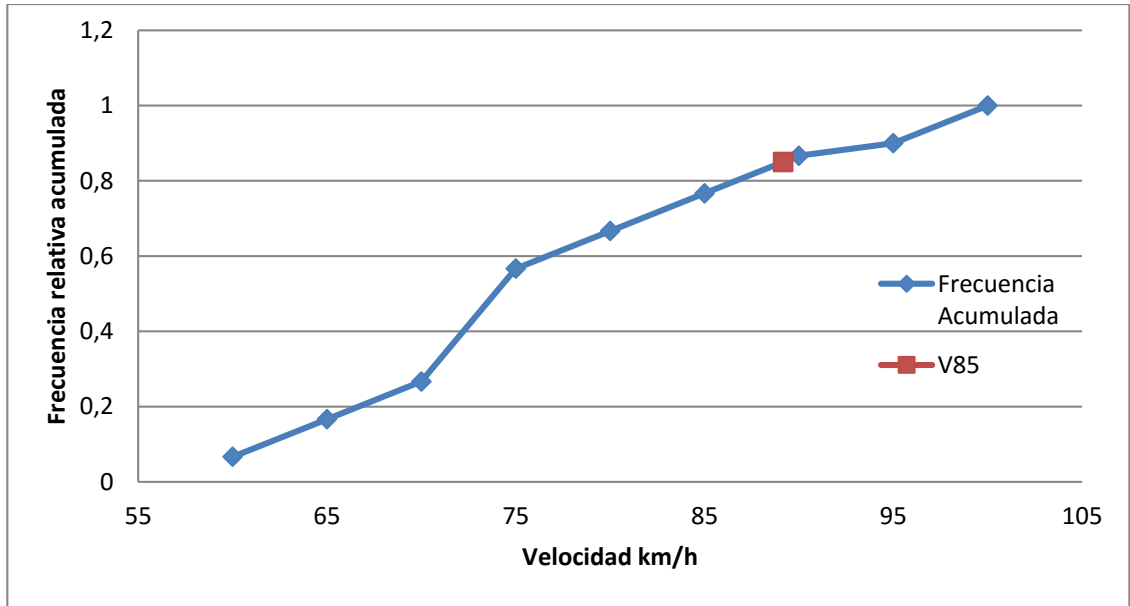
$$\bar{X} = \frac{1}{n} (f_1x_1 + f_2x_2 + \dots + f_px_p)$$

Tabla 3. Cálculo del percentil 85 de velocidades (V_{85})

Límite inferior	Límite superior	Frecuencia	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa acumulada
55	60	2	2	0.0667	0.0667
60	65	3	5	0.1	0.1667
65	70	3	8	0.1	0.2667
70	75	9	17	0.3	0.5667
75	80	3	20	0.1	0.6667
80	85	3	23	0.1	0.7667
85	90	3	26	0.1	0.8667
90	95	1	27	0.0333	0.9
95	100	3	30	0.1	1
Percentil 85 = 89.1667 km/h					

FUENTE: Elaboración propia

Figura 8. Polígono de frecuencias acumuladas, llamada también ojiva.



La desviación estándar se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$\sigma(X) = \sqrt{\frac{1}{n-1} (f_1(x_1 - \bar{X})^2 + f_2(x_2 - \bar{X})^2 + \dots + f_p(x_p - \bar{X})^2)}$$

Posteriormente los datos de velocidades y sus estadísticos fueron adicionados al archivo maestro (anexo 1) y organizados junto a sus respectivas características geométricas y al sitio correspondientemente identificado.

7.5 RESUMEN DEL CAPÍTULO

El desarrollo de la presente investigación dependía principalmente de las fuentes de información disponibles, de las cuales se pudieran obtener los diseños geométricos de las carreteras seleccionadas y que sus elementos en planta y en perfil cumplieran con los requerimientos preestablecidos por los investigadores en la metodología. Después de definir los corredores viales, se seleccionaron los sitios de trabajo, de acuerdo con sus características geométricas, las cuales fueron verificadas en campo.

El siguiente paso consistió en la realización de las mediciones de velocidades puntuales a flujo libre. Teniendo recopilados los registros de velocidades se revisaron cuidadosamente, se organizaron y se procesaron para obtener los estadísticos necesarios. Por último, con los datos geométricos de los sitios de trabajo y con los datos de velocidades procesados se armó un archivo maestro (anexo 1) para organizar la información y tenerla a la mano al momento de realizar las actividades siguientes.

8. VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES DE PRONÓSTICO DE VELOCIDADES DE OPERACIÓN DEL MÓDULO DE CONSISTENCIA DE DISEÑO DEL IHSDM

En este capítulo se presenta el proceso de validación realizado a las ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación, correspondientes a curvas verticales en rectas y curvas horizontales combinadas con verticales, que forman parte del módulo de consistencia de diseño geométrico del programa computacional IHSDM (Interactive Highways Safety Design Model) y que se resumen en la tabla N° 4. Estas ecuaciones permiten calcular el percentil 85 de velocidad en el punto medio de la curva horizontal combinada con una vertical y en el punto medio de la curva vertical en recta.

Para validar las ecuaciones se emplearon todos los datos de velocidad de operación contenidos en el archivo maestro (anexo 1), los cuales también se utilizaron posteriormente en el desarrollo y validación de las ecuaciones objeto de esta investigación.

El proceso de validación de las ecuaciones del IHSDM permitió decidir si pueden ser utilizadas convenientemente en el desarrollo de la metodología de consistencia de diseño para las carreteras colombianas. Las ecuaciones que aprobaron el proceso de validación se compararon luego con las ecuaciones desarrolladas en la presente investigación, y de acuerdo con los estadísticos obtenidos se eligió la más conveniente para desarrollar la metodología definitiva.

Tabla 4. Ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación del IHSDM

Ec. N°	Condición de alineamiento	Ecuación de pronóstico de velocidad de operación (autos)	N	R ²	MSE
1	Curva horizontal combinada con curva vertical cóncava	$V_{85} = 105.32 - \frac{3438.19}{R}$	25	0.92	10.47
2	Curva horizontal combinada con curva vertical convexa con limitaciones en su distancia de visibilidad	$V_{85} = 103.24 - \frac{3576.51}{R}$	22	0.74	20.06
3	Curva vertical convexa en recta, con limitaciones en su distancia de visibilidad.	$V_{85} = 105.08 - \frac{149.69}{K}$	9	0.60	31.10

Donde:

V_{85} = Percentil 85 de velocidad de los vehículos tipo auto

K = Coeficiente que determina la variación de la longitud de curva vertical por unidad de porcentaje.

N = Número de observaciones

MSE = Error medio cuadrático

R² = Coeficiente de determinación múltiple

FUENTE: K. Fitzpatrick, L Elefteriadou, et al. *Speed Prediction for Two-Lane Rural Highways*. Final Report FHWA – RD – 99 – 171. Junio de 1999

La tabla 5 contiene los rangos de las principales variables geométricas utilizadas en el desarrollo de las ecuaciones definitivas de pronóstico de velocidades de operación realizado por la FHWA.

Tabla 5. Rangos de las principales variables utilizadas en las ecuaciones de pronóstico de velocidades del IHSDM

Parámetro	Ec. N° 1	Ec. N° 2	Ec. N° 3
Sitios	25	22	9
Radio (m). Rango	87 – 1747	125 – 1164	N/A
Curva cóncava (m). Rango	42 – 244	N/A	N/A
Curva convexa con limitaciones en su distancia de visibilidad (m). Rango	N/A	61 – 426	61 – 290
V ₈₅ (km/h). Rango	62 – 103	78 – 103	83 – 115
N/A = No aplica			

FUENTE: K. Fitzpatrick, L Elefteriadou, et al. *Speed Prediction for Two-Lane Rural Highways*. Final Report FHWA – RD – 99 – 171. Junio de 1999

En la tabla 6 se aprecian las estadísticas descriptivas de los sitios utilizados para las mediciones de velocidades en las carreteras colombianas, los cuales se utilizarán inicialmente en la validación de las ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación del IHSDM.

El procedimiento de validación seguido para cada una de las ecuaciones analizadas es el mismo utilizado por la FHWA en sus estudios de consistencia de diseño y tomada de la publicación *Speed Prediction for Two-Lane Rural Highways*⁹.

⁹ FITZPATRICK, K. et al. Op. Cit. p. 134-147

Tabla 6. Estadísticas descriptivas para los sitios seleccionados en Colombia.

Parámetro	EC. N° 1	EC. N° 2	EC. N° 3
Sitios	15	15	4
Radio (m). Rango	33.6 – 892	59 – 885.26	N/A
Radio (m). Promedio	206.59	257.51	
Radio (m). Desviación Estándar	232.16	259.12	
Curva cóncava (m). Rango	10 – 400	N/A	N/A
Longitud (m). Promedio	122.67		
Longitud (m). Desviación Estándar	96.40		
Curva convexa con limitaciones en su dist. de visib. (m). Rango	N/A	30 – 240	40 – 240
Longitud (m). Promedio		85.33	142.50
Longitud(m) . Desviación Estándar		62.09	82.61
V ₈₅ (km/h). Rango	46.25 – 97	55 – 91.5	72.42 – 97.50
V ₈₅ (km/h). Promedio	74.79	75.65	86.05
V ₈₅ (km/h). Desviación Estándar	15.39	13.16	10.75

FUENTE: Elaboración propia

Los pasos que conforman el procedimiento son los siguientes:

- Calcular las velocidades de operación (V_{85}) utilizando las ecuaciones a validar con la geometría de cada uno de los sitios seleccionados y compararlas gráficamente con los respectivos valores del percentil 85 de las velocidades medidas.
- Calcular el error medio cuadrático (MSE), el promedio del valor absoluto de la diferencia (MAE) y el promedio porcentual del valor absoluto de la diferencia (MAPE) del total de los sitios y separadamente para cada una de las

ecuaciones de pronóstico de velocidad; a continuación se definen estos estadísticos:

Error Medio Cuadrático:

$$MSE = (Varianza - Cuadrado del sesgo)$$

Promedio del valor absoluto de la diferencia:

$$MAE = Promedio |Observado - Pronosticado|$$

Promedio porcentual del valor absoluto de la diferencia:

$$MAPE = Promedio \left| \frac{Observado - Pronosticado}{Pronosticado} \right| * 100\%$$

Estos estadísticos se utilizan para evaluar la discrepancia entre las velocidades arrojadas por las ecuaciones de pronóstico del IHSDM y los percentiles 85 de las velocidades medidas en campo.

- Adicional a los estadísticos calculados anteriormente se realizaron pruebas Chi-Cuadrado a las ecuaciones, para determinar estadísticamente si los datos medidos en Colombia se ajustan a las ecuaciones del IHSDM. Para ello el estadístico chi cuadrado se calcula de la siguiente manera:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\text{Observado}_i - \text{Pronosticado}_i)^2}{\text{Pronosticado}_i}$$

Posteriormente se compara con un valor Chi-cuadrado crítico de la tabla estandarizada. Si este último resulta mayor, significa que existe una diferencia significativa entre los valores de campo y los calculados con las ecuaciones de pronóstico del IHSDM y se concluye que el modelo no es válido para ser utilizado en nuestro país.

- Realizar los diagramas de caja del promedio del valor absoluto de la diferencia (MAE) del total de sitios seleccionados. Adicionalmente, se dibujarán diagramas de caja de este mismo tipo para las ecuaciones individuales.

Estos diagramas se presentan para ilustrar las diferencias en la distribución de los estadísticos entre los valores observados y los valores calculados con las ecuaciones de pronóstico del IHSDM.

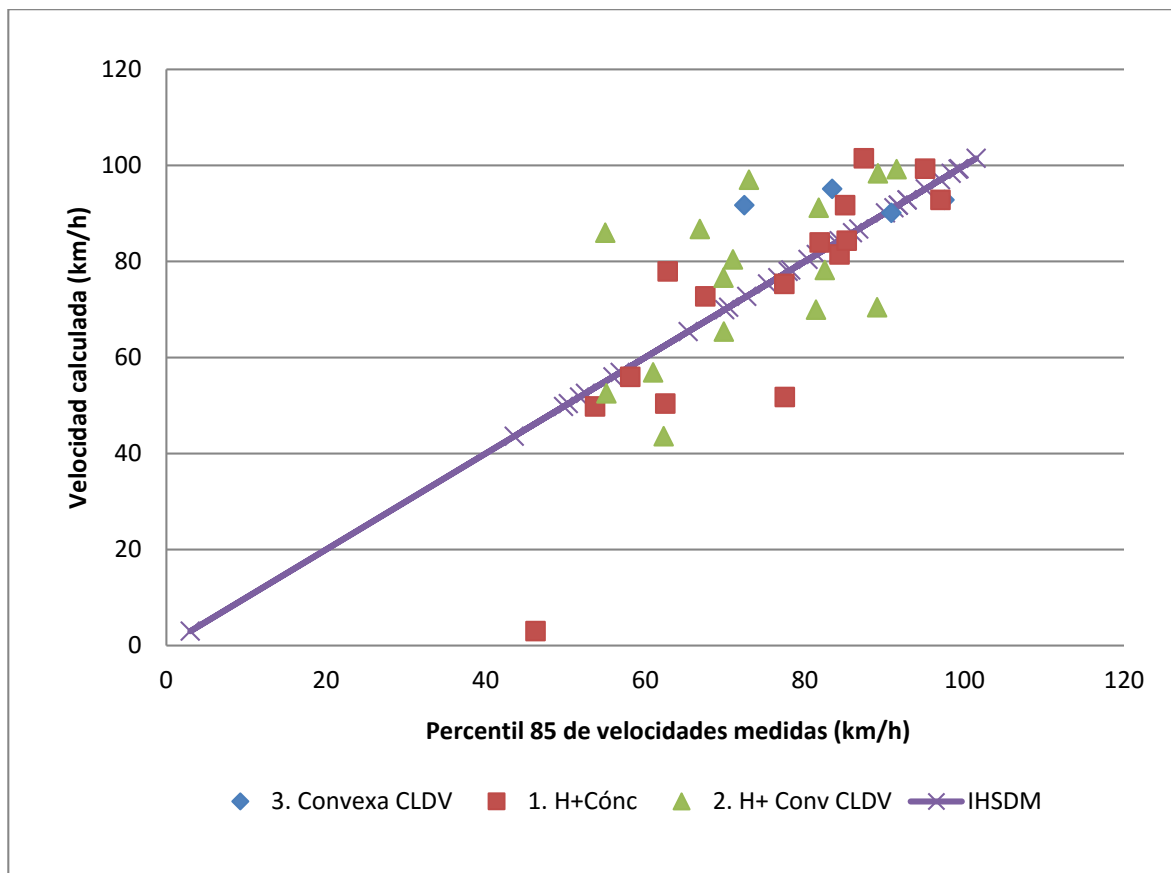
Un diagrama de caja consiste en un rectángulo con una línea en trazo grueso paralela a sus lados superior e inferior, líneas perpendiculares que parten hacia afuera del centro de los lados superior e inferior del rectángulo y puntos ubicados por fuera de estas líneas y que siguen la dirección de las mismas.

La línea sólida dentro del rectángulo representa a la mediana de la distribución de velocidades calculadas por la ecuación de pronóstico analizada; los lados superior e inferior del rectángulo al tercer y al primer cuartil respectivamente, los extremos exteriores de las líneas perpendiculares representan al valor mínimo y máximo establecidos para realizar comparaciones, y los puntos son valores que se encuentran por fuera de los límites mencionados y que usualmente se representan mediante asteriscos.

8.1 VELOCIDADES PRONOSTICADAS VS PERCENTIL 85 DE VELOCIDADES OBSERVADAS

Se realizó un gráfico de las velocidades calculadas con las ecuaciones de pronóstico del IHSDM contra los percentiles (V_{85}) de las velocidades observadas en campo en el centro de las curvas, que se puede observar en la figura 9. Se utilizaron símbolos de diferentes colores y formas para identificar las velocidades para cada combinación de elementos geométricos.

Figura 9. Velocidad calculada Vs percentil V_{85} de velocidad medida en el centro de las curvas



Para la ecuación N°1 (curva vertical cóncava sobre curva horizontal – H+Cónc) podemos observar un valor bastante alejado de la diagonal, debido a que el valor del radio utilizado para calcular la velocidad pronosticada está por fuera del rango de trabajo de la ecuación (33.6 metros). Para la ecuación N°2 (curva vertical convexa con limitaciones en distancia de visibilidad sobre curva horizontal – H+Conv CLDV), la mayoría de los puntos se encuentran cercanos a la línea diagonal. Para la ecuación N°3 (curva vertical convexa con limitaciones en distancia de visibilidad sobre rectas – Convexa CLDV), aunque se tienen pocos puntos para comparar, se pudo observar que solamente uno de ellos se aleja un poco de la línea diagonal.

8.2 ESTADÍSTICOS DE LAS ECUACIONES DE PRONÓSTICO DE VELOCIDADES

Los resultados obtenidos en el proceso de validación para determinar el ajuste de los valores de campo a los valores calculados con las ecuaciones de IHSDM se resumen en la tabla 7. Los estadísticos utilizados fueron el error medio cuadrático (MSE), el promedio del valor absoluto de la diferencia (MAE) y el promedio del valor absoluto de la diferencia porcentual (MAPE), para cada una de las ecuaciones, calculados separadamente, y para el total de los valores calculados por estas ecuaciones.

Tabla 7. Estadísticos de las ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación de IHSDM

	Todos los datos	Ec. N° 1	Ec. N° 2	Ec. N° 3
Número de Sitios	34	15	15	4
MSE	205.07	216.84	212.6	132.79
MAE	10.67	9.65	12.11	9.10
MAPE	55.25	106.49	16.13	9.79
χ^2 Calculado	694.98	647.65	41.60	5.74
χ^2 Crítico	48.60	25.00	25.00	9.49

FUENTE: Elaboración propia

Los estadísticos en dicha tabla indican que los datos obtenidos en nuestras carreteras no se ajustan a las ecuaciones, debido a que algunos datos presentan diferencias muy grandes con los valores obtenidos de las ecuaciones de pronóstico de velocidades de IHSDM, como se aprecia en la figura 9.

Los valores de la prueba de chi-cuadrado de las ecuaciones N° 1 y N° 2 son muy altos comparados con sus valores críticos, lo cual las descarta para considerarlas en el pronóstico de velocidades de operación de nuestras carreteras y por ende en el desarrollo de la metodología.

Para la ecuación N°1 encontramos una curva con radio por debajo del rango de trabajo, que genera una velocidad muy baja (2.99 km/h), por lo tanto no se tendrá en cuenta para la validación.

Para la ecuación N°2 encontramos un sitio localizado en una zona de la vía que presenta una alta tortuosidad y curvas horizontales consecutivas con rectas pequeñas y a veces nulas, donde se observó una velocidad muy baja, que genera

una diferencia de 30 km/h con la velocidad pronosticada; este sitio tampoco se consideró en la validación.

La ecuación N°3 presentó estadísticos favorables, por lo cual se la puede considerar en el desarrollo de una metodología de evaluación de diseño geométrico de carreteras en Colombia, a pesar de contar con el menor número de datos para la validación.

En la figura 10 se muestra el diagrama de caja del valor absoluto de la diferencia (MAE) de las velocidades de pronóstico y de las observadas en campo, para la totalidad de datos utilizados en las ecuaciones validadas, donde podemos observar valores superiores a 30 km/h. También se realizaron diagramas de caja para cada una de las ecuaciones validadas, con el fin de comparar los datos de campo con los pronosticados, como se puede muestra en la figura 11.

Figura 10. Diagrama de caja del valor absoluto de la diferencia de las velocidades observadas y las pronosticadas con las ecuaciones de IHSDM con todos los datos

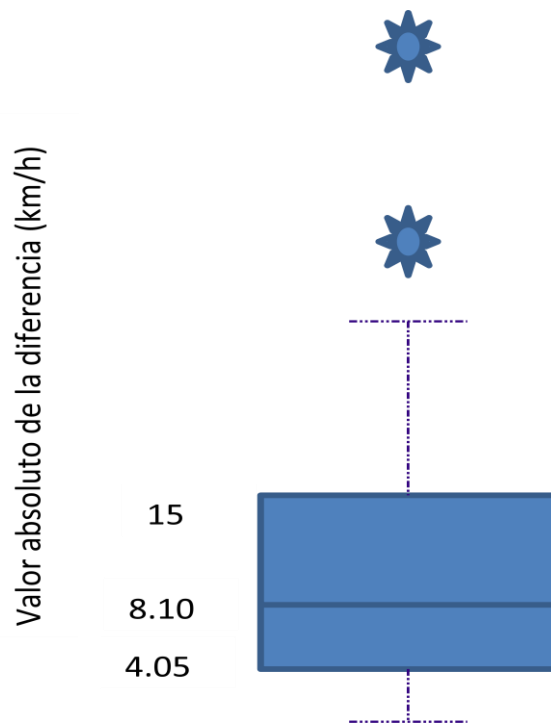
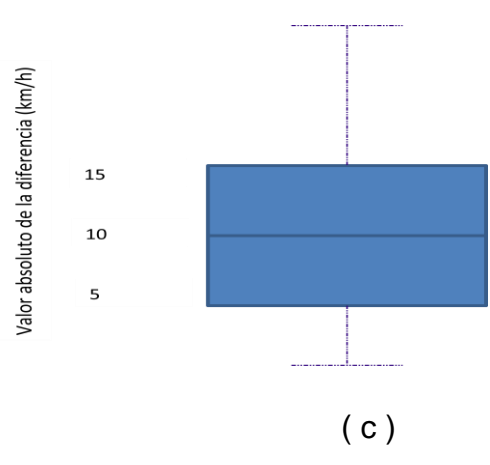
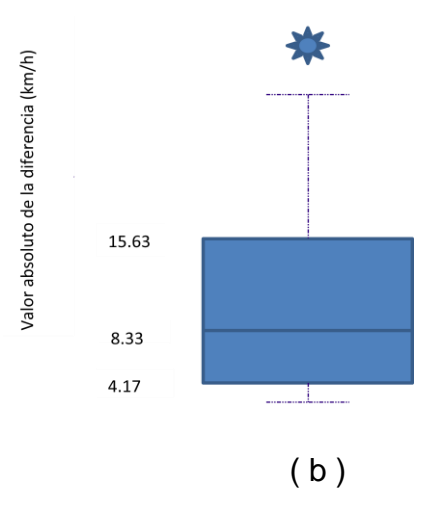
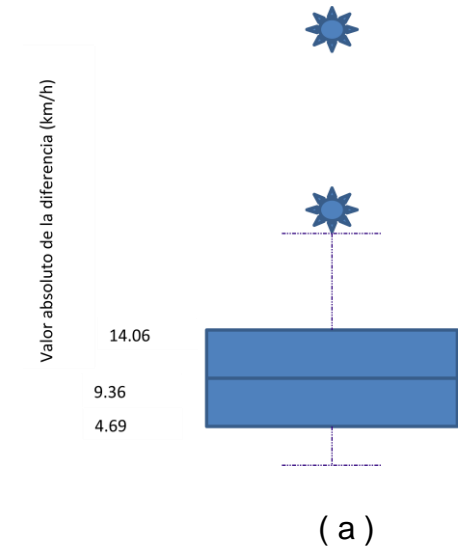


Figura 11. Diagramas de caja del valor absoluto de la diferencia de las velocidades observadas y las pronosticadas con cada una de las ecuaciones de IHSDM



En la figura 10 podemos observar dos puntos que se encuentran por fuera de los límites del diagrama de caja, correspondientes a los que presentan diferencias mayores de 30 km/h, como se evidenció al analizar los valores de los estadísticos utilizados en la validación.

En la figura 11 se puede observar que los puntos mencionados anteriormente sobresalen de los límites para realizar los cálculos de validación. Adicionalmente, en la figura (a) observamos otro punto con diferencia mayor de 25 km/h, mientras que en la ecuación se detectó otro con una diferencia superior a 20 km/h.

Los dos puntos anteriormente indicados no se consideraron en el proceso de validación y se les hizo un seguimiento particular en desarrollo de las ecuaciones.

Realizado nuevamente el proceso de validación, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 8. Estadísticas de las ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación del IHSDM

	Todos los datos	Ec. N° 1	Ec. N° 2	Ec. N° 3
Número de Sitios	31	13	13	4
MSE	96.79	55.32	127.20	132.79
MAE	7.96	5.83	9.75	9.10
MAPE	10.76	7.87	13.93	9.79
χ^2 Calculado	39.89	9.66	24.50	5.74
χ^2 Crítico	43.77	22.36	22.36	9.49

FUENTE: Elaboración propia

Puede observarse que eliminando los puntos que presentan diferencias superiores a 20 km/h (3 puntos) se obtienen estadísticos favorables para la validación de las ecuaciones.

Aunque la ecuación N° 2 no pasó favorablemente la prueba de chi- cuadrado, es necesario realizar un análisis más detallado antes de descartarla definitivamente, ya que en la figura 9 muestra un ajuste razonable y, por lo tanto, se debería detectar cuáles son los puntos que están causando un alto valor del MSE y de chi cuadrado.

En el anexo 3 se recopilan los cálculos de validación detalladamente con sus respectivas gráficas y diagramas.

8.3 RESUMEN DEL CAPÍTULO

Con el propósito de utilizar el módulo de evaluación de consistencia de diseño del programa computacional IHSDM en estudios de seguridad vial y de diseño en carreteras colombianas, se realizó un proceso de validación de sus ecuaciones de pronóstico de velocidades. La validación se realizó comparando los datos calculados mediante las ecuaciones mencionadas con los observados en nuestras carreteras, y aplicando las pruebas estadísticas apropiadas para este fin.

Del análisis gráfico se obtuvo que los datos medidos se ajustaron favorablemente a las ecuaciones del IHSDM, pero que algunos valores presentaron diferencias notables, las cuales ocasionaron un resultado negativo en los estadísticos de prueba. Sin embargo, analizando detalladamente los datos, tanto los de campo como los calculados, y eliminando aquellos puntos atípicos, se obtuvieron mejores resultados.

De acuerdo con lo anterior, se puede concluir que las ecuaciones de IHSDM pueden ser utilizadas, bajo ciertas restricciones (radios y valores de K), para evaluar la consistencia del diseño de carreteras en Colombia.

9. ECUACIONES PRELIMINARES PARA PRONOSTICAR VELOCIDADES DE OPERACIÓN

El presente capítulo contiene los análisis de regresión al conjunto de mediciones realizadas, es decir al percentil 85 de las velocidades registradas en campo, para obtener las ecuaciones preliminares para pronosticar las velocidades de operación.

Estas ecuaciones preliminares se sometieron a un proceso de validación, para obtener las ecuaciones definitivas con las que se elaboran los perfiles de velocidades de operación, en los cuales se basa la metodología de evaluación de diseño geométrico desarrollada.

Se siguió la misma metodología para realizar el análisis estadístico utilizada por la FHWA en la obtención de las ecuaciones de pronóstico de velocidades del módulo de consistencia de diseño geométrico del IHSDM¹⁰ y que se describe a continuación.

Para obtener las ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación en los sitios seleccionadas se tuvieron en cuenta tres diferentes maneras de considerar los efectos de sus características geométricas sobre la velocidad esperada, los cuales son:

- Los efectos de las curvaturas son independientes, lineales y pueden sumarse, por ejemplo:

$$V_{85} = \beta_0 + \beta_1(E.H) + \beta_2(E.V)$$

¹⁰ FITZPATRICK, K. et al. Op. Cit. p. 41-62

En este caso ambas curvaturas influyen en el pronóstico de velocidades de operación, pero no hay interacción entre ellas, y la velocidad resultante es igual a la suma de sus efectos separados. En la ecuación resultante del análisis de regresión no se presenta el término de interacción entre planta y perfil.

- El efecto de la curvatura vertical depende del efecto de la curvatura horizontal y viceversa, es decir que hay interacción entre ellas, y de hecho la velocidad depende de las dos curvaturas del alineamiento. Por ejemplo:

$$V_{85} = \beta_0 + \beta_1(E.H) + \beta_2(E.V) + \beta_3(E.H)(E.V)$$

La ecuación resultante del análisis de regresión muestra un término de interacción de las variables geométricas en perfil y en planta de los alineamientos. Este caso también puede estar representado en varias ecuaciones para diferentes condiciones de curvatura vertical, pero sólo presenta variables de la curvatura horizontal, o viceversa.

- En el tercer caso se considera que solamente una de las curvaturas del alineamiento tiene efecto en la velocidad de operación pronosticada, mientras que el efecto de la otra curvatura puede despreciarse. Este caso se presenta cuando una de las curvaturas es mucho mayor que la otra y controla en la combinación de curvaturas. En esta situación se pueden presentar dos ecuaciones, una para cada curvatura, pero se utiliza la que se considere más influyente de la combinación, por ejemplo:

$$V_{85} = \beta_0 + \beta_1(E.H)$$

La curva horizontal es la que influye en el pronóstico de la velocidad de operación si el efecto de la curva vertical es despreciable.

$$V_{85} = \beta_0 + \beta_1(E.V)$$

La curva vertical es la que influye en el pronóstico de la velocidad de operación si el efecto de la curva horizontal es despreciable.

Donde:

E.H = Valor del elemento horizontal que se considera influyente en la magnitud de la velocidad de operación (V85).

E.V = Valor del elemento vertical que se considera influyente en la magnitud de la velocidad de operación (V85).

β_0 = Término independiente

$\beta_1, \beta_2, \beta_3 \dots, \beta_k$ = Coeficientes de las variables de regresión seleccionadas (E.H y E.V)

Los datos de velocidades y de geometría de las curvas estudiadas se sometieron a análisis de regresión teniendo en cuenta las diferentes maneras de considerar los efectos de las curvaturas en el pronóstico de las velocidades, de acuerdo con lo anteriormente mencionado.

El análisis de regresión consiste en determinar los coeficientes de las variables regresoras seleccionadas ($\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$, incluyendo el término independiente), en este caso variables geométricas, de las ecuaciones de pronóstico buscadas. Para determinar si los coeficientes son útiles en el funcionamiento del modelo o ecuación de pronóstico, se realiza una prueba de hipótesis o prueba de significación al modelo resultante de la regresión, para verificar la relación lineal entre las variables regresoras y la variable de respuesta.

La hipótesis nula (h_0), la que se desea verificar, declara que todos los coeficientes son iguales a cero, mientras que la hipótesis alterna (h_1) manifiesta que por lo menos un coeficiente es diferente de cero. Del análisis de regresión se obtiene un valor p; si este valor es mayor a un estadístico de prueba, (que se calcula a partir del grado de significación α con que se desea trabajar y contra el cual se compara) se interpreta que al menos una de las variables regresoras contribuye de manera significativa al modelo y se rechaza a la hipótesis nula.

Se realizaron gráficos de los percentiles 85 de las velocidades obtenidas de campo contra las variables más prometedoras de ajuste, para verificar que tuvieran una distribución continua, detectar datos atípicos y observar si existía correlación múltiple entre las variables seleccionadas.

Para determinar las variables regresoras definitivas utilizadas en las ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación, se utilizó el procedimiento de *todas las regresiones*, el cual consiste en analizar todas las combinaciones de las variables seleccionadas y después, de acuerdo con unos criterios predefinidos, se escoge el modelo más adecuado.

Los criterios para evaluar al conjunto de variables más favorables en el desarrollo de las ecuaciones de pronóstico son los siguientes:

- Coeficiente de determinación múltiple: Un alto valor de este coeficiente (R^2) significa que el modelo de regresión presenta un buen ajuste con los datos observados, pero se debe interpretar con cautela debido a que su valor crece cuando se aumenta el número de variables regresoras. Un valor de 0.8 indica que la regresión es buena.
- Estadístico C_p : Es una medida del cuadrado medio del error total. Si el modelo tiene p términos y si además se ajusta a la distribución de datos, el valor del C_p es un mínimo y muy cercano al valor de p ($C_p \approx p$).
- Error medio cuadrático MSE: Su valor decrece al aumentar el número de variables regresoras hasta llegar a un mínimo a partir del cual vuelve a crecer. Se elegirán el grupo de variables regresoras cuyo MSE sea un mínimo.
- Coeficiente de determinación múltiple ajustado (R_a^2): El valor de este coeficiente crece al presentarse un ajuste adecuado del modelo, hasta llegar a un máximo. Se debe elegir el grupo de variables regresoras que presente el

máximo (R_a^2). Este coeficiente tiene la ventaja que no es afectado por el aumento del número de variables regresoras en el modelo.

La ecuación con el conjunto de variables regresoras que cumpliera con el mayor número de criterios anteriormente mencionados fue seleccionada, al considerar que presenta el mejor ajuste con los datos observados.

Cada una de las ecuaciones elegidas, a partir de los criterios de selección, se sometió a una prueba de significancia para asegurar que todos los coeficientes de las variables regresoras sean diferentes de cero. Esto se realiza con el propósito de verificar que cada una de las variables contribuya de manera considerable a la variable de respuesta. La hipótesis nula declara que cada coeficiente de la ecuación es igual a cero.

Para determinar si hay variables regresoras que presenten correlación múltiple, se calcula el factor de inflación de la varianza (VIF). Entre mayor sea su valor más marcada será la colinealidad múltiple. Se considera que si el VIF excede el valor de 10, existen problemas de colinealidad.

Aunque ninguna medida puede determinar si una observación es influyente o atípica, se utilizó la distancia de Cook (D) para detectar valores alejados de la zona de concentración de los datos observados. Sin embargo, para decidir la eliminación de un dato observado del archivo maestro de la investigación es necesario realizar una revisión particular y detallada a dicho punto y verificar si realmente es un dato influyente. Un dato con un valor de D mayor que 1 se considera que es influyente.

Para finalizar, se realizó un análisis de residuales, en el cual se consideraron los residuales estudentizados los cuales se calculan con los residuales divididos por un factor obtenido a partir de los valores de la diagonal de la matriz de sombrero (**H**), el cual permite aproximar la desviación estándar de los residuales a la unidad.

Por consiguiente permiten evidenciar con mayor facilidad posibles puntos atípicos o valores inusuales.

Las principales variables utilizadas para realizar el análisis de regresión y obtener las ecuaciones de pronóstico de velocidad de operación, se organizaron en la tabla 9. Además de utilizar estas variables, también se consideraron en el análisis las transformaciones de algunas de ellas (por ejemplo, $1/R$, $1/K$, etc.).

Las variables de trabajo serán aquellas que cumplan con el mayor número de criterios de aceptación.

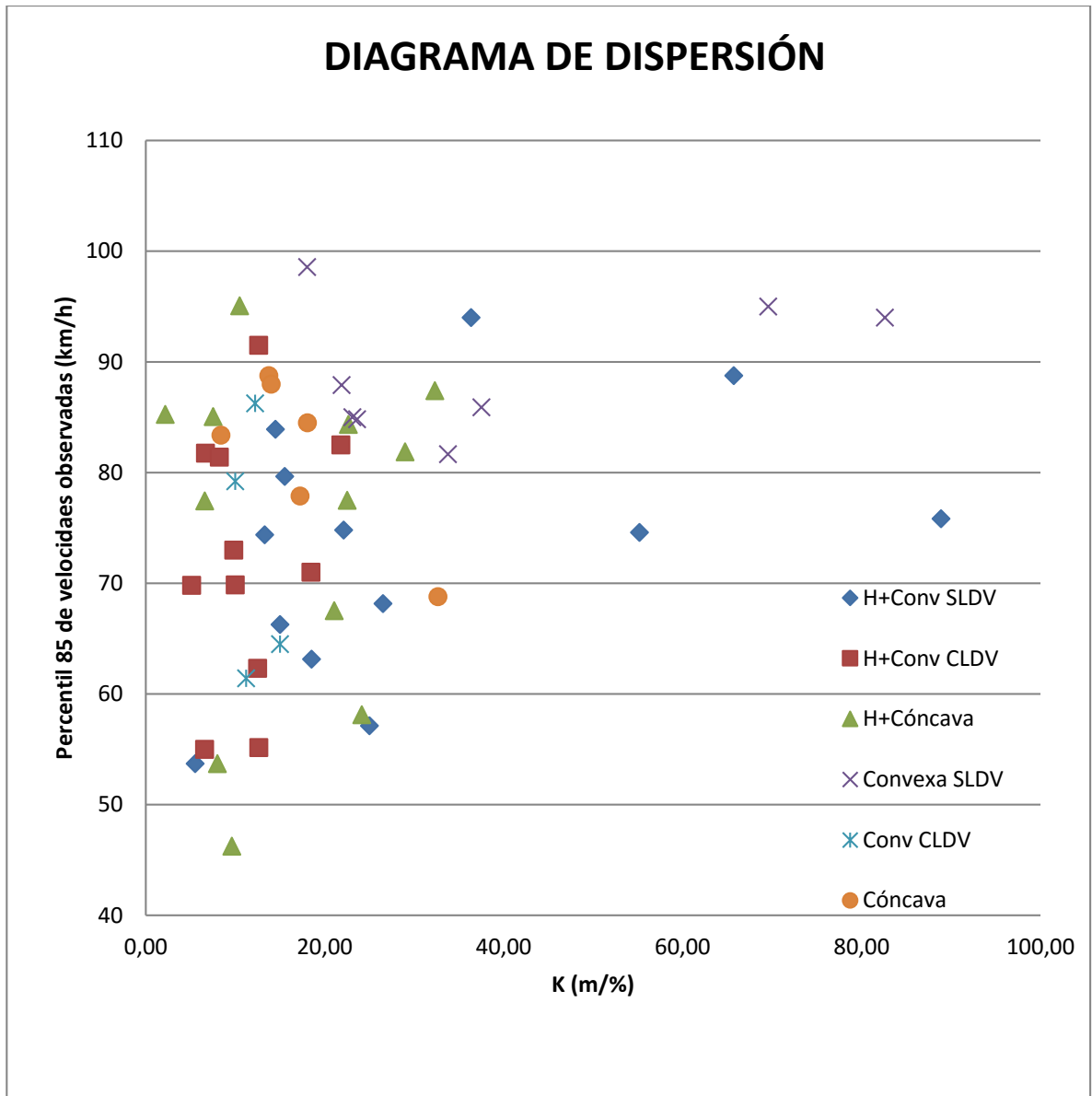
Tabla 9. Variables independientes para estimar los modelos de pronóstico de velocidades de operación (V_{85})

N°	Condición de alineamiento	Variables seleccionadas	No. sitios
1	Curva vertical convexa	K, L_v	12
2	Curva vertical cóncava	K, L_v	6
3	Curva horizontal combinada con curva vertical convexa	R, L_H , K, L_v	24
4	Curva horizontal combinada con curva vertical cóncava	R, L_H , K, L_v	12

FUENTE: Elaboración propia

En la figura 12 se presenta el conjunto de observaciones agrupadas de acuerdo con la clasificación de curvas realizadas en la fase preliminar, en la matriz de los sitios de estudio (tabla 2).

Figura 12. Percentil 85 de velocidades observadas Vs K



FUENTE: Elaboración propia

En dicha figura no se observa una tendencia marcada de la variable K (coeficiente que determina la variación de la longitud de curva vertical por unidad de porcentaje), pero sí que las mayores velocidades de operación las encontramos en las curvas verticales convexas sin limitaciones en su distancia de visibilidad y en las curvas verticales cóncavas, ambas en tramos rectos.

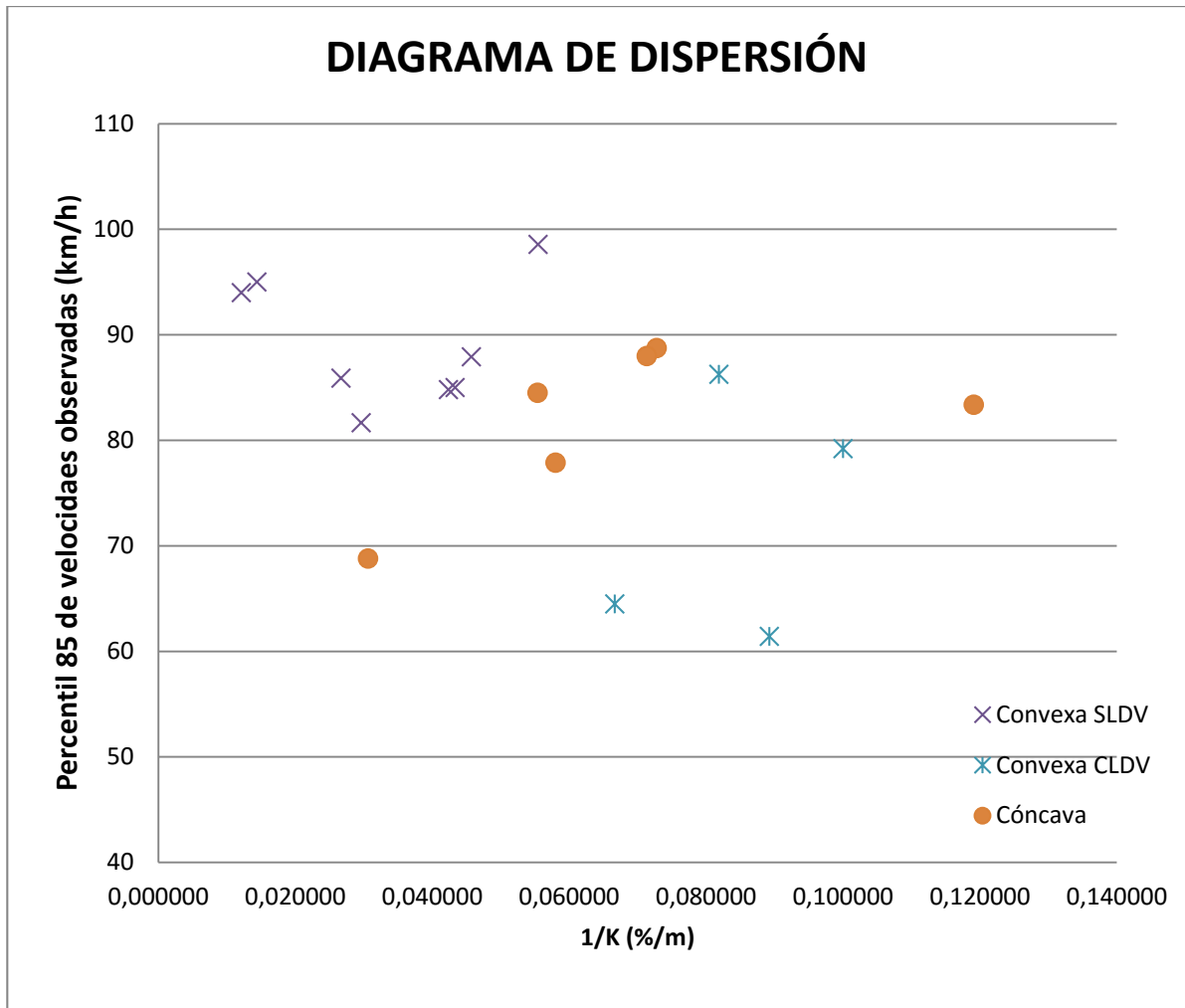
Debido a lo anterior, la información se dividió en dos grupos de trabajo: curvas verticales sobre rectas y curvas verticales sobre curvas horizontales. Estos grupos a su vez se subdividieron, de acuerdo a los resultados del análisis de regresión, considerando sus distancias de visibilidad.

9.1 CURVAS VERTICALES EN RECTAS HORIZONTALES

Las principales variables que se encuentran en el diseño geométrico de curvas verticales son las pendientes longitudinales de entrada (i_1) y de salida (i_2), la diferencia algebraica de las pendientes (i), la longitud horizontal de la curva vertical (L_v) y el coeficiente que determina la variación de la longitud de curva vertical por unidad de porcentaje (K). El grupo de variables que se utilizaron para el análisis de regresión fueron el inverso de K y la longitud L_v , debido a que las variables restantes presentan correlación múltiple con éstas, y también por ser las más utilizadas en los diferentes estudios de ingeniería vial.

En la figura 13 se puede apreciar que para las curvas verticales convexas existe una tendencia entre la velocidad de operación observada y el inverso de K , la cual consiste en que al aumentar el valor del inverso de K el valor de la velocidad disminuye. Lo contrario puede observarse para las curvas cóncavas: al aumentar el valor del inverso de K , la velocidad de operación presenta una tendencia a crecer.

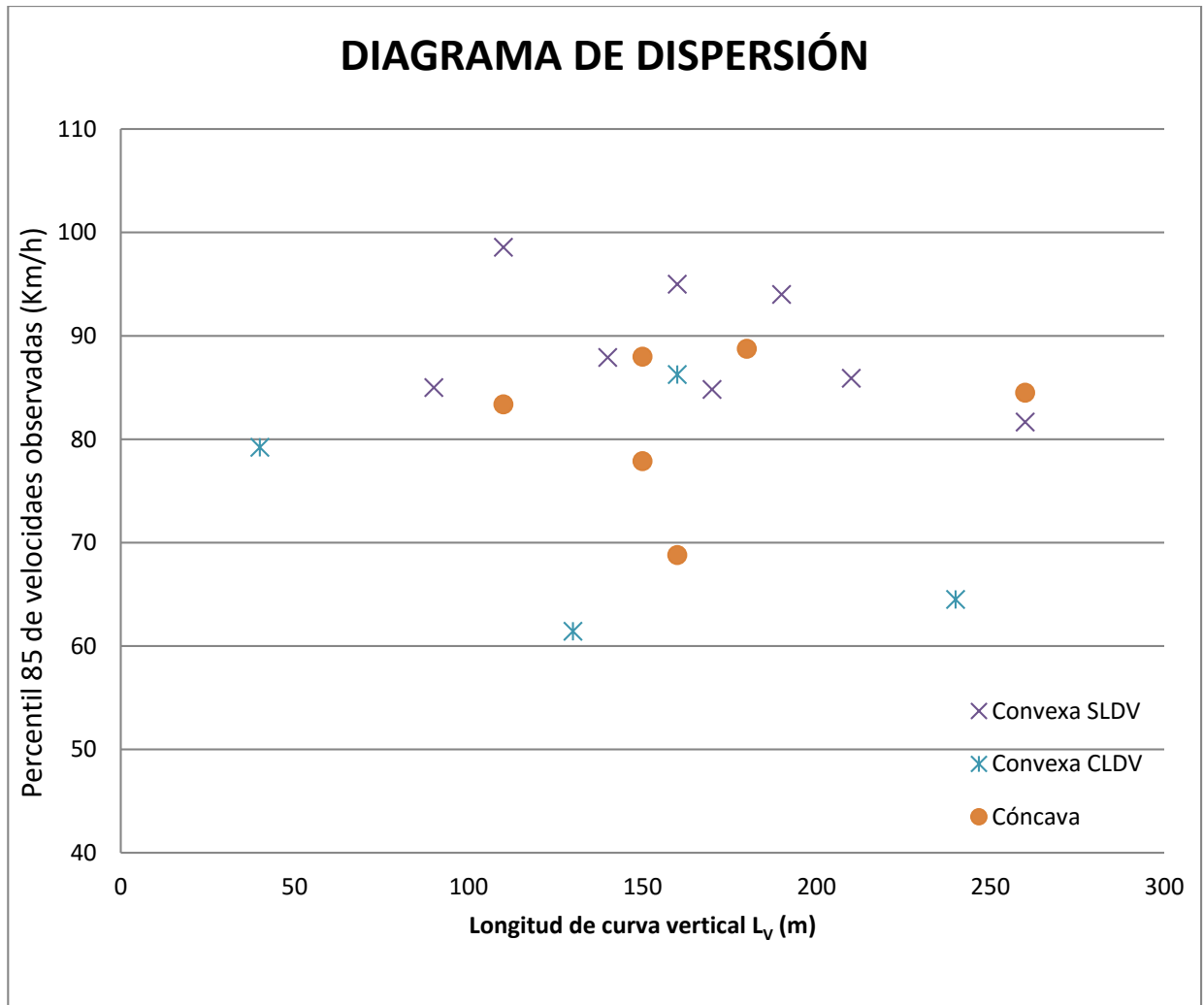
Figura 13. Percentil 85 de velocidades observadas Vs 1/K



FUENTE: Elaboración propia

En la figura 14 se puede observar que el cambio de velocidades de operación no presenta una relación directa con la variación en longitud de la curva vertical (L_v), pero de todas formas se incluyó en los análisis de regresión y se observaron los resultados de las ecuaciones de pronóstico combinando esta variable con las demás seleccionadas.

Figura 14. Percentil 85 de velocidades observadas Vs L_v



FUENTE: Elaboración propia

Para darle inicio al análisis de regresión, como primera medida los datos de campo se agruparon en dos conjuntos, siendo el primero el de curvas convexas, y el segundo el de curvas cóncavas, teniendo en cuenta el comportamiento de las velocidades observadas en las figuras anteriores.

Aunque en la programación de la investigación se establecieron dos grupos de análisis para las curvas convexas (curvas verticales con limitaciones en su

distancia de visibilidad CLDV, y sin limitaciones SLDV), analizando la gráfica 14 se observa que existe continuidad y complementación en los datos de ambos tipos de curvas, además que los valores de K de uno de estos grupos es excluyente del otro y viceversa. Otra razón es que del grupo de curvas convexas con limitaciones en su distancia de visibilidad se obtuvieron pocos sitios de trabajo (solamente 4 curvas).

9.1.1 Curvas convexas

Primero se realizó el análisis de regresión con todas las variables seleccionadas inicialmente ($1/K$ y L_v) con el propósito de estimar aquellas que se encuentren fuertemente relacionadas con las velocidades de operación. El modelo presentó un valor de $R^2 = 0.17$ (muy bajo). Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 10.

Tabla 10. Estimación preliminar de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas verticales convexas

Variable	Parámetro estimado	Valor t
Intercepto	101.3157	9.9871867
$1/K$	-103.1268	-1.1221914
L_v	-0.050576	-1.1929819
$t_{0.05,9} = 2.26215715$	$F = 0.8940860$	$f_{0.05,2,9} = 4.25649472$

FUENTE: Elaboración propia

De acuerdo con el análisis de regresión, podemos observar que la prueba t para los coeficientes de las variables utilizadas presenta un grado de significación que indica poco o ningún aporte de estas variables al modelo obtenido (el $|t|$ de cada coeficiente es menor que el obtenido de la tabla estándar $t_{p,n}$).

La prueba F para el modelo analizado indica que debe ser rechazado y que el comportamiento de las velocidades de operación en curvas convexas no es función de las variables seleccionadas (el valor F del modelo es menor que el obtenido de la tabla estándar $f_{p,g,l,n}$).

Después de realizado el análisis de regresión para las curvas convexas y de estudiar todas la combinaciones de las variables, incluyendo las transformaciones de algunas de ellas ($1/K$ y $1/L_v$), no se obtuvo un modelo idóneo que relacionara las velocidades de operación obtenidas en campo con las características geométricas (ver anexo 4). Por esta razón se dividió el grupo de curvas convexas en otros dos de acuerdo con las limitaciones de sus distancias de visibilidad, para estudiar la posibilidad de encontrar modelos que puedan correlacionar la velocidad de operación con las principales variables geométricas.

9.1.1.1 Curvas convexas sin limitaciones en la distancia de visibilidad

Del análisis de regresión para las curvas verticales sin restricciones en la distancia de visibilidad, utilizando todas las variables iniciales ($1/K$ y L_v) se obtuvo un modelo con un valor de R^2 de 0.32. Los resultados se observan en la tabla 11.

Tabla 11. Estimación preliminar de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas verticales convexas sin limitaciones en la distancia de visibilidad

Variable	Parámetro estimado	Valor t
Intercepto	107.25799	8.61991
$1/K$	-175.36205	-1.02439
L_v	-0.073634	-1.51526
$t_{0.05,5} = 2.57058183$	$F = 1.17127885022079$	$f_{0.05,2,5} = 5.786135$

FUENTE: Elaboración propia

Nuevamente podemos observar que la prueba t para los coeficientes de las variables utilizadas presenta un grado de significación que indica poco o ningún aporte de estas variables al modelo obtenido.

La prueba F para el modelo analizado indica que debe ser rechazado, y que el comportamiento de las velocidades de operación en curvas convexas sin limitaciones en la distancia de visibilidad no es función de las variables seleccionadas.

El análisis de regresión para las diferentes combinaciones de las variables (K, LV, 1/K y 1/LV) dio como resultado una valoración estadística que no favoreció a modelos estudiados (ver anexo 4). Lo anterior debido al alto grado de dispersión presentado por los datos obtenidos en campo. Los estadísticos de selección para los modelos no cumplen con ninguno de los criterios establecidos.

9.1.1.2 Curvas convexas con limitaciones en la distancia de visibilidad

Para las curvas convexas con limitaciones en la distancia de visibilidad no pudo obtenerse un modelo (ver anexo 4), probablemente debido al reducido número de datos obtenidos en campo, solamente 4 observaciones. Además, los puntos disponibles no presentan ninguna tendencia que permita relacionar las variables geométricas seleccionadas con la velocidad de operación observada.

9.1.2 Curvas cóncavas

Del análisis de regresión para las curvas verticales cóncavas localizadas sobre tramos rectos los resultados, utilizando todas las variables iniciales (1/K y L_v) y sus

transformaciones, que se obtuvieron se encuentran resumidos en la tabla 12. El valor de R^2 para el modelo fue de 0.32.

Tabla 12. Estimación preliminar de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas verticales cóncavas

Variable	Parámetro estimado	Valor t
Intercepto	76.72984	4.169499
1/K	148.0447	1.174801
L _v	0.054405	0.741459
$t_{0.05,3} = 3.18244630$	$F = 0.7072763551$	$f_{0.05,2,3} = 9.5520944$

FUENTE: Elaboración propia

De acuerdo con la prueba t para los coeficientes de las variables utilizadas, éstas presentan un grado de significación que indica poco o ningún aporte al modelo obtenido. La prueba F indica que el modelo debe ser rechazado y que el comportamiento de las velocidades de operación en curvas cóncavas no es función de las variables seleccionadas.

Del análisis de regresión para las diferentes combinaciones de las variables (K, LV, 1/K y 1/LV) resultó que los datos de campo de las velocidades de operación no presentaron ninguna tendencia y por lo tanto no se ajustan a ninguno de los modelos propuestos (ver anexo 4). Los estadísticos de prueba que resultaron del análisis de regresión de los modelos arrojan valores de significación muy bajos, los cuales, de acuerdo con los criterios de aceptación, determinan su rechazo.

9.2 CURVAS VERTICALES SOBRE CURVAS HORIZONTALES

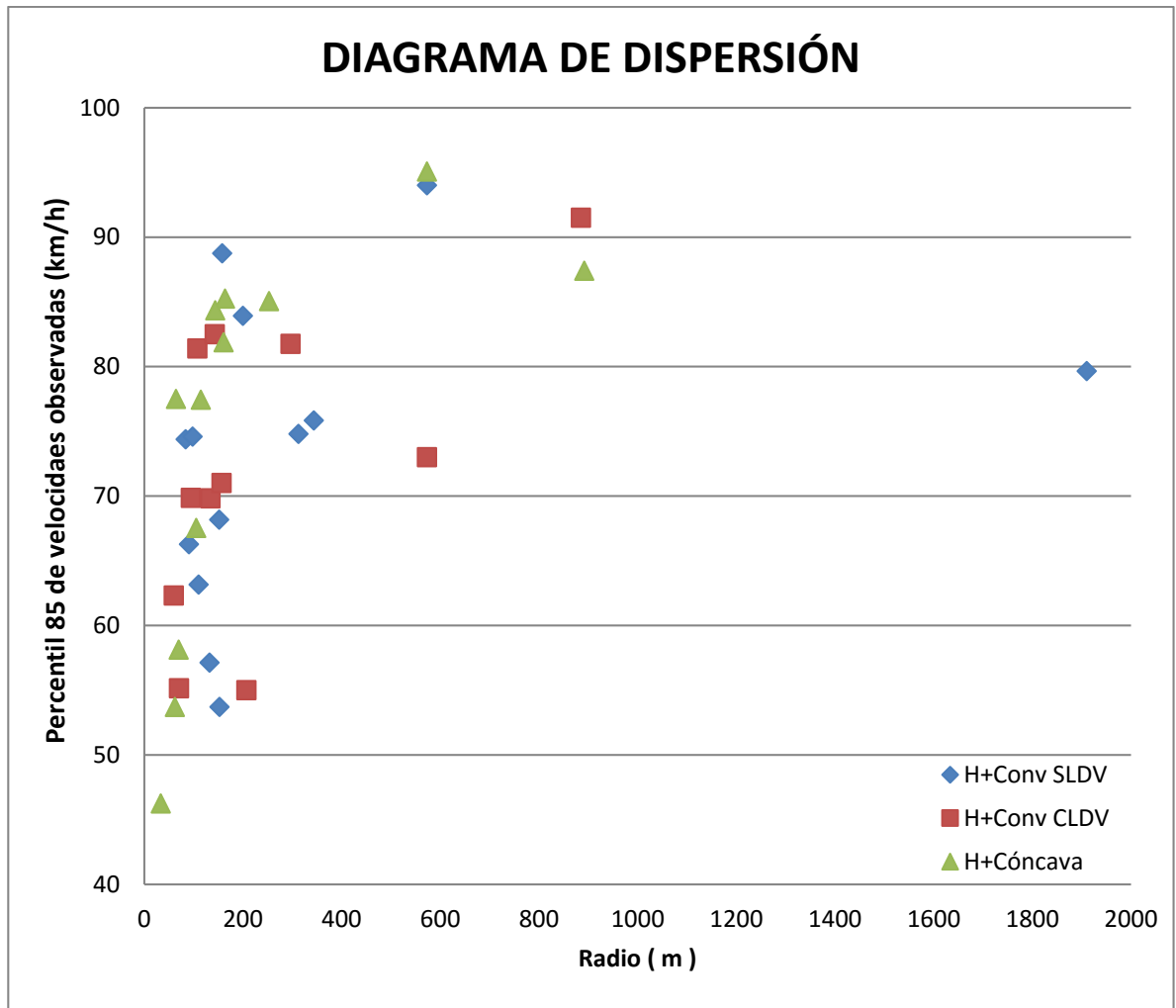
De las principales variables en curvas horizontales combinadas con curvas verticales se seleccionaron el radio (R), la longitud horizontal (L_H), la longitud de curva vertical (L_V) y el coeficiente que determina la variación de la longitud por unidad de porcentaje (K). Las otras variables geométricas de diseño horizontal como el grado de curvatura (G), el ángulo de deflexión (Δ) entre otras, no se consideraron debido a que no presentaron correlación con las velocidades de operación en la fase I.

En la figura 15 podemos observar el comportamiento de la velocidad de operación en relación con el aumento del radio de curva horizontal, donde se muestra una tendencia directa entre estas dos variables.

Se observa una variación mayor en el aumento de velocidad para radios menores a 250 metros, mientras que para radios mayores la variación en el aumento de velocidad disminuye. Estas observaciones también fueron obtenidas en los estudios de la FHWA en el desarrollo del módulo de consistencia de diseño del programa computacional IHSDM¹¹.

¹¹ FITZPATRICK, K. et al. Op. Cit. p. 55

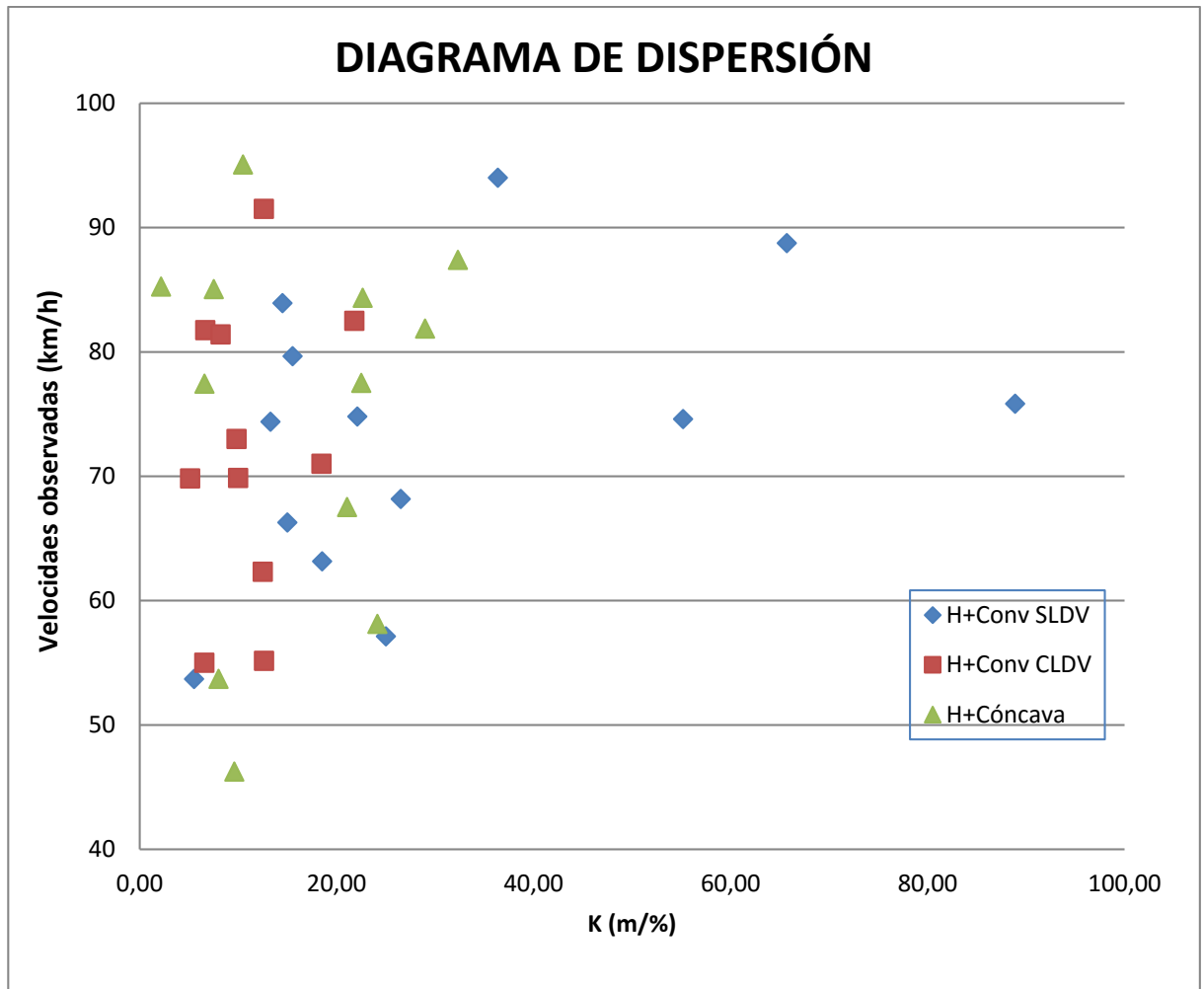
Figura 15. Percentil 85 de velocidades observadas Vs R en curvas horizontales y verticales combinadas.



FUENTE: Elaboración propia

En la figura 16 se puede observar el diagrama de dispersión de la velocidad de operación contra el coeficiente K de las curvas verticales combinadas con horizontales. En ella no se puede apreciar tendencia alguna a simple vista, pero este parámetro es un elemento importante en el diseño geométrico de vías y por lo tanto se consideró en el análisis de regresión en combinación con las otras variables geométricas seleccionadas.

Figura 16. Percentil 85 de velocidades observadas Vs K en curvas horizontales y verticales combinadas.

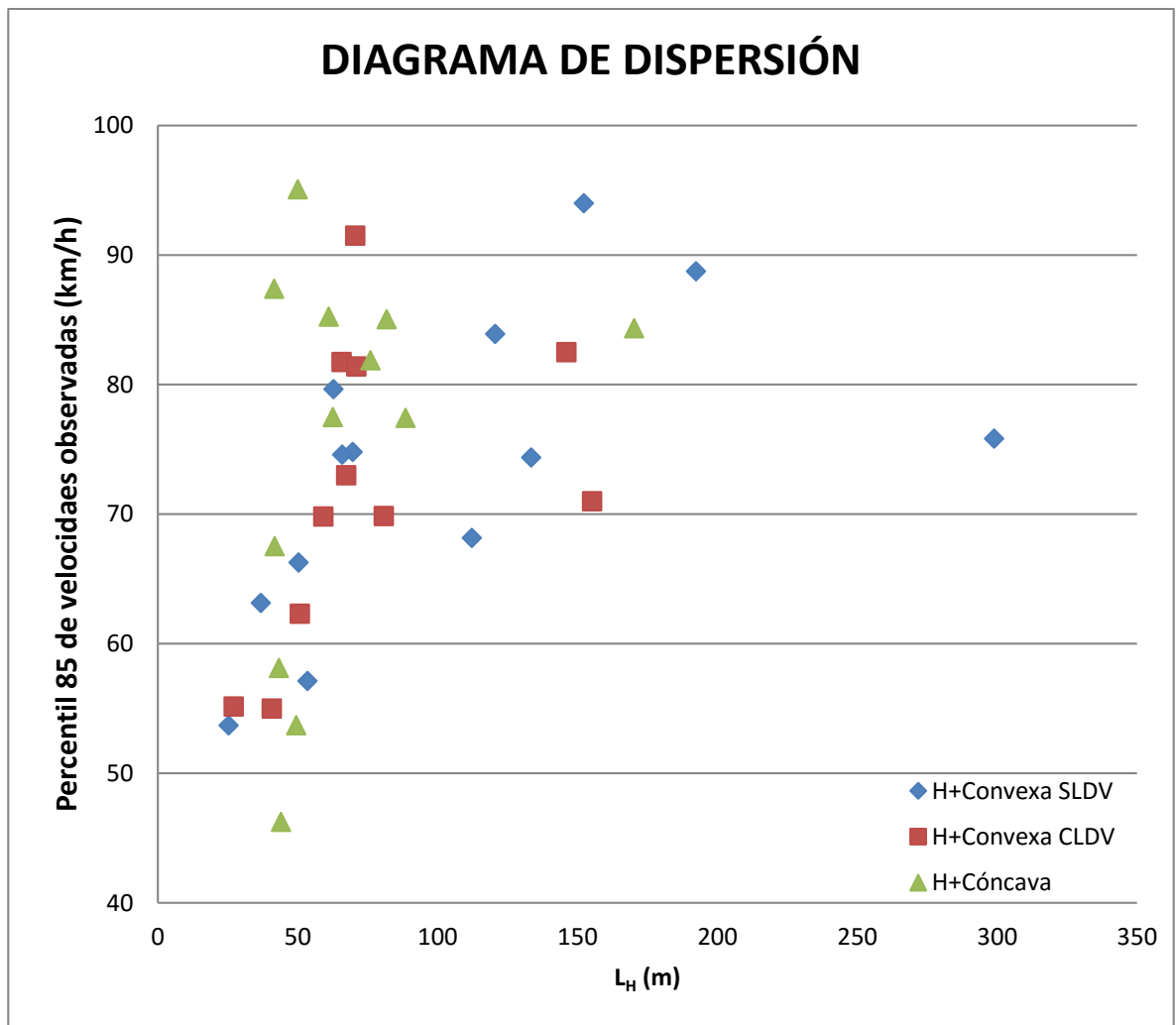


FUENTE: Elaboración propia

En la figura 17 se puede observar el diagrama de dispersión de la velocidad de operación contra la longitud horizontal de curva horizontal combinada con curvas vertical. Analizando visualmente la tendencia de los datos observados, podría considerarse que presentan un comportamiento similar al que se observa con el radio de curva horizontal (R), debido probablemente a la existencia de correlación múltiple entre estas dos variables. Los problemas de correlación múltiple son

evaluados como parte del análisis de regresión utilizado en la obtención de los modelos de pronóstico de velocidades de operación.

Figura 17. Percentil 85 de velocidades observadas Vs Longitud de curva horizontal combinada con curva vertical.



FUENTE: Elaboración propia

En un primer intento, los datos fueron agrupados según el tipo de curvas verticales: convexas y cóncavas.

9.2.1 Curvas verticales convexas combinadas con curvas horizontales

Como primer paso se realiza el análisis de regresión de todas las variables seleccionadas, con el propósito de estimar las variables que se estén fuertemente relacionadas con la velocidad de operación en este tipo de curvas. En la tabla 13 podemos observar los resultados obtenidos.

Tabla 13. Estimación preliminar de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas horizontales combinadas con verticales convexas

Variable	Parámetro estimado	Valor t
Intercepto	79.32032	7.41844
1/R	-1151.517	-2.276997
L _H	0.054735	1.370724
1/K	-39.73389	-0.712849
L _V	-0.004287	-0.129425
$t_{0.05,19} = 2.09302$	$F = 3.448074462$	$f_{0.05,4,19} = 2.89510$

FUENTE: Elaboración propia

De acuerdo con la prueba t para los coeficientes de las variables utilizadas, se observa que la variable 1/R presenta un grado de significación que indica que ésta sí aporta al modelo obtenido.

La prueba F arroja un valor que indica una significación en la cual algunas de sus variables pueden conformar un modelo que pueda relacionarlas con las velocidades de operación observadas en campo. Diferentes combinaciones de variables se someterán a análisis de regresión para obtener modelos con mayor significación.

Del análisis de regresión realizado a las diferentes combinaciones de las variables geométricas seleccionada resultó que el inverso del radio ($1/R$) y el inverso de la longitud de la curva horizontal ($1/L_H$) presentaron estadísticos de prueba con mayor significación (ver anexo 4).

Se obtuvieron dos ecuaciones de regresión con valores altos de R^2 . El primero con las variables ($1/R$) y ($1/L_H$) que arrojó un R^2 de 0.62, mientras el segundo con ($1/L_H$) como única variable regresora, arrojó un R^2 de 0.53. Uno de estos modelos se elegirá después de someterlos al proceso de validación, de acuerdo con sus estadísticos de aceptación resultantes.

Los resultados de los análisis de regresión realizados a las variables seleccionadas, incluyendo las pruebas del modelo y de los coeficientes, se resumen en las tablas 14 y 15.

Tabla 14. Estimación de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas horizontales combinadas con verticales convexas

Variable	Parámetro estimado	Valor t
Intercepto	90.6878	26.02391
$1/R$	-823.604	-2.1157
$1/L_H$	-785.495	-4.4516
$t_{0.05,7} = 2.079613$	$F = 17.092204$	$f_{0.05,4,7} = 3.4668$

FUENTE: Elaboración propia

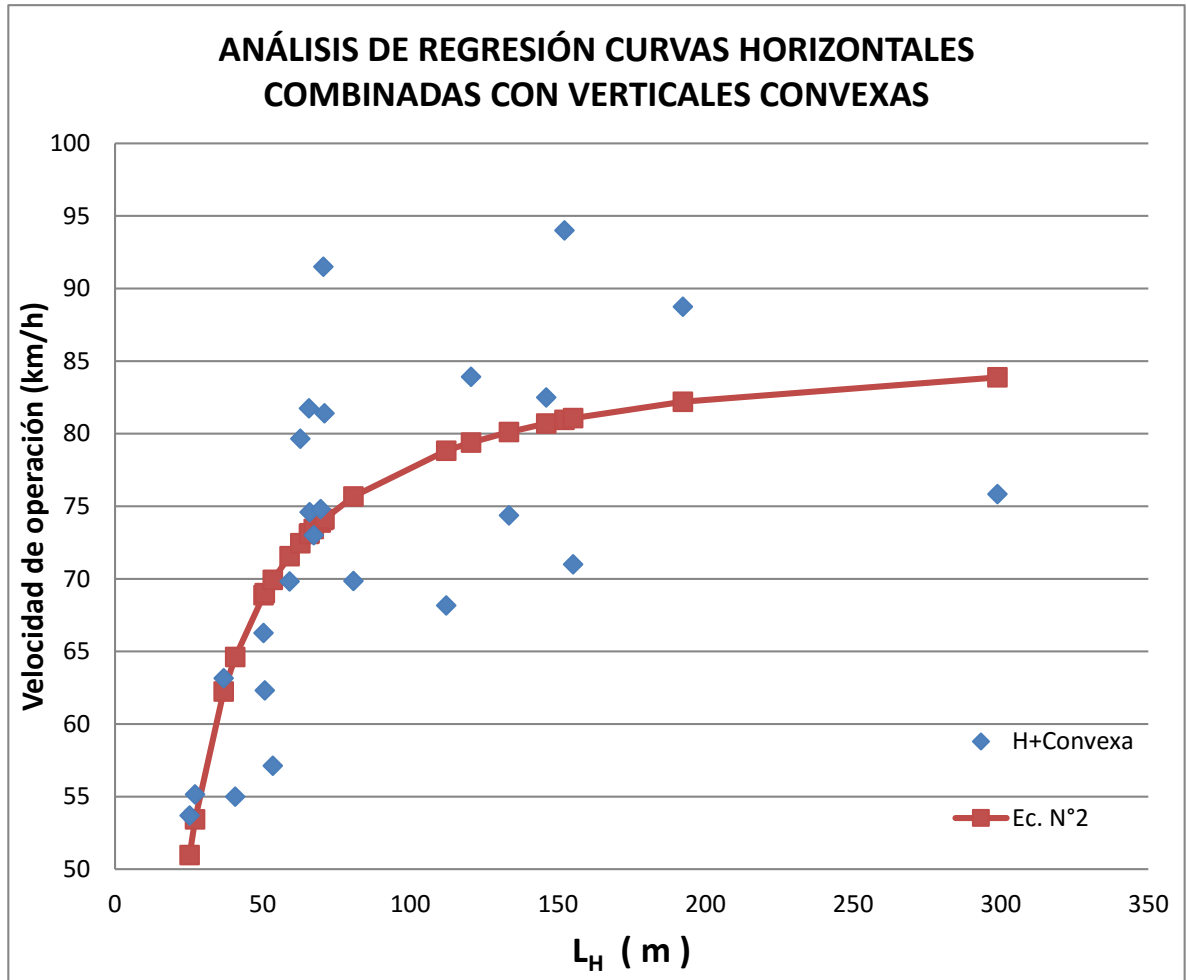
Tabla 15. Estimación de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas horizontales combinadas con verticales convexas

Variable	Parámetro estimado	Valor t
Intercepto	86.9213	26.9629
1/L _H	-908.2569	-5.06502
t _{0.05,7} = 2.07387	F= 25.65447	f _{0.05,4,7} = 4.3009

La variable con mayor valor de significación ha resultado ser el inverso de la longitud de curva horizontal (1/L_H), lo cual no concuerda con la bibliografía consultada en las cuales la variable que controla la velocidad en curvas horizontales es el inverso del radio de la curva (1/R).

En la figura 18 se presenta la curva ajustada para la ecuación N° 2. La ecuación N° 1 no se graficó porque tendría que representarse como una superficie en un gráfico de tres dimensiones.

Figura 18. Percentil 85 de velocidades observadas Vs inverso de longitud de curva horizontal combinada con curva vertical convexa.



FUENTE: Elaboración propia

Con el propósito de obtener modelos con mayores valores en sus estadísticos de aceptación se dividieron las curvas convexas en dos grupos de acuerdo con las limitaciones de sus distancias de visibilidad.

9.2.1.1 Curvas horizontales combinadas con curvas verticales convexas sin limitaciones en la distancia de visibilidad

Del análisis de regresión de modelo conformado por todas las variables seleccionadas, se obtuvo un $R^2 = 0.51$. Aunque es el mayor valor obtenido en las regresiones realizadas, no es lo suficientemente alto para confirmar que el modelo es adecuado, y por lo tanto se deberán analizar diferentes combinaciones de estas variables para lograr un mejor estadístico de aceptación.

Los resultados del análisis de regresión, y la significación estadística del modelo (prueba F) y de los coeficientes de las variables (prueba t) se resumen en la tabla 16.

Tabla 16. Estimación preliminar de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas horizontales combinadas con verticales convexas sin limitaciones en la distancia de visibilidad

Variable	Parámetro estimado	Valor t
Intercepto	77.0527	5.797061
1/R	-1116.238	-1.298035
L _H	0.043642	0.930148
1/K	-77.10109	-0.901139
L _V	0.021048	0.489589
$t_{0.05,8} = 2.306004$	$F = 2.0923527$	$f_{0.05,4,8} = 3.837853$

FUENTE: Elaboración propia

La prueba t para los coeficientes de las variables utilizadas presenta un grado de significación que indica que ninguna de las variables aporta al modelo obtenido.

La prueba F arroja un valor de significación que indica que el modelo carece de toda relación con la variable dependiente regresora, aunque el coeficiente de regresión sea hasta ahora el más alto obtenido. A pesar de lo anterior, las variables se sometieron a análisis de regresión con diferentes combinaciones (ver anexo 4), que concluyeron que la variable con mayor valor de aceptación fue el inverso de la longitud de curva horizontal ($1/L_H$).

El valor del coeficiente de determinación múltiple R^2 fue de 0.59. Para este caso también se observó que el radio de la curva horizontal no es la principal variable que controla a la velocidad de operación.

En la tabla 17 se resumen los resultados del análisis de regresión realizado, el cual cumple con los criterios de selección.

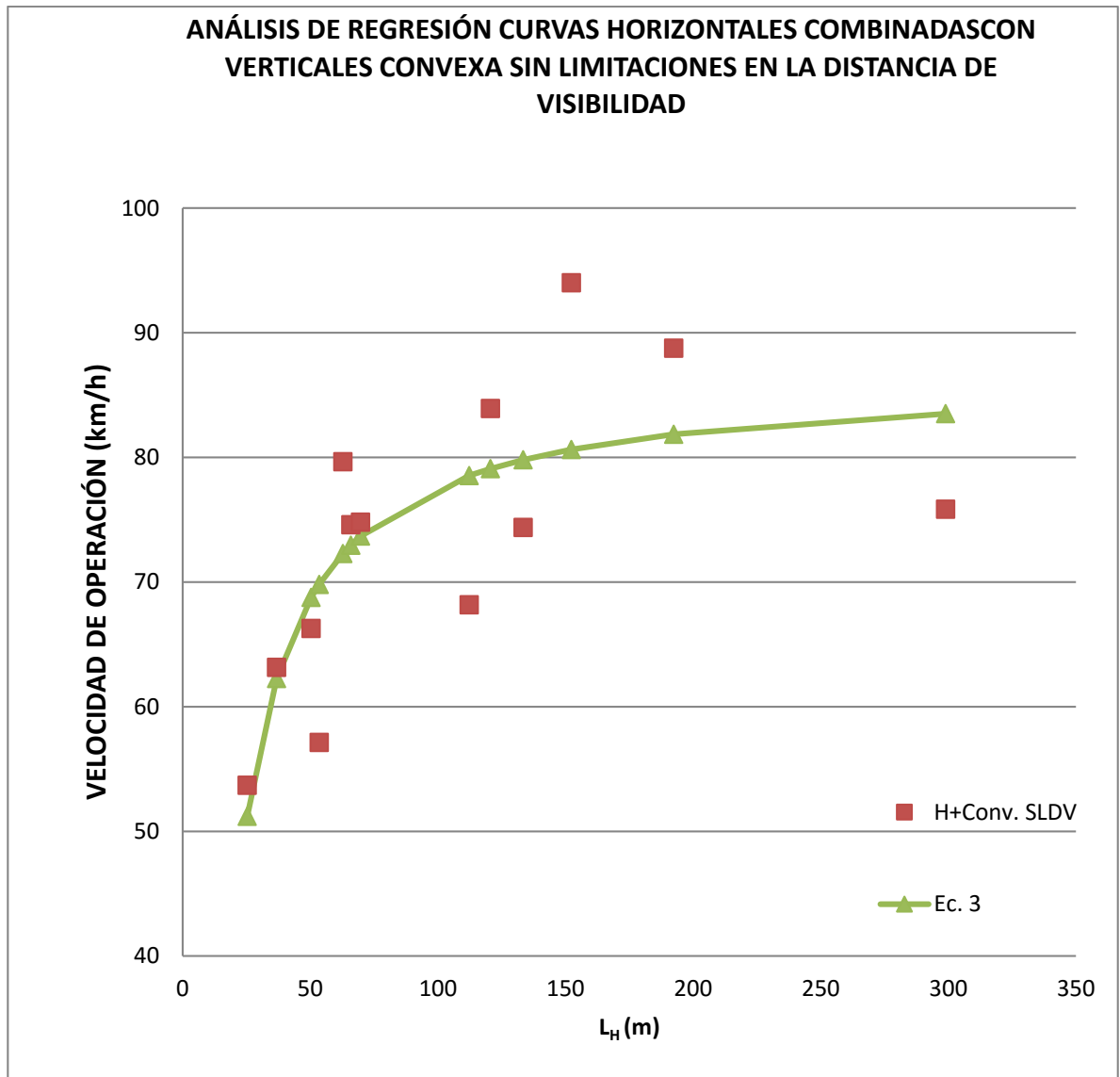
Tabla 17. Estimación de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas horizontales combinadas con verticales convexas sin limitaciones en la distancia de visibilidad

Variable	Parámetro estimado	Valor t
Intercepto	86.481125	21.96404
$1/L_H$	-891.44433	-3.9842302
$t_{0.05,7} = 2.20098$	$F = 15.87409$	$f_{0.05,4,7} = 4.84433$

FUENTE: Elaboración propia

En la Figura 19 se presenta la curva ajustada a los datos de campo para la ecuación N° 3.

Figura 19. Percentil 85 de velocidades observadas Vs inverso de longitud de curva horizontal combinada con curva vertical convexa sin limitaciones en la distancia de visibilidad.



FUENTE: Elaboración propia

9.2.1.2 Curvas horizontales combinadas con curvas verticales convexas con limitaciones en la distancia de visibilidad

En el análisis de regresión del modelo con todas las variables seleccionadas se obtuvo un valor de R^2 de 0.54. Aunque este valor no es lo suficientemente alto para confirmar que el modelo es adecuado, es un dato positivo que nos indica que una o más variables pueden estar relacionadas con la variable dependiente regresora.

Los resultados del análisis de regresión, incluyendo los resultados de las pruebas del modelo y de los coeficientes, se resumen en la tabla 18.

Tabla 18. Estimación preliminar de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas horizontales combinadas con verticales convexas con limitaciones en la distancia de visibilidad

Variable	Parámetro estimado	Valor t
Intercepto	91.9534	4.06514
1/R	-1519.6	-1.9547
L_H	0.1282	1.13304
1/K	-94.22	-0.8669
L_V	-0.0869	-1.1793
$t_{0.05,6} = 2.446911846$	$F = 1.7316573508$	$f_{0.05,4,6} = 4.533676950$

FUENTE: Elaboración propia

Revisando los resultados del análisis de regresión, la prueba t para los coeficientes de las variables utilizadas presenta un grado de significación que indica que ninguna de las variables aporta al modelo obtenido.

El valor de significación arrojado por la prueba F indica que el modelo analizado carece de toda relación con la variable dependiente regresora. A pesar de lo anterior, las variables se sometieron a un análisis de regresión con diferentes combinaciones (ver anexo 4).

Dicho análisis determinó que la principal variable correlacionada con la velocidad de operación observada resultó ser el inverso de la longitud de curva horizontal ($1/L_H$). El valor del coeficiente de determinación múltiple arrojado por el análisis de regresión es bajo ($R_2=0.47$). Adoptar este modelo en la metodología que se está desarrollando depende de los estadísticos de prueba del proceso de validación que se realizará más adelante.

Los resultados del análisis de regresión, incluyendo los resultados de las pruebas del modelo y de los coeficientes, se resumen en la tabla 19.

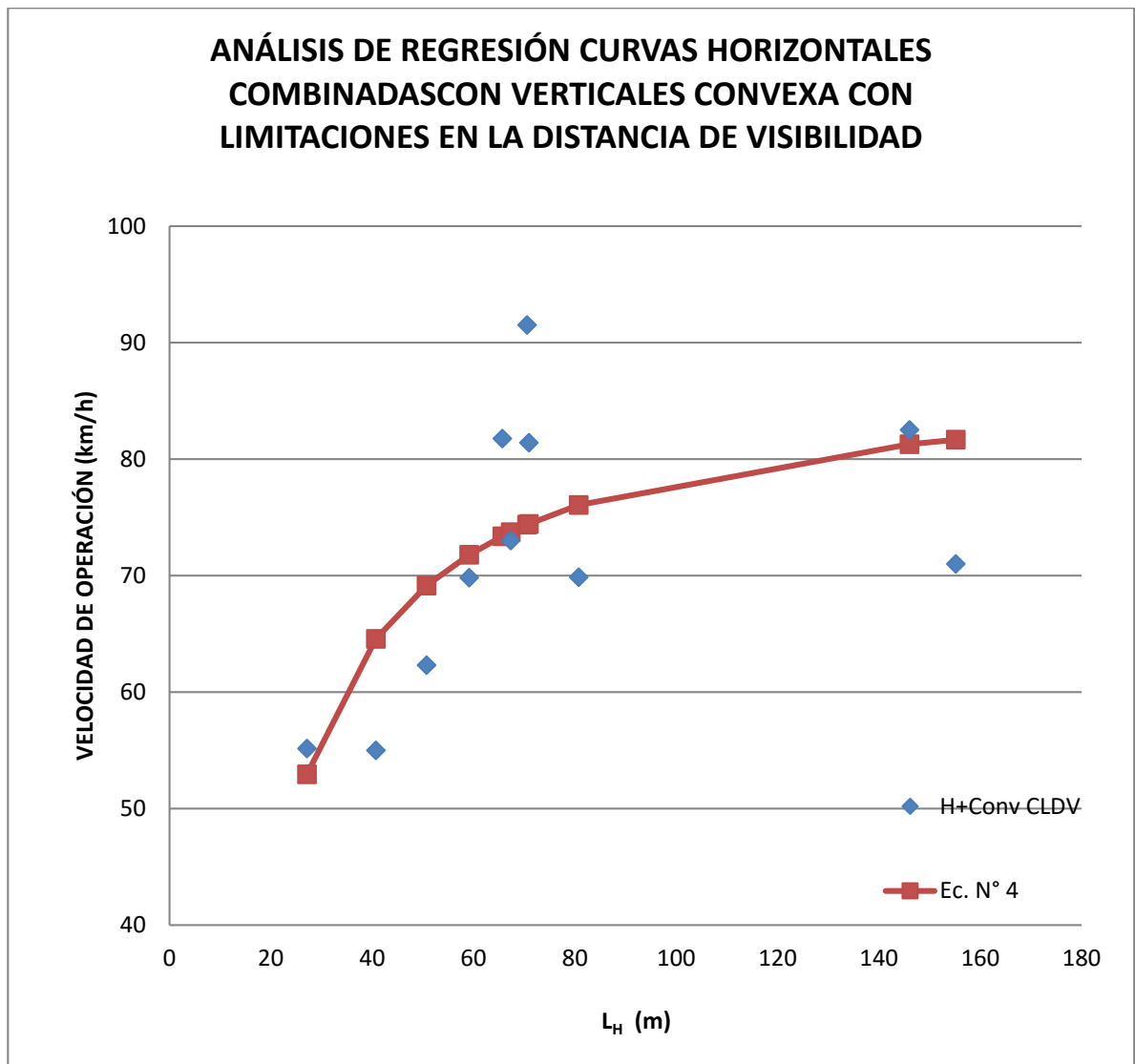
Tabla 19. Estimación de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas horizontales combinadas con verticales convexas con limitaciones en la distancia de visibilidad

Variable	Parámetro estimado	Valor t
Intercepto	87.737709	14.33401
$1/L_H$	-943.7454	-2.83949
$t_{0.05,7} = 2.262157$	$F = 8.062749$	$f_{0.05,4,7} = 5.117355$

FUENTE: Elaboración propia

En la Figura 20 se presenta la curva ajustada a los datos de campo para la ecuación N° 4.

Figura 20. Percentil 85 de velocidades observadas Vs inverso de longitud de curva horizontal combinada con curva vertical convexa con limitaciones en la distancia de visibilidad.



FUENTE: Elaboración propia

9.2.2 Curvas horizontales combinadas con curvas verticales cóncavas

En el análisis de regresión realizado al modelo con todas las variables seleccionadas arrojó un valor de $R^2 = 0.83$.

Los resultados del análisis de regresión, incluyendo los resultados de las pruebas del modelo y de los coeficientes, se resumen en la tabla 20.

Tabla 20. Estimación preliminar de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas horizontales combinadas con verticales cóncavas

Variable	Parámetro estimado	Valor t
Intercepto	82.1514	8.41963
1/R	-1524.3	-4.3655
L _H	0.06584	0.97322
1/K	16.6026	0.69463
L _V	0.01532	0.51495
$t_{0.05,7} = 2.364624$	$F = 8.456940$	$f_{0.05,4,7} = 4.12031$

FUENTE: Elaboración propia

La prueba t para los coeficientes de las variables utilizadas arroja un grado de significación que indica que el inverso del radio (1/R) contribuye con el valor de la variable regresora dependiente.

La prueba F arroja un valor de significación que indica que el modelo presenta relación con la variable dependiente regresora. A pesar de esto, las variables se sometieron a análisis de regresión con diferentes combinaciones (ver anexo 4).

Este análisis determinó que la principal variable correlacionada con la velocidad de operación observada resultó ser el inverso del radio de la curva horizontal (1/R). El valor del coeficiente de determinación múltiple (R^2) arrojado fue 0.80, lo cual indica que el modelo desarrollado es adecuado y que el radio de curva horizontal controla la velocidad de operación en la combinación de curvas horizontales y verticales. De todas maneras este modelo será sometido a un proceso de validación para decidir su utilización en la metodología a desarrollar.

Los resultados del análisis de regresión, incluyendo los resultados de las pruebas del modelo y de los coeficientes, se resumen en la tabla 21.

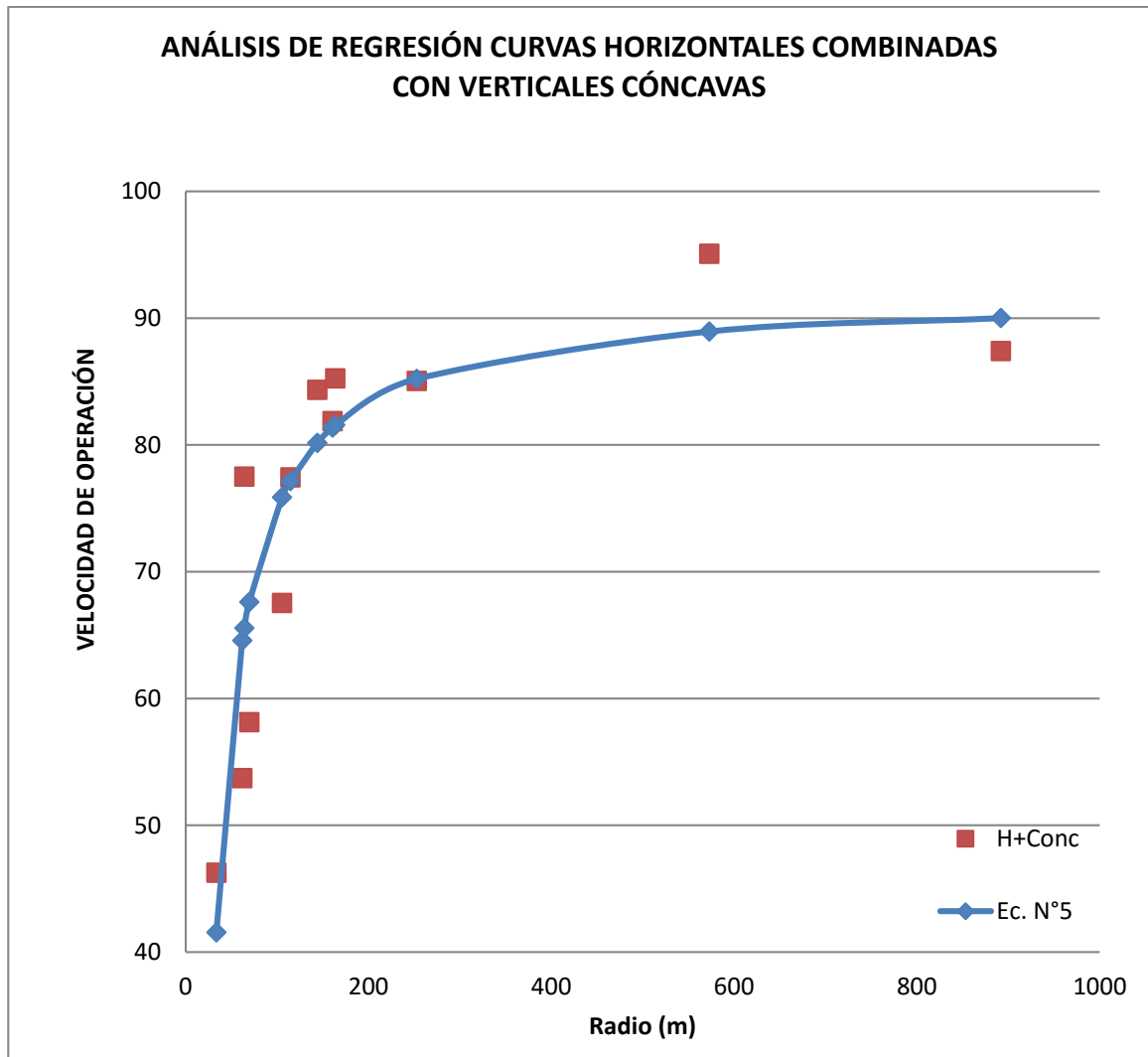
Tabla 21. Estimación preliminar de los parámetros de la ecuación de regresión para curvas horizontales combinadas con verticales cóncavas

Variable	Parámetro estimado	Valor t
Intercepto	91.90393	26.85621
1/R	-1692.08614	-6.231102
$t_{0.05,7} = 2.228138$	$F = 38.826633$	$f_{0.05,4,7} = 4.9646027$

FUENTE: Elaboración propia

En la Figura 21 se presenta la curva ajustada a los datos de campo para la ecuación N° 5.

Figura 21. Percentil 85 de velocidades observadas Vs inverso del radio de curva horizontal combinada con curva vertical cóncava.



FUENTE: Elaboración propia

En el anexo 4 se recopilan los cálculos de regresión realizados a los modelos que obtuvieron mayor valor de significación con sus respectivos gráficos y diagramas de dispersión. No se anexan el total de modelos estudiados debido a que el procedimiento utilizado fue el análisis de todas las combinaciones, en el cual el número de modelos a analizar es 2^k (donde k es el número de variables

estudiadas), resultando así un alto número de ecuaciones con sus respectivos cálculos.

9.3 RESUMEN DEL CAPÍTULO

En el presente capítulo se realizaron todas las actividades concernientes a la obtención de modelos de regresión, con el propósito de desarrollar las ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación teniendo como variables las características geométricas de la vía. Para realizar lo anterior se utilizaron los datos de velocidades de campo y las características geométricas de los sitios de estudio donde se realizaron las mediciones. Esta información se encuentra disponible en el archivo maestro (Anexo 1).

Los modelos fueron seleccionados de acuerdo con las diferentes maneras de considerar los efectos de las características geométricas en planta y perfil de la vía sobre la velocidad de operación de los vehículos que sobre ella circulan.

Se definieron los estadísticos con los que se determinaron los criterios de rechazo o aceptación de los modelos desarrollados en los análisis de regresión.

Se seleccionaron las variables geométricas con mayor influencia en el comportamiento de la velocidad de operación. Esta selección se hizo teniendo en cuenta las variables de mayor valor en el diseño geométrico de vías y las más utilizadas en anteriores trabajos de investigación sobre velocidades de operación.

Se realizó el análisis de regresión para cada grupo de variables seleccionadas de las diferentes combinaciones de diseño en planta y en perfil consideradas en el inicio de la presente investigación. Los modelos obtenidos fueron verificados realizando las diferentes pruebas de significación con el propósito de obtener el modelo más adecuado para cada caso. Los modelos que presentaron un valor de

significación de aceptación para las diferentes combinaciones de curvaturas en planta y en perfil, se resumen en la tabla 22.

Tabla 22. Ecuaciones preliminares de regresión obtenidas

Ec. N°	Condición de alineamiento	Ecuación de pronóstico de velocidad de operación (autos)	N	R ²	MSE
1-2	Curva horizontal combinada con curva vertical convexa	$V_{85} = 86.92 - \frac{908.26}{L_H}$	24	0.54	63.33
		$V_{85} = 90.69 - \frac{785.50}{L_H} - \frac{823.60}{R}$	24	0.62	54.68
3	Curva horizontal combinada con curva vertical convexa sin limitaciones en su distancia de visibilidad	$V_{85} = 86.48 - \frac{891.44}{L_H}$	13	0.59	61.62
4	Curva horizontal combinada con curva vertical convexa con limitaciones en su distancia de visibilidad.	$V_{85} = 87.74 - \frac{943.75}{L_H}$	11	0.47	79.23
5	Curva horizontal combinada con curva vertical cóncava	$V_{85} = 91.90 - \frac{1692.09}{R}$	12	0.80	51.82

Donde:

N = Número de observaciones

V₈₅ = Percentil 85 de velocidad de los vehículos tipo auto (km/h)

R= Radio de curvas horizontales (m)

L_H = Longitud de curvas horizontales (m)

MSE = Error medio cuadrático

Los modelos obtenidos se sometieron a un proceso de validación para estudiar la valoración de los datos aportados por las ecuaciones desarrolladas y verificar si son idóneos para pronosticar velocidades de operación y, de esta manera, decidir si se adoptan o no en la metodología de evaluación de consistencia de diseño geométrico de vías.

10. VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES PRELIMINARES PARA PRONOSTICAR VELOCIDADES DE OPERACIÓN

En este capítulo se presenta del proceso de validación realizado a las ecuaciones preliminares de pronóstico de velocidades de operación, las cuales fueron obtenidas en el capítulo anterior.

Para validar las ecuaciones se tomaron mediciones de velocidades en otros puntos de las vías, diferentes a los usados en el desarrollo de las ecuaciones preliminares. Estos datos también se encuentran contenidos en el archivo maestro (anexo 1) y se tendrán en cuenta nuevamente en la obtención de los modelos definitivos.

El proceso de validación de las ecuaciones se realiza para comprobar si éstas permiten obtener valores de velocidades de operación razonables, con base en la geometría de la vía. Para ello se calculan velocidades con datos conocidos y se comparan con velocidades medidas en campo. Las diferencias entre las velocidades calculadas y las medidas serán sometidas a un análisis estadístico que determina la aceptación o rechazo de las ecuaciones.

Las ecuaciones desarrolladas para pronosticar las velocidades de operación en las diferentes combinaciones geométricas en planta y perfil son las siguientes (anteriormente relacionadas en la tabla 22):

$$\text{Ecuación 1} \quad V_{85} = 86.92 - \frac{908.26}{L_H}$$

$$\text{Ecuación 2} \quad V_{85} = 90.69 - \frac{785.50}{L_H} - \frac{823.60}{R}$$

$$\text{Ecuación 3} \quad V_{85} = 86.48 - \frac{891.44}{L_H}$$

$$\text{Ecuación 4} \quad V_{85} = 87.74 - \frac{943.75}{L_H}$$

$$\text{Ecuación 5} \quad V_{85} = 91.90 - \frac{1692.09}{R}$$

Donde:

V_{85} = Percentil 85 de velocidad de los vehículos tipo auto

L_H = Longitud de curvas horizontales (m)

R = Radio de curvas horizontales (m)

Con estas ecuaciones se estiman las velocidades de operación de vehículos tipo auto, en el centro de las curvas para diferentes combinaciones de alineamientos horizontal y vertical, durante el día, sin lluvia y sobre pavimento seco en buenas condiciones.

En la tabla 23 podemos observar las estadísticas descriptivas de las principales variables geométricas utilizadas en el análisis de regresión de las ecuaciones preliminares de pronóstico de velocidades de operación desarrolladas en la presente investigación.

En la tabla 24 se muestran las estadísticas descriptivas de los sitios seleccionados para el proceso de validación.

Tabla 23. Estadísticas descriptivas de las variables utilizadas en el análisis de regresión de las ecuaciones preliminares

Parámetro	Ec. N° 1	Ec. N° 2	Ec. N° 3	Ec. N° 4	Ec. N° 5
Sitios	24	24	13	11	12
Radio (m). Rango	59.9 – 1910.1	59.9 – 1910.1	83.9 – 1910.1	59.9 – 885.26	33.6 – 892
Radio (m). Promedio	293.53	293.53	332.04	248.0	219.64
Radio (m). Desviación Estándar	397.02	397.02	493.72	256.6	255.94
Curva horizontal (m). Rango	25.26–298.9	25.26–298.9	25.26–298.9	27.12 – 155.2	41.5 – 170.2
Longitud.(m). Promedio	92.0	92.0	105.68	75.84	67.51
Longitud.(m). Desviación Estándar	62.93	62.93	76.25	39.99	36.24
Curva cóncava (m). Rango					10 – 400
Longitud (m). Promedio	N/A	N/A	N/A	N/A	118.33
Longitud (m.) Desviación Estándar					102.5
Curva convexa. (m). Rango	30 – 320	30 – 320	60 – 320	30 – 240	
Longitud (m). Promedio	121.25	121.25	143.85	94.54	N/A
Longitud(m). Desviación Estándar	75.29	75.29	75.67	69.19	
V ₈₅ (km/h). Rango	53.7 – 94	53.7 – 94	53.7 – 94	55 – 91.5	46.25 – 95.07
V ₈₅ (km/h). Promedio	72.82	72.82	73.41	72.12	74.96
V ₈₅ (km/h). Desviación Estándar	11.45	11.45	11.75	11.6	15.17

FUENTE: Elaboración propia

Tabla 24. Estadísticas descriptivas de los sitios seleccionados para el proceso de validación

Parámetro	EC. N° 1	EC. N° 2	EC. N° 3	EC. N° 4	EC. N° 5
Sitios	8	8	4	4	3
Radio (m). Rango	77.1 – 859.4	77.1 – 859.4	88.7 – 859.4	77.13 – 731.44	62.57 – 275
Radio (m). Promedio	318.72	318.72	353.77	283.66	154.36
Radio (m). Desviación Estándar	307.05	307.05	352.15	304.46	109.12
Curva horizontal (m). Rango	44.81 – 150.6	44.81 – 150.6	46.03–150.58	44.81 – 99.57	34.55 – 227.7
Longitud.(m). Promedio	89.13	89.13	101.16	77.10	99.2
Longitud.(m). Desviación Estándar	40.59	40.59	46.75	35.69	110.42
Curva cóncava (m). Rango					70 – 230
Longitud (m). Promedio	N/A	N/A	N/A	N/A	140
Longitud (m). Desviación Estándar					81.85
Curva convexa. (m). Rango	30 – 190	30 – 190	110 – 190	30 – 90	
Longitud.(m). Promedio	108.75	108.75	157.5	60	N/A
Longitud(m). Desviación Estándar	60.34	60.34	35.94	29.44	
V ₈₅ (km/h). Rango	61 – 92.8	61 – 92.8	65.4 – 92.75	61 – 89.17	62.52 – 97
V ₈₅ (km/h). Promedio	79.08	79.08	81.65	76.52	74.11
V ₈₅ (km/h).Desviación Estándar	12.58	12.58	11.59	14.74	19.82

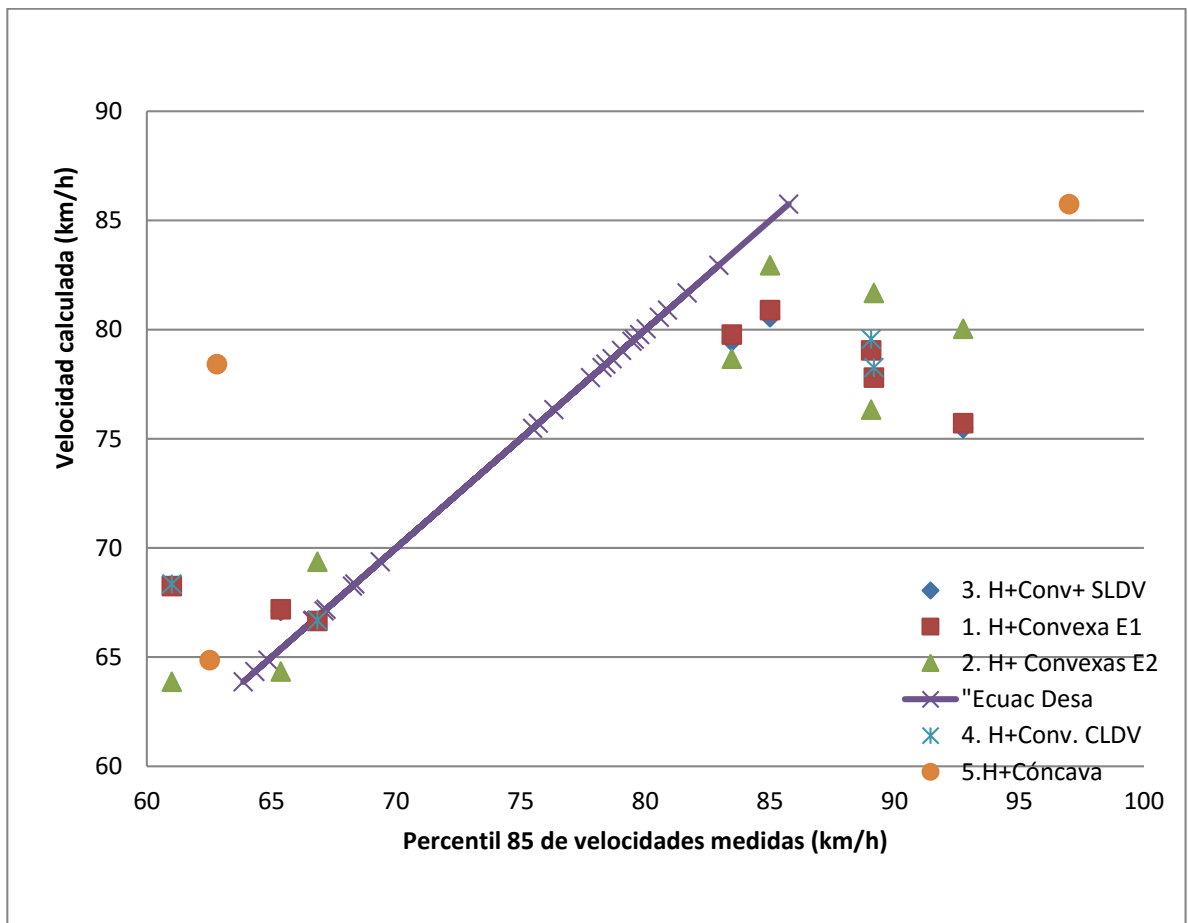
FUENTE: Elaboración propia

El análisis de validación desarrollado para cada una de las ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación es el mismo utilizado para el módulo de consistencia del programa computacional IHSDM (Capítulo 8).

10.1 VELOCIDADES PRONOSTICADAS Vs PERCENTIL 85 DE VELOCIDADES OBSERVADAS

Se realizó un gráfico con las velocidades calculadas mediante las ecuaciones preliminares, contra los percentiles V_{85} de las velocidades observadas en campo en el centro de las curvas, como se puede observar en la figura 22.

Figura 22. Velocidad calculada Vs percentil V_{85} de velocidades medidas en el centro de las curvas



FUENTE: Elaboración propia

Se utilizaron símbolos de diferentes colores y formas para identificar la ecuación para cada combinación de elementos geométricos, así:

- 1. H+Convexa: Curva vertical combinada con curva convexa (Ecuación 1).
 - ▲ 2. H+Convexa: Curva vertical combinada con curva convexa (Ecuación 2).
 - ◆ 3. H+Conv SLDV: Curva vertical convexa sin limitaciones en la distancia de visibilidad combinada con horizontal.
 - ✧ 4. H+Conv. CLDV: Curva vertical convexa con limitaciones en la distancia de visibilidad combinada con horizontal.
 - 5. Curva vertical cóncava combinada con horizontal.
- ✧ Datos obtenidos con las ecuaciones preliminares.

En la presente investigación se adopta como valor de aceptación una diferencia entre las velocidades calculadas y las medidas en campo que no exceda los 20 km/h por ser este valor el máximo permitido en el cambio de velocidad entre elementos de vía consecutivos.

En la figura 22 puede observarse que uno de los datos de validación de la ecuación N°1 (curva vertical convexa sobre curva horizontal) se aleja bastante de la diagonal (17 km/h), pero a pesar de esto el modelo es central a los datos y presenta valores favorables en sus estadísticos de validación.

La mayoría de los datos de validación de la ecuación N°2 (curva vertical convexa sobre curva horizontal) son cercanos a la línea diagonal y el modelo se ajusta a los valores de los sitios de prueba.

La ecuación N°3 (curva vertical convexa sin limitaciones en distancia de visibilidad combinada con curva horizontal) presenta pocos datos de validación, y se observa que solamente uno de ellos se aleja bastante de la línea diagonal; sin embargo, de acuerdo con la gráfica puede decirse que el modelo es adecuado.

Los datos utilizados para validar a la ecuación N° 4 (curva vertical convexa sin limitaciones en distancia de visibilidad combinada con curva horizontal) presentan diferencias entre las velocidades observadas y las calculadas inferiores a 10 km/h, y el modelo se ajusta a los datos de campo.

Los pocos datos del modelo N° 5 (curva horizontal combinada con curva vertical cóncava) se agrupan alrededor de la diagonal, con una diferencia que no supera los 16 km/h y de acuerdo con la gráfica se puede decir que el modelo es adecuado.

Observando el comportamiento de la totalidad de los datos de prueba se confirma lo dicho anteriormente para cada una de las ecuaciones.

10.2 ESTADÍSTICOS DE LAS ECUACIONES PRELIMINARES

Los resultados obtenidos en el proceso de validación, para la determinación de la proximidad del ajuste de los valores de campo con los valores arrojados de las ecuaciones desarrolladas se resumen en la tabla 25.

Los estadísticos utilizados fueron el error medio cuadrático (MSE), el promedio del valor absoluto de la diferencia (MAE) y el promedio del valor absoluto de la diferencia porcentual (MAPE); se aplicaron a los datos de cada una de las ecuaciones, y al conjunto de datos, tal como se realizó en la prueba de validación de las ecuaciones del módulo de consistencia de diseño del IHSDM del capítulo 8.

Tabla 25. Estadísticos de las ecuaciones preliminares

	Todos los datos	Ec. N° 1	Ec. N° 2	Ec. N° 3	Ec. N° 4	Ec. N° 5
Número de Sitios	19	8	8	4	4	3
MSE	74.26	75.78	54.45	84.31	65.76	125.19
MAE	6.90	6.93	5.82	6.87	6.98	9.73
MAPE	8.99	9.14	7.57	9.01	9.21	12.21
χ^2 Calculado	25.93	7.97	5.58	4.45	3.44	4.67
χ^2 Crítico	40.11	15.51	15.51	9.49	9.49	7.81

FUENTE: Elaboración propia

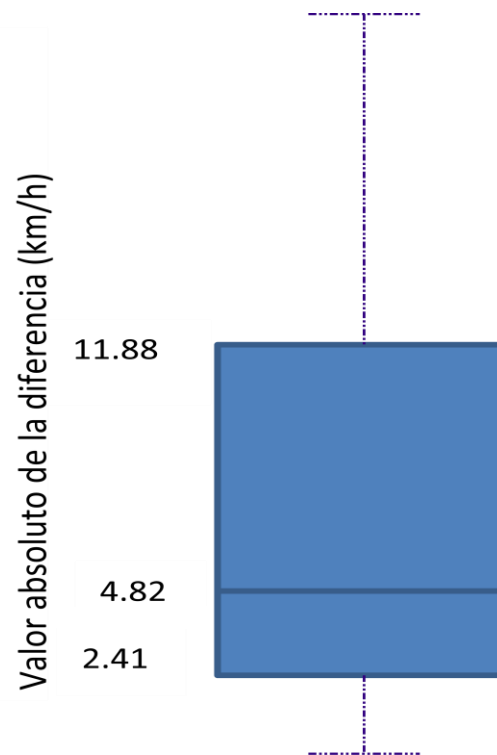
En la tabla 25 se observa que los resultados estadísticos son favorables para el ajuste de las ecuaciones desarrolladas con los datos obtenidos en nuestras carreteras. Observamos que los valores más altos se presentan en la ecuación N°5 debido a que fue la ecuación que contó con el menor número de datos para validación.

Los valores de la prueba de chi-cuadrado (χ^2) calculados de las ecuaciones son menores que los obtenidos de las tablas estandarizados, lo que determina que los modelos desarrollados presentan un valor de aceptación y que estadísticamente no hay diferencia entre los datos calculados y los datos observados en campo.

En la figura 23 se muestra el diagrama de caja del valor absoluto de la diferencia de las velocidades de pronóstico y de las observadas en campo, y para la totalidad de datos utilizados en las ecuaciones validadas. También se realizaron diagramas de cajas para cada una de las ecuaciones validadas para observar el

comportamiento de los datos de campo con los de pronóstico y se presentan en la figuras 24, 25 y 26.

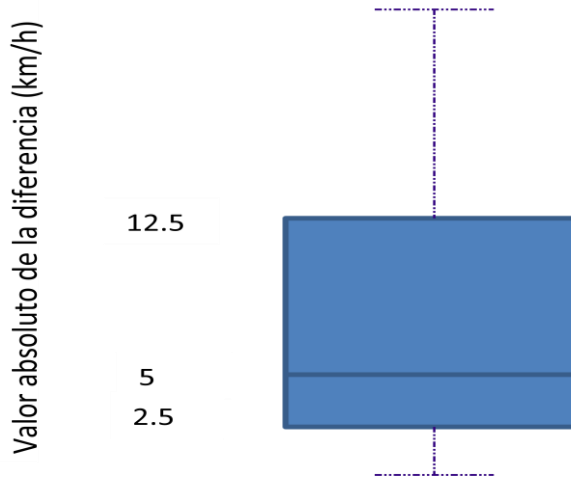
Figura 23. Diagrama de caja del valor absoluto de la diferencia de las velocidades medidas y las calculadas con las ecuaciones preliminares para todos los datos



FUENTE: Elaboración propia

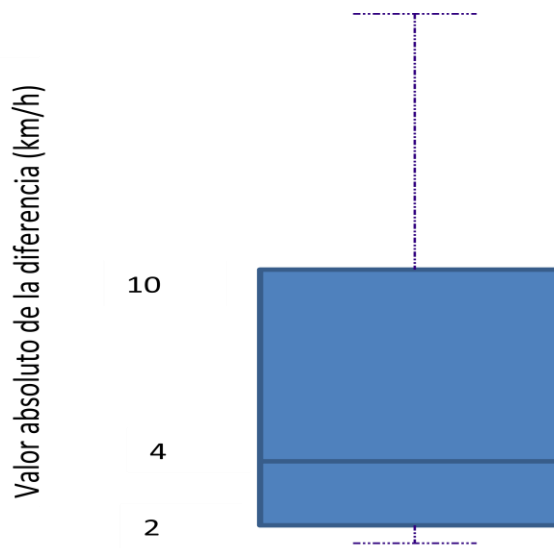
En la figura 23 observamos que los datos de prueba se encuentran dentro de los límites determinados en el diagrama de caja, lo cual establece que éstos validan favorablemente (la aceptación) de las ecuaciones de pronóstico preliminares.

Figura 24. Diagramas de caja del valor absoluto de la diferencia de las velocidades medidas y las calculadas con cada una de las ecuaciones preliminares



(a) Ecuación N°1

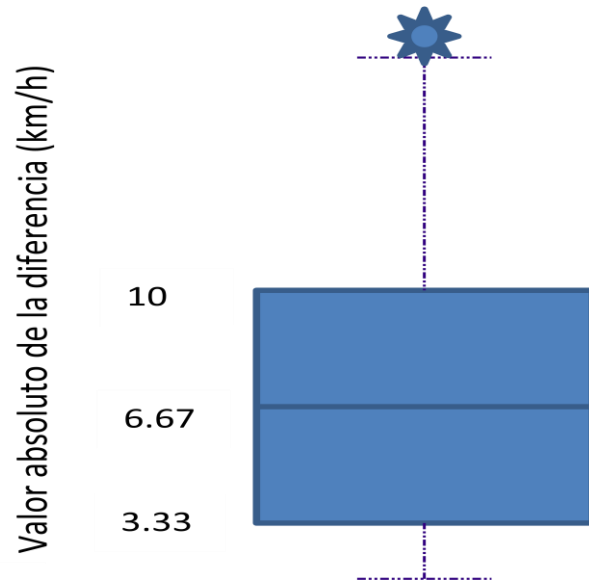
FUENTE: Elaboración propia



(b) Ecuación N°2

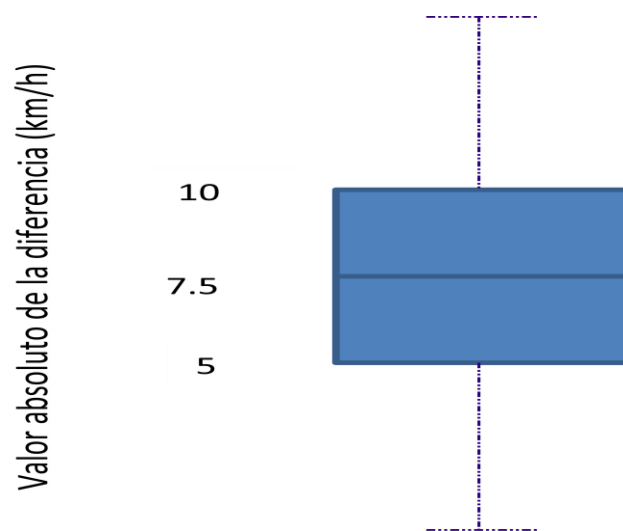
FUENTE: Elaboración propia

Figura 25. Diagramas de caja del valor absoluto de la diferencia de las velocidades medidas y las calculadas con cada una de las ecuaciones preliminares (Continuación)



(c) Ecuación N°3

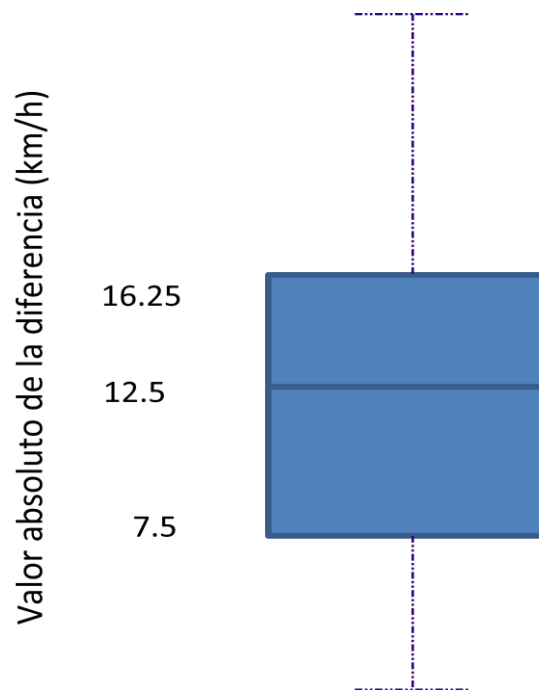
FUENTE: Elaboración propia



(d) Ecuación N° 4

FUENTE: Elaboración propia

Figura 26. Diagramas de caja del valor absoluto de la diferencia de las velocidades medidas y las calculadas con cada una de las ecuaciones preliminares (Continuación)



(e) Ecuación N°5

FUENTE: Elaboración propia

Los diagramas de caja de la figura 24 muestran que las diferencias entre las velocidades calculadas y las medidas no rebasan los límites que establecen éstos, y que dichas ecuaciones pueden ser utilizadas para el desarrollo de la metodología de consistencia de diseño geométrico.

El diagrama de caja correspondiente a la ecuación N° 3 presenta un punto por fuera de los límites establecidos, pero a pesar de ello no se eliminó del proceso de validación debido a que no estaba muy alejado.

En el anexo 5 se recopilan los cálculos de validación detallados, con sus respectivas gráficas y diagramas.

10.3 RESUMEN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se realizó la validación de las cinco ecuaciones de pronóstico preliminares desarrolladas en el capítulo anterior. La validación se realizó comparando los datos calculados con las ecuaciones mencionadas y los observados en campo, aplicando las pruebas estadísticas correspondientes.

De acuerdo con los resultados del proceso de validación, los datos se ajustan favorablemente a las ecuaciones desarrolladas. Se pudo observar que el conjunto de datos de prueba totales presentó un valor de 8.99 % en el promedio del valor absoluto de la diferencia (MAE) entre las velocidades medidas y las calculadas, mientras que los datos de las ecuaciones individuales presentan valores entre 3.44% y 12.21%.

Los diagramas de caja mostraron que los datos de prueba se mantienen dentro del rango de aceptación.

11. ECUACIONES PARA PRONOSTICAR VELOCIDADES DE OPERACIÓN

En el desarrollo de las ecuaciones preliminares para pronosticar velocidades de operación se utilizaron 54 sitios, mientras que para realizar el proceso de validación se utilizaron otros 14 sitios, que se estudiaron de manera independiente para este propósito. De acuerdo con los resultados de la validación, para desarrollar ecuaciones con un mayor rango de aplicación, en el presente capítulo se realiza el análisis de regresión utilizando todos los sitios considerados.

Se pretende mejorar así el análisis de regresión incorporando un mayor número de datos, con el propósito de obtener ecuaciones en aquellas combinaciones de geometrías horizontales y verticales para las cuales no se obtuvieron modelos de regresión, y aumentar el valor de los coeficientes de determinación múltiple (R^2) de aquéllas que se desarrollaron. Realizando nuevamente los análisis de regresión a las variables seleccionadas con la nueva base de datos, se obtienen los resultados que veremos a continuación.

En las combinaciones geométricas en las cuales no se obtuvieron ecuaciones de pronóstico de velocidades, se utilizaron los modelos validados en el capítulo 8 y en la fase I de la presente investigación.

11.1 CURVAS VERTICALES SOBRE RECTAS

En el capítulo 9 se concluyó que ninguno de los modelos estudiados presenta un ajuste adecuado a los datos de campo para esta combinación de curvas verticales, tanto convexas como cóncavas, localizadas sobre rectas.

Después de realizar los análisis de regresión correspondientes a las combinaciones geométricas planteadas inicialmente con todos los datos, se ratificó que ninguno de los modelos estudiados presenta una significación estadística que permita aceptarlos. El valor de los coeficientes de determinación múltiple obtenidos fue muy bajo, y las pruebas de significación, tanto de los modelos como de los coeficientes individuales, fueron de rechazo (ver anexo 6).

Las dos razones que se plantean para explicar los resultados obtenidos son:

- Las curvas verticales sobre rectas son los grupos con menor número de mediciones programadas.
- Se considera que las curvas verticales cóncavas y las convexas SLDV localizadas sobre rectas no afectan de manera significativa la velocidad de desplazamiento de los vehículos, lo que está de acuerdo con los resultados de los estudios de la FHWA.

Para este último caso se adoptará la velocidad deseada como velocidad de operación.

11.2 CURVAS VERTICALES COMBINADAS CON CURVAS HORIZONTALES

Para estas combinaciones geométricas, del análisis de regresión se obtuvieron cinco modelos, los cuales arrojaron valores de aceptación en sus estadísticos de prueba en el proceso de validación. De estos cinco modelos se escogieron los más adecuados para la construcción de perfiles de velocidad.

11.2.1 Curvas verticales convexas combinadas con curvas horizontales

Esta combinación geométrica incluye a las curvas convexas con y sin limitaciones en su distancia de visibilidad. En el primer análisis de regresión, para este grupo se obtuvieron dos modelos que cumplen con los criterios de aceptación, mientras que en este segundo análisis de regresión (ver anexo 6) resultaron tres modelos, utilizando las mismas variables regresoras.

En el segundo análisis se obtuvo:

- Un modelo en el cual controla el inverso de la longitud de la curva horizontal ($1/L_H$), cuyo coeficiente de determinación múltiple R^2 es de 0.56. En la tabla 26 se observa el modelo desarrollado.

Tabla 26. Parámetros de la ecuación de regresión (Modelo 1)

Variable	Parámetro estimado	Valor t
Intercepto	89.9276	31.12252
$1/L_H$	-1030.137	-6.169765
$t_{0.05,30} = 2.04227$	$F = 38.06599907$	$f_{0.05,1,30} = 4.17087675$

FUENTE: Elaboración propia

- Un modelo en el cual controlan el inverso del radio de la curva horizontal y el inverso de su longitud ($1/R$ y $1/L_H$), con un valor de $R^2 = 0.66$. En la tabla 27 se observa el modelo desarrollado.

Tabla 27. Parámetros de la ecuación de regresión (Modelo 2)

Variable	Parámetro estimado	Valor t
Intercepto	93.7913	31.99166
1/R	-867.6119	-5.400931
1/L _H	-935.6245	-2.845673
$t_{0.05,29} = 2.045229611$	$F = 27.58504059$	$f_{0.05,2,29} = 3.32765449$

FUENTE: Elaboración propia

- Un modelo en el cual la variable de control es el producto de las variables anteriores $1/(R \cdot L_H)$, con un valor de $R^2 = 0.53$. En la tabla 28 se observa el modelo desarrollado.

Tabla 28. Parámetros de la ecuación de regresión (Modelo 3)

Variable	Parámetro estimado	Valor t
Intercepto	82.85752	40.40981
$1/(R \cdot L_H)$	-74113.44	-5.864165
$t_{0.05,30} = 2.0452296$	$F = 34.3884299$	$f_{0.05,1,30} = 4.170876$

FUENTE: Elaboración propia

El modelo seleccionado es el segundo, porque ambas variables están estadísticamente correlacionadas con las velocidades de operación y presenta el

coeficiente de determinación múltiple más alto de los modelos resultantes ($R^2=0.66$).

11.2.1.1 Curvas verticales convexas sin limitaciones en la distancia de visibilidad combinadas con curvas horizontales

Para esta combinación de curvas se obtuvieron tres modelos (ver anexo 6), que son:

- Un modelo en el cual controla el inverso de la longitud de curva horizontal ($1/L_H$), con coeficiente de determinación múltiple R^2 de 0.57. En la tabla 29 se observa el modelo desarrollado.

Tabla 29. Parámetros de la ecuación de regresión (Modelo 1)

Variable	Parámetro estimado	Valor t
Intercepto	88.91274	24.60125
$1/L_H$	-964.0091	-4.461569
$t_{0.05,15} = 2.13144$	$F = 19.905598$	$f_{0.05,1,15} = 4.543077$

FUENTE: Elaboración propia

- Un modelo en el cual controlan el producto de los inversos del radio de la curva horizontal y de su longitud ($1/R * 1/L_H$) con un valor $R^2 = 0.65$. En la tabla 30 se observa el modelo desarrollado y sus estadísticos de selección.

Tabla 30. Parámetros de la ecuación de regresión (Modelo 2)

Variable	Parámetro estimado	Valor t
Intercepto	85.35562	32.96991
1/(R* L _H)	-102765.3	-5.27941
t _{0.05,15} = 2.1314495	F= 27.8721728	f _{0.05,1,15} = 4.54307712

FUENTE: Elaboración propia

- Un modelo en el cual controlan el inverso del radio de la curva horizontal y el inverso de su longitud (1/R y 1/L_H), con un valor R² = 0.69. En la tabla 31 se observa el modelo desarrollado con sus estadísticos de selección.

Tabla 31. Parámetros de la ecuación de regresión (Modelo 3)

Variable	Parámetro estimado	Valor t
Intercepto	94.15889	24.27946
1/R	-815.4941	-4.082518
1/L _H	-1184.761	-2.346992
t _{0.05,14} = 2.1447866	F= 15.698381	f _{0.05,2,29} =3.7388918

FUENTE: Elaboración propia

Los tres modelos son buenos candidatos, pero el seleccionado es el tercero por las mismas razones por las que se seleccionó el modelo de la combinación de curvaturas anterior; además, presenta las mismas variables y la misma manera de considerar los efectos de la geometría de la carretera.

11.2.1.2 Curvas verticales convexas con limitaciones en la distancia de visibilidad combinadas con curvas horizontales

En esta combinación de curvas horizontales con verticales se confirmaron los resultados obtenidos en el primer análisis de regresión.

La ecuación que correlaciona el inverso del radio de curva horizontal ($1/R$) con la velocidad de operación obtuvo un valor de significación de aceptación, lo cual indica que esta variable influye en la velocidad operación, pero el coeficiente de correlación múltiple obtenido fue muy bajo ($R^2=0.30$).

La variable que presenta una mayor significación estadística para controlar la velocidad de operación es el inverso de la longitud de la curva horizontal ($1/L_H$). El valor del coeficiente de determinación múltiple es de $R^2=0.54$. En la tabla 32 se resumen los datos del modelo obtenido (ver anexo 6).

Tabla 32. Parámetros de la ecuación de regresión

Variable	Parámetro estimado	Valor t
Intercepto	91.7994	17.82973
$1/L_H$	-1139.480	-3.970274
$t_{0.05,30} = 2.16036865$	$F = 15.7631$	$f_{0.05,1,30}=4.6671927$

FUENTE: Elaboración propia

11.2.2 Curvas verticales cóncavas combinadas con curvas horizontales

En esta combinación se obtuvieron tres modelos para el pronóstico de velocidades de operación (ver anexo 6). Las variables que presentaron mayor significación estadística fueron el inverso del radio de curva horizontal ($1/R$), el inverso de longitud de curva horizontal ($1/L_H$) y el producto de los inversos anteriormente mencionados ($1/(R*L_H)$). Los modelos obtenidos fueron:

- Un modelo en el cual controla el inverso del radio de curva horizontal ($1/R$), con un valor $R^2 = 0.73$. En la tabla 33 se observa el modelo desarrollado y sus estadísticos de selección.

Tabla 33. Parámetros de la ecuación de regresión (Modelo 1)

Variable	Parámetro estimado	Valor t
Intercepto	92.1478	25.5533
$1/R$	-1762.2	-5.9687
$t_{0.05,13} = 2.1603686$	$F = 35.625201$	$f_{0.05,1,13} = 4.66719$

FUENTE: Elaboración propia

- Un modelo en el cual controlan el inverso del radio de curva horizontal y el inverso de su longitud ($1/R$ y $1/L_H$), con un valor $R^2 = 0.84$. En la tabla 31 se observa el modelo desarrollado y sus estadísticos de selección.

Tabla 34. Parámetros de la ecuación de regresión (Modelo 2)

Variable	Parámetro estimado	Valor t
Intercepto	102.697	22.0024
1/L _H	-730.39	-2.8766
1/R	-1498.9	-5.9123
t _{0.05,12} = 2.1788128	F= 31.9179589	f _{0.05,2,12} = 3.8852938

FUENTE: Elaboración propia

- Un modelo en el cual controlan el producto de los inversos del radio de la curva horizontal y de su longitud ($1/R * 1/L_H$), con un valor $R^2 = 0.80$. En la tabla 35 se observa el modelo desarrollado y sus estadísticos de selección.

Tabla 35. Parámetros de la ecuación de regresión (Modelo 3)

Variable	Parámetro estimado	Valor t
Intercepto	89.0574	33.6652
1/(R* L _H)	-72770	-7.3897
t _{0.05,13} = 2.1603686	F= 54.607820916	f _{0.05,1,13} = 4.6671927

FUENTE: Elaboración propia

Las tres ecuaciones tienen un valor alto del R^2 , pero para seleccionar el modelo más adecuado se utilizará el criterio de ingeniería.

El modelo seleccionado es el segundo, ya que se considera que los inversos del radio y de la longitud de las curvas horizontales influyen de manera directa en la

velocidad de operación, además que estas variables combinadas han obtenido los más altos valores de significación estadística.

Aunque el modelo que presenta el producto de estas dos variables obtuvo, también, una significación estadística de aceptación, desde el punto de vista de la ingeniería el modelo seleccionado se ajusta mejor al efecto que ejercen las características geométricas de la carretera sobre la velocidad de operación.

11.2.3 Selección del modelo para curvas verticales convexas

En esta parte se elige el modelo de pronóstico de velocidades para curvas verticales convexas utilizando una sola ecuación que cubra ambos casos, es decir convexas con limitaciones en su distancia de visibilidad y convexas sin limitaciones en su distancia de visibilidad, o un par de ecuaciones, es decir una para cada caso.

La decisión de usar solamente una o dos ecuaciones se tomó después de haber realizado una prueba F. De la tabla estandarizada se obtuvo un valor $f = 3.14779121$ es cual es mayor al valor F obtenido de la prueba ($f > F$), lo cual confirma la hipótesis nula que considera iguales a los valores de las ecuaciones analizadas.

Los resultados de la prueba F se resumen en la tabla 36.

Tabla 36. Resultados de la prueba F

Fuente de la varianza	S.S.	df	MS	F	Grado de significación
Entre grupos	21.01046209	2	10.5052	0.0966	0.05
Dentro de los grupos	6635.459047	61	108.778		
Total	6656.469509	63			

Donde

S.S = Suma de los cuadrados

df = Grados de libertad asociados a cada fuente de la varianza

MS = Cuadrado de la media

F = Razón F

FUENTE: Elaboración propia

Como consecuencia de lo anterior, se selecciona una sola ecuación de pronóstico de velocidades, la cual fue desarrollada con observaciones realizadas en 32 sitios y tiene un $R^2= 0.66$.

En el anexo 7 se muestra el desarrollo de la prueba F a las ecuaciones citadas anteriormente.

11.3 ECUACIONES ADOPTADAS DE OTRAS INVESTIGACIONES

En los siguientes casos, en los cuales no se obtuvieron ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación, se utilizarán las ecuaciones desarrolladas en otras investigaciones, las cuales fueron validadas con datos de campo recopilados en vías colombianas:

- En curvas verticales convexas con limitaciones en su distancia de visibilidad localizadas sobre rectas se adoptará la ecuación de pronóstico de velocidad de operación (V_{85}) desarrollada por la FHWA para el módulo de evaluación de consistencia de diseño del programa computacional IHSDM¹².
- En curvas horizontales sobre pendientes comprendidas entre -4% y el 0% se adoptará la ecuación desarrollada por la FHWA para el módulo de evaluación de consistencia de diseño del programa computacional IHSDM¹³.
- En curvas horizontales sobre pendientes comprendidas entre 0% y el 4% se adoptará la ecuación desarrollada por Lamm y Choueiri en un estudio realizado en Nueva York, en el año de 1986 que incluyó 261 sitios para curvas horizontales en diferentes pendientes¹⁴.
- En curvas horizontales sobre pendientes comprendidas entre -4% y el 0% se adoptará los modelos de aceleraciones y de desaceleraciones desarrollados por la FHWA para el módulo de evaluación de consistencia de diseño del programa computacional IHSDM¹⁵.

¹² FITZPATRICK, K. et al. Op. Cit. p. 152

¹³ Ibid.,p 150

¹⁴ LAMM, R. and CHOUERI, E. M. Recommendations for evaluating horizontal Design Consistency based on investigations in the state of New York. Geometric design and operational effects. Transportation research record 1122. Washington. 1987

¹⁵ FITZPATRICK, K. et al. Op. Cit. p. 118-133

11.4 RESUMEN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se desarrollaron las ecuaciones de pronóstico de velocidades que se utilizarán en el procedimiento de elaboración de perfiles de velocidades y en la metodología de evaluación de consistencia.

Estas ecuaciones resultaron de las regresiones utilizando toda la información disponible, y como pudo observarse, al ampliar la cantidad de datos también aumentó el número de modelos y el valor de los estadísticos de aceptación (ver anexo 6). En el caso de las ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación para curvas verticales convexas fue necesario realizar una prueba F para definir el modelo a utilizar (ver anexo 7). En la tabla 37 se presentan las ecuaciones obtenidas.

Como el propósito de la investigación es el de obtener un conjunto de ecuaciones que permitan pronosticar velocidades de operación, aceleraciones y desaceleraciones, fue necesario adoptar ecuaciones desarrolladas en otras investigaciones, validadas con los datos de campo obtenidos en carreteras colombianas.

Como conclusión del presente capítulo se confirman los resultados del capítulo 9, donde se obtuvieron estas mismas ecuaciones, aunque con valores inferiores en sus estadísticos de aceptación, debido a que fueron desarrolladas con un número menor de datos.

Tabla 37. Ecuaciones de regresión obtenidas

Ec. N°	Condición de alineamiento	Ecuación de pronóstico de velocidad de operación (autos)	N	R ²	MSE
1	Curva horizontal combinada con curva vertical convexa	$V_{85} = 93.79 - \frac{935.62}{L_H} - \frac{867.61}{R}$	32	0.66	51.80
2	Curva horizontal combinada con curva vertical cóncava	$V_{85} = 102.70 - \frac{1498.9}{R} - \frac{730.39}{L_H}$	15	0.84	43.74
<p>Donde:</p> <p>N = Número de observaciones</p> <p>V₈₅ = Percentil 85 de velocidad de los vehículos tipo auto (km/h)</p> <p>R= Radio de curvas horizontales (m)</p> <p>L_H = Longitud de curvas horizontales (m)</p> <p>MSE = Error medio cuadrático</p>					

FUENTE: Elaboración propia

12. MÉTODO PARA EVALUAR LA CONSISTENCIA DEL DISEÑO GEOMÉTRICO DE CARRETERAS

Después de haber desarrollado el conjunto de ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación (V_{85}) y de pronóstico de aceleraciones y desaceleraciones a partir de observaciones realizadas en carreteras de Colombia y obteniendo para ellas valores de aceptación en sus estadísticos de las pruebas de validación, se cuenta con las herramientas suficientes para elaborar perfiles de velocidades de operación y un método de evaluación de la consistencia de diseño, como lo veremos a continuación.

12.1 EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA DEL DISEÑO GEOMÉTRICO DE CARRETERAS COLOMBIANAS CON BASE EN EL PERFIL DE VELOCIDADES DE OPERACIÓN

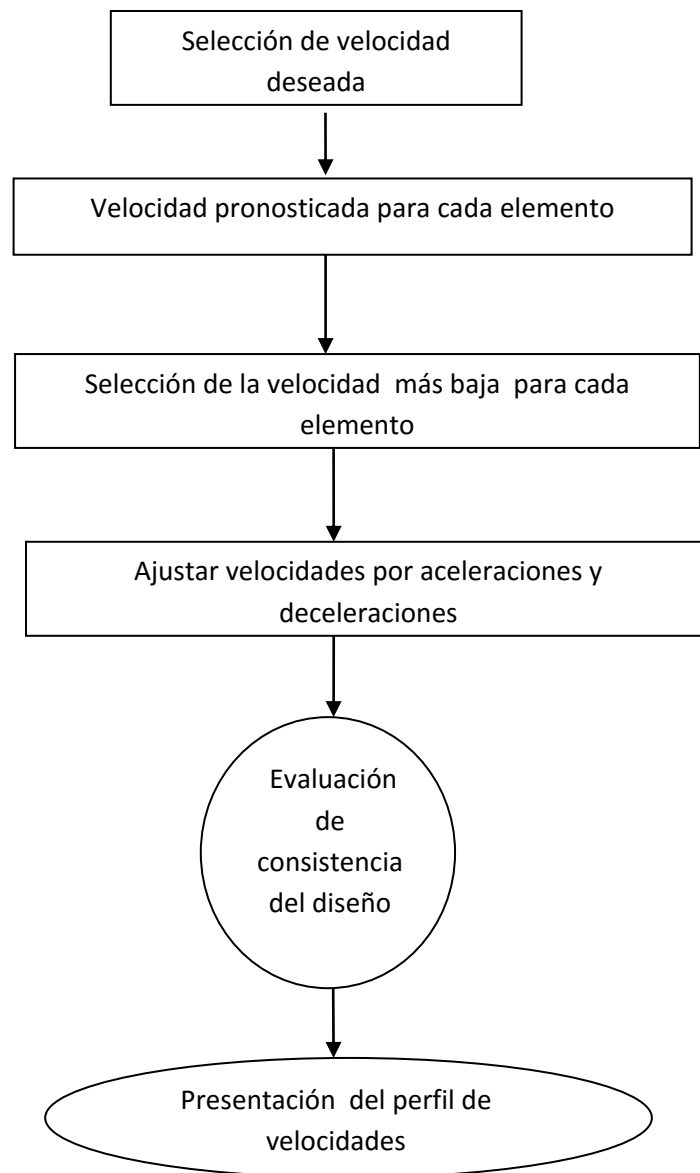
En esta parte se establecen los pasos que conformarán el procedimiento para la elaboración de perfiles de velocidad de operación, y la metodología de evaluación de la consistencia del diseño geométrico en carreteras colombianas, utilizando los resultados obtenidos en las dos fases que componen la presente investigación.

Para obtener lo anterior se siguió el procedimiento desarrollado por la FHWA y publicado en *Speed Prediction for Two-Lane Rural Highways*¹⁶, el cual se implementa en el módulo de evaluación de consistencia del diseño geométrico del programa computacional IHSDM (Interactive Highway Safety Design Model).

¹⁶ FITZPATRICK, K. et al. Op. Cit. p. 159-180

El procedimiento de evaluación de consistencia del diseño geométrico se presenta de manera gráfica en el diagrama de flujo de la figura 27, y sus pasos se describen a continuación:

Figura 27. Diagrama de flujo del método para evaluar la consistencia del diseño geométrico



FUENTE: Elaboración propia

1. Seleccionar la velocidad deseada para el tramo en estudio.
2. Pronosticar las velocidades de operación (V_{85}) para cada combinación de elementos geométricos en planta y en perfil, utilizando las ecuaciones producto de la presente investigación y las desarrolladas por investigadores internacionales, validadas en las fases I y II (Tabla 38 Página 114).
3. Seleccionar la velocidad más baja de las calculadas en los dos numerales anteriores, en cada uno de los elementos del alineamiento.
4. Ajustar las velocidades definidas en el numeral anterior con las aceleraciones y las desaceleraciones pronosticadas, utilizando las ecuaciones desarrolladas en la fase I (Tabla 39 Página 117).
5. Evaluar la consistencia del diseño geométrico
6. Presentar el perfil de velocidades utilizando una simbología de acuerdo con los criterios de evaluación de la consistencia de diseño.

Es necesario agregar que la evaluación de consistencia de diseño se realiza para ambos sentidos de la vía, lo que implica realizar el proceso dos veces.

12.1.1 Seleccionar la velocidad deseada

El primer paso consiste en seleccionar la velocidad deseada. Este parámetro se estima a partir de un conjunto de velocidades medidas en campo sobre rectas largas. Como en las rectas horizontales no se puede determinar un modelo para pronosticar su velocidad de operación, se utiliza la velocidad deseada en la elaboración del perfil de velocidad de operación.

El valor de la velocidad deseada para las carreteras colombianas es de 96.27 km/h, obtenido en la fase I de la presente investigación, y se interpreta como la velocidad que prefieren utilizar los conductores en rectas largas, libres de la influencia de pendientes altas, curvas convexas con limitaciones en la distancia de visibilidad, obstáculos y dispositivos de reducción de velocidad.

12.1.2 Pronosticar las velocidades de operación

El pronóstico de las velocidades de operación en el centro de las curvas, para cada una de las diferentes combinaciones de alineamiento que se consideraron en el marco teórico preliminar y que se presentan con gran frecuencia a lo largo de una carretera de dos carriles, se realiza con las ecuaciones que fueron desarrolladas en las dos fases que conforman la presente investigación.

En la tabla 38 se presentan de manera organizada las ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación (V_{85}), de acuerdo con las características geométricas de las combinaciones en planta y en perfil.

En el diagrama de flujo de la figura 28 se presenta la lógica del uso de las ecuaciones de pronóstico de velocidades, los elementos de entrada necesarios, como el radio (R), la variación de longitud de curva vertical por unidad de porcentaje (K), longitud de curva horizontal (L_H), abscisa de inicio de curva (PC y PCV), abscisa de terminación (PT y PTV), entre otros, y parámetros como la velocidad de diseño y la velocidad deseada.

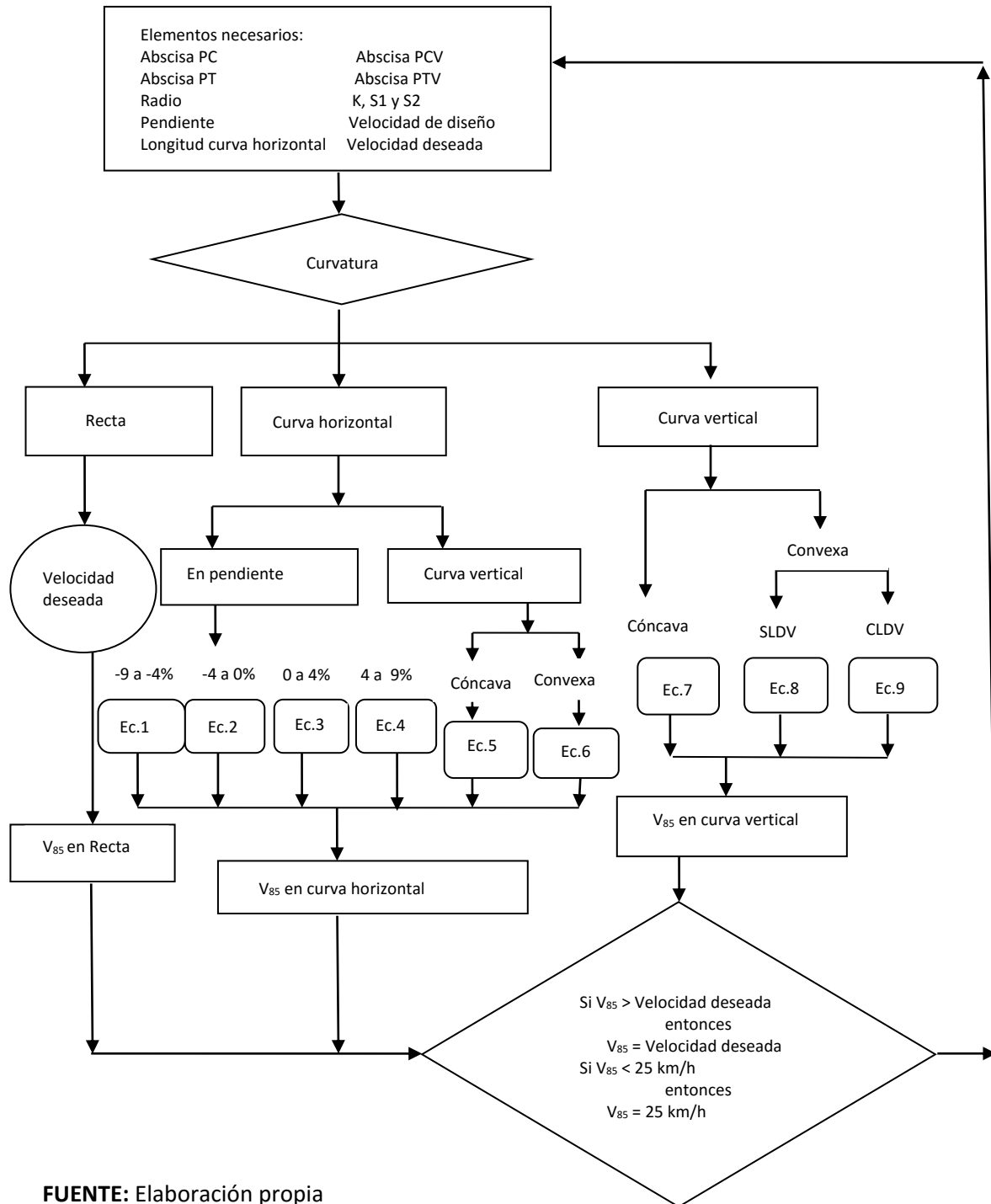
Tabla 38. Ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación (V_{85}) para vehículos tipo autos.

Ec. No. (1)	Combinación en planta y en perfil del alineamiento	Ecuación (2)	No. de observ.	R ²
1	Curva horizontal sobre pendiente -9% ≤ S < -4 % (5)	$V_{85} = 35.43 + 0.219R$	26	0.72
2	Curva horizontal sobre pendiente -4% ≤ S < 0 % (3)	$V_{85} = 105.98 - \frac{3709.90}{R}$	25	0.76
3	Curva horizontal sobre pendiente 0 % ≤ S < 4 % (4)	$V_{85} = 94.39 - \frac{3188.66}{R}$	261	0.79
4	Curva horizontal sobre pendiente 4% ≤ S < 9 % (5)	$V_{85} = 37.18 + 0.1R + 0.04R_{n-1}$	28	0.55
5	Curva horizontal combinada con curva vertical cóncava (6)	$V_{85} = 102.70 - \frac{730.39}{R} - \frac{1498.90}{L_H}$	15	0.84
6	Curva horizontal combinada con curva vertical convexa	$V_{85} = 93.79 - \frac{867.61}{R} - \frac{935.62}{L_H}$	32	0.66
7	Curva vertical cóncava sobre recta	$V_{85} = \text{Velocidad deseada}$	7	
8	Curva vertical convexa SLDV sobre recta	$V_{85} = \text{Velocidad deseada}$	10	
9	Curva vertical convexa CLDV sobre recta (3)	$V_{85} = 105.08 - \frac{149.69}{K}$	9	0.60

(1) Número de la ecuación de pronóstico de velocidad para la combinación geométrica del alineamiento.
(2) Donde V_{85} = Percentil 85 de velocidad de vehículo tipo autos (Km/h)
K = variación de la longitud de curva vertical por unidad de porcentaje (m/%)
R = Radio de curva horizontal (m)
S = Pendiente longitudinal (%)
 R_{n-1} = Radio de la curva horizontal previa (m)
(3) Ecuaciones desarrolladas por la FHWA para el IHSDM y validadas en la presente investigación
(4) Ecuación desarrollada por Lamm et al.
(5) Ecuaciones desarrolladas en la fase I de la presente investigación
(6) Comparar el resultado con las ecuaciones 1, 2, 3 y 4 y escoger el menor

FUENTE: Elaboración propia

Figura 28. Diagrama de flujo de la metodología para pronosticar la velocidad de diseño a cada elemento geométrico, en el proceso de evaluación de consistencia de diseño



FUENTE: Elaboración propia

12.1.3 Seleccionar la menor velocidad en cada elemento

En los pasos anteriores se obtuvieron dos velocidades para cada elemento: la velocidad deseada y la velocidad de operación (V_{85}).

Como velocidad de operación del elemento se selecciona a la menor de ellas.

12.1.4 Ajustar las velocidades por aceleraciones y desaceleraciones

En este paso, sobre el perfil de velocidades de operación se ajustan las velocidades a la entrada y a la salida de las curvas, debido a que los cambios de velocidades no son puntuales e inmediatos, sino que se realizan de manera gradual y controlada.

Para realizar esta transición de velocidades entre elementos consecutivos se utilizan los modelos de aceleración y de desaceleración presentados en la tabla 39.

Dichos modelos fueron desarrollados para curvas horizontales sobre pendientes en la primera fase de la presente investigación. Debido al grado de complejidad del comportamiento de los vehículos sobre curvas verticales y sobre curvas horizontales y verticales combinadas, y a la ausencia de información en la literatura consultada, para estos tipos de alineamientos no se desarrollaron modelos de aceleración-desaceleración y en su defecto se adoptaron las consideraciones que hace la FHWA¹⁷ en el módulo de consistencia de diseño geométrico del programa computacional IHSDM, las cuales también se incluyen en la tabla 39.

¹⁷ FITZPATRICK, K. et al. Op. Cit. p. 165

Tabla 39. Tasas de variación de aceleraciones y desaceleraciones

Desaceleración, d (m/s ²)		Combinación en planta y en perfil del alineamiento		Aceleración, a (m/s ²)	
<u>Radio</u>	<u>d</u>	1	Curva horizontal sobre pendiente $-9\% \leq S < -4\%$ (1)	<u>Radio</u>	<u>a</u>
$R \leq 20$	-1.47			$R \leq 20$	1.19
$20 < R < 199$	$0.64 \ln(R) - 3.39$			$20 < R < 150$	$-0.151 \ln(R) + 2.72$
$R > 199$	0.00			$R > 150$	0.00
$R \geq 436$	0.00	2	Curva horizontal sobre pendiente $-4\% \leq S < 0\%$	$R > 875$	0.00
$175 \leq R < 436$	$0.6794 - 295.14/R$			$436 < R \leq 875$	0.21
$R < 175$	1.00			$250 < R \leq 436$	0.43
				$175 < R \leq 250$	0.54
$R \leq 145$	-0.55	3	Curva horizontal sobre pendiente $0\% \leq S < 4\%$ (1)	$0 - 50$	0.89
$145 - 550$	$0.27 \ln(R) - 1.89$			$50 - 100$	0.31
$R > 550$	0.00			$100 - 150$	0.22
				$R > 150$	0.00
$R \leq 20$	-1.73	4	Curva horizontal sobre pendiente $4\% \leq S < 9\%$ (1)	$R \leq 20$	0.54
$20 - 189$	$0.78 \ln(R) - 4.07$			$20 - 170$	$-0.21 \ln(R) + 1.17$
$R > 189$	0.00			$R > 20$	0.00
1.0		5	Curva horizontal combinada con curva vertical cóncava	0.54	
1.0		6	Curva horizontal combinada con curva vertical convexa	0.54	
n/a		7	Curva vertical cóncava sobre recta	n/a	
n/a		8	Curva vertical convexa SLDV sobre recta	n/a	
1.0		9	Curva vertical convexa CLDV sobre recta	0.54	
Donde: R= radio (m), S = Pendiente (%)					
Consistencia de diseño (Para todas las combinaciones de alineamiento)					
1.00 a 1.48		Bueno		0.54 a 0.89	
1.48 a 2.00		Aceptable		0.89 a 1.25	
> 2.00		Deficiente		> 1.25	
(1) Ecuaciones desarrolladas en la fase I de la presente investigación					

FUENTE: Elaboración propia

Para la metodología de evaluación del diseño geométrico desarrollada en la presente investigación se adoptó el ajuste de velocidades por aceleración y desaceleración utilizadas por el programa IHSDM, en el cual se presentan seis casos diferentes, que dependen de la distancia disponible entre el PT de la curva precedente y el PC de la curva en estudio (ver anexo 8).

12.1.5 Evaluar la consistencia del diseño geométrico

Después de realizados los pasos anteriores, es decir calculadas las velocidades de operación (V_{85}) utilizando las ecuaciones de pronóstico de la tabla 36 para cada uno de los elementos geométricos del tramo en estudio, y de calcular las aceleraciones y desaceleraciones con las ecuaciones de la tabla 37, se realiza la evaluación de la consistencia del diseño geométrico.

Para esto, se adoptaron los siguientes criterios, establecidos por la FHWA¹⁸ en el módulo de evaluación de diseño geométrico del programa computacional IHSDM, porque se consideraron coherentes y compatibles con la normativa vigente en Colombia:

- Criterio 1. La diferencia entre la velocidad de operación (V_{85}) y la velocidad de diseño de la carretera no debe superar los 10 km/h. Diferencias superiores a 20 km/h son inaceptables porque esto indicaría que los vehículos circulan a velocidades superiores para la que fue diseñada la vía. El propósito de este criterio consiste en armonizar la velocidad de operación en el tramo considerado.

Diseño bueno 1 : $0 \text{ km/h} \leq (V_{85} - V_{\text{diseño}}) \leq 10 \text{ km/h}$

Diseño aceptable: $10 \text{ km/h} < (V_{85} - V_{\text{diseño}}) \leq 20 \text{ km/h}$

Diseño deficiente: $20 \text{ km/h} < (V_{85} - V_{\text{diseño}})$

¹⁸ SÁNCHEZ, J y CASTRO, Op. Cit. p. 8

- Criterio 2. La diferencia de velocidades de operación entre dos elementos consecutivos no debe superar los 10 km/h. Una diferencia mayor a 20 km/h es inaceptable. El propósito de este criterio consiste en armonizar la velocidad de operación entre elementos consecutivos.

Diseño bueno: $0 \text{ km/h} \leq (V_{85 \text{ Elemento 1}} - V_{85 \text{ Elemento 2}}) \leq 10 \text{ km/h}$

Diseño aceptable: $10 \text{ km/h} < (V_{85 \text{ Elemento 1}} - V_{85 \text{ Elemento 2}}) \leq 20 \text{ km/h}$

Diseño deficiente: $20 \text{ km/h} < (V_{85 \text{ Elemento 1}} - V_{85 \text{ Elemento 2}})$

- Criterio 3. Distancias insuficientes para acelerar y desacelerar. Cuando esto se presenta el vehículo requiere realizar aceleraciones o desaceleraciones forzadas.

Para evaluar la consistencia del trazado, se comparan las aceleraciones y desaceleraciones calculadas con las tasas de variación presentadas en la tabla 39, que corresponden a las utilizadas en el módulo de evaluación de diseño geométrico del programa IHSDM.

12.1.6 Completar el perfil de velocidades de operación

El perfil de velocidades de operación es la representación gráfica de los valores de las velocidades pronosticadas de cada elemento que conforman el tramo en estudio, calculadas con las ecuaciones de la tabla 38, siendo el eje horizontal de la figura las abscisas de la vía y el eje vertical las velocidades de operación. La velocidad de operación (V_{85}) está representada por las líneas que unen la abscisa inicial y final de cada elemento del tramo.

Sobre el perfil de velocidades de operación se grafican los ajustes realizados por aceleración y desaceleración a la entrada y a la salida de los diferentes elementos geométricos en planta y en perfil, y se representan de manera simbólica las

inconsistencias que resulten de la evaluación realizada, como se indica en los siguientes numerales.

12.1.6.1 Diferencia entre las velocidades de operación pronosticadas (V_{85}) y la velocidad de diseño del tramo de vía en estudio

Estas diferencias se representan de la manera siguiente:

- Si el tramo presenta un diseño bueno ($0 \text{ km/h} \leq (V_{85} - V_{\text{diseño}}) \leq 10 \text{ km/h}$) el perfil de velocidades se muestra en color verde.
- Si el tramo presenta un diseño aceptable ($10 \text{ km/h} < (V_{85} - V_{\text{diseño}}) \leq 20 \text{ km/h}$) el perfil de velocidades se muestra en color amarillo.
- Si el tramo presenta un diseño deficiente ($20 \text{ km/h} < (V_{85} - V_{\text{diseño}})$) el perfil de velocidades se muestra en color rojo.

12.1.6.2 Diferencia de velocidades de operación entre dos elementos consecutivos

Esta diferencia se representa de la siguiente manera:

Diseño bueno: $0 \text{ km/h} \leq (V_{85 \text{ Elemento 1}} - V_{85 \text{ Elemento 2}}) \leq 10 \text{ km/h}$

Diseño aceptable: $10 \text{ km/h} < (V_{85 \text{ Elemento 1}} - V_{85 \text{ Elemento 2}}) \leq 20 \text{ km/h}$

Diseño deficiente: $20 \text{ km/h} < (V_{85 \text{ Elemento 1}} - V_{85 \text{ Elemento 2}})$

- Cuando la diferencia de velocidad entre elementos consecutivos es de 0 a 10 km/h, en el perfil de velocidades se coloca una bandera de color verde en la abscisa inicial del elemento en el que se presenta el cambio.

- Cuando la diferencia de velocidad entre elementos consecutivos es de 10 a 20 km/h, en el perfil de velocidades se coloca una bandera de color amarillo en la abscisa inicial del elemento en el que se presenta el cambio.
- Cuando la diferencia de velocidad entre elementos consecutivos es mayor a 20 km/h, en el perfil de velocidades se coloca una bandera de color rojo en la abscisa inicial del elemento en el que se presenta el cambio.

12.1.6.3 Desaceleraciones forzadas

La aceleración y la desaceleración se presentan en una tabla numérica en la cual se señalan con un asterisco los sitios donde se presentan desaceleraciones forzadas.

Con el perfil completo y analizando la información por él arrojada, se pueden observar claramente los sitios donde se presentan inconsistencias en el diseño geométrico, lo cual indica lugares de posible concentración de accidentes y permitiría tomar decisiones de orden técnico para realizar las mejoras necesarias.

12.2 EJEMPLO DE CONSTRUCCIÓN DEL PERFIL DE VELOCIDADES DE OPERACIÓN

A continuación se elaborará, como ejemplo, un perfil de velocidades con el propósito de ilustrar el procedimiento siguiendo los pasos anteriormente enumerados.

Para ello se seleccionó la información geométrica de los primeros seis kilómetros de la vía Patíco – Coconuco, en el departamento del Cauca.

El tramo de la vía presenta una longitud de 5.98 kilómetros entre las abscisas K 14 + 194.12 y K 4 + 769.83 (incluye una ecuación de empalme; para efectos prácticos, se utiliza un solo sistema de referencia: K 14 + 194.12 a K 20 + 190).

La vía presenta una configuración geométrica en planta y en perfil que permite encontrar las combinaciones de curvaturas necesarias para utilizar las diferentes ecuaciones desarrolladas en la presente fase de la investigación.

La velocidad de diseño es de 40 km/h hasta el K18+946, y de 50 km/h desde la abscisa anterior hasta la abscisa final.

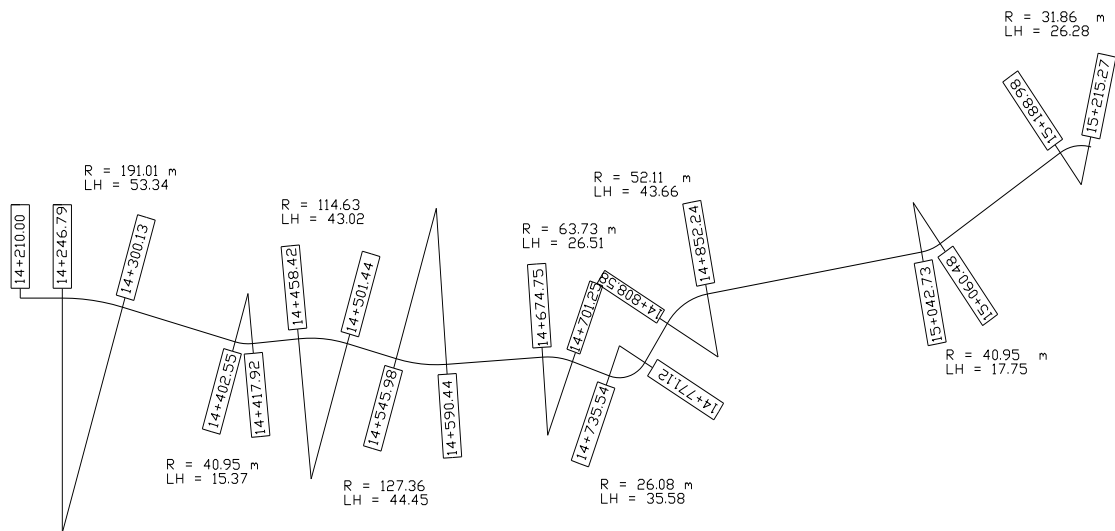
Los principales parámetros de la vía se encuentran en los siguientes rangos:

- Radio de curvatura (R): entre 23.92 y 381 metros.
- Longitud de curva horizontal (L_H): entre 40 y 120 metros.
- Coeficiente de variación de la longitud de curva vertical por unidad de porcentaje (K): entre 6.60 y 100 m/%.
- Pendiente longitudinal (S): entre -6.40 y 8.00 %. Con estos rangos se utilizan todas las ecuaciones de pronóstico de velocidad de operación (V_{85}) de curvas horizontales en pendiente.

En este tramo de vía también se presentan curvas horizontales combinadas con curvas verticales convexas con/sin limitaciones en la distancia de visibilidad, y curvas horizontales combinadas con verticales cóncavas.

Como primer paso se organizó de la información geométrica necesaria, de acuerdo con el diagrama de flujo de la figura 27. En las figuras 29 y 30 pueden observarse el diseño en planta y en perfil de la vía

Figura 29. Diseño en planta de la vía Patico – Coconuco.



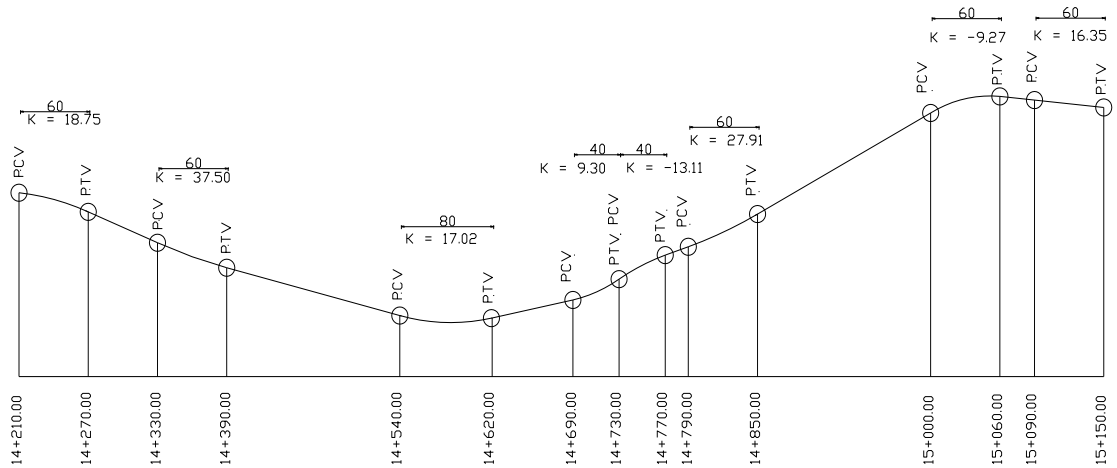
FUENTE: Elaboración propia

Tabla 40. Datos de diseño en planta de la vía Patico - Coconuco

PC	PT	Radio	L _H
14246.79	14300.13	191.010	53.34
14402.55	14417.92	40.950	15.37
14458.42	14501.44	114.630	43.02
14545.98	14590.44	127.360	44.45
14674.75	14701.25	63.730	26.51
14735.54	14771.12	26.080	35.58
14808.58	14852.24	52.110	43.66
15042.73	15060.48	1424.000	17.75
15188.98	15215.27	31.860	26.28

FUENTE: Elaboración propia

Figura 30. Diseño en perfil vía Patico – Coconuco.



FUENTE: Elaboración propia

Tabla 41. Datos del diseño en perfil de la vía Patico - Coconuco

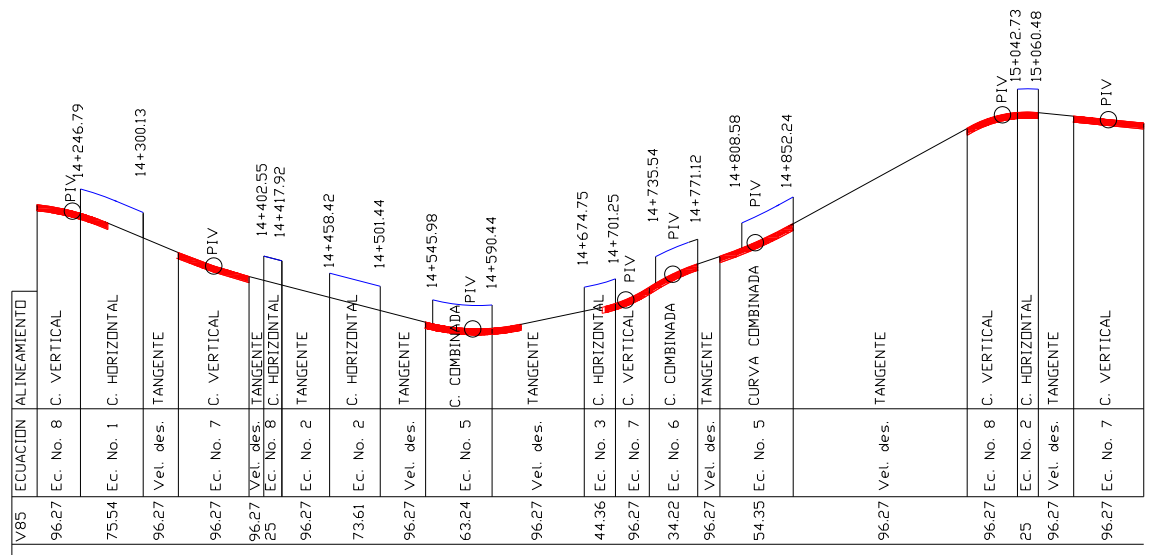
PCV	PTV			Lv	K
14210	14270	-0.01	-0.042	60	18.75
14330	14390	-0.042	-0.026	60	37.50
14540	14620	-0.026	0.021	80	17.02
14690	14730	0.021	0.064	40	9.30
14730	14770	0.064	0.034	40	13.11
14790	14850	0.034	0.055	60	27.91
15000	15060	0.055	-0.01	60	-9.27
15090	15150	-0.01	0.027	60	16.35

FUENTE: Elaboración propia

- Selección de la velocidad deseada. De acuerdo con los resultados de los estudios realizados en la primera fase de la presente investigación, la velocidad deseada en carreteras colombianas es de 96.27 km/h.
- Determinación de las velocidades de operación (V_{85}) de cada una de las curvas individuales y combinadas del tramo en estudio, utilizando las ecuaciones de pronóstico de la tabla 36.

Para realizar este paso es necesario la determinación de los alineamientos de acuerdo con la combinación de su geometría en planta y en perfil (Tabla 38). Con el propósito de apreciar gráficamente la asignación de velocidades de operación a los diferentes alineamientos utilizaremos un perfil de la vía modificado, montando sobre el mismo los alineamientos horizontales. En figura 31 se muestra la delimitación de los alineamientos y la asignación de las velocidades.

Figura 31. Perfil modificado de la vía Patuco – Coconuco y asignación de velocidades de operación.



FUENTE: Elaboración propia

Este es uno de los principales pasos en la elaboración del perfil de velocidades, ya que de este depende su configuración. Para este ejemplo consideraremos que una curva vertical se encuentra combinada con una horizontal cuando la abscisa del PIV de la primera se encuentra entre las abscisas del PC y del PT de la curva horizontal con la que se traslapa. En figura 31 se delimita cada alineamiento según la combinación de su diseño en

planta y en perfil de acuerdo con la tabla 38 de la página 114, mientras que en la tabla 42 se presentan los cálculos de la velocidad de operación.

Tabla 42. Tasas de variación de aceleraciones y desaceleraciones

Abs ini	Abs Final	alineamiento	Ecuación	Parámetros	Velocidades calculadas
14210	14246.79	Convexa SLDV	Ec. # 8	Vd	96.27
14246.79	14300.13	Horizontal (-9%;-4%)	Ec. # 1	R=191.01	77.26
14300.13	14330	Tangente	Velocidad deseada	Vd	96.27
14330	14390	Cóncava	Ec. # 7	Vd	96.27
14390	14402.55	Tangente	Velocidad deseada	Vd	96.27
14402.55	14417.92	Horizontal (-4%;0%)	Ec. # 2	R=40.95	15.41
14417.92	14458.42	Tangente	Velocidad deseada	Vd	96.27
14458.42	14501.44	Horizontal (-4%;0%)	Ec. # 2	R=114.63	73.62
14501.44	14540	Tangente	Velocidad deseada	Vd	96.27
14540	14590.44	Combinada Cóncava	Ec. # 5	R=127.36 LH=44.45	63.24
14590.44	14674.75	Tangente	Velocidad deseada	Vd	96.27
14674.75	14701.25	Horizontal (0%;4%)	Ec. # 3	R=63.73	44.36
14701.25	14730	Cóncava	Ec. # 7	Vd	96.27
14730	14771.12	Combinada Convexa	Ec. # 6	R=26.08 LH=35.58	34.23
14771.12	14790	Tangente	Velocidad deseada	Vd	96.27
14790	14852.24	Combinada Cóncava	Ec. # 5	R=52.11 LH=43.66	54.35
14852.24	15000	Tangente	Velocidad deseada	Vd	96.27
15000	15042.73	Convexa SLDV	Ec. # 8	Vd	96.27
15042.73	15060.48	Horizontal (-4%;0%)	Ec. # 2	R=40.95	15.41
15060.48	15090	Tangente	Velocidad deseada	Vd	96.27
15090	15150	Cóncava	Ec. # 7	Vd	96.27

FUENTE: Elaboración propia

- Comparación entre los valores de las velocidades anteriores (velocidad deseada y la velocidad de operación (V_{85})), y selección de la menor de ellas para cada elemento geométrico. En la tabla 43 se presentan los resultados numéricos, los cuales se representan de manera gráfica en el perfil de velocidades de operación (V_{85}) de la figura 32. En dicha figura se aprecia el perfil de velocidades sin los ajustes por aceleración.

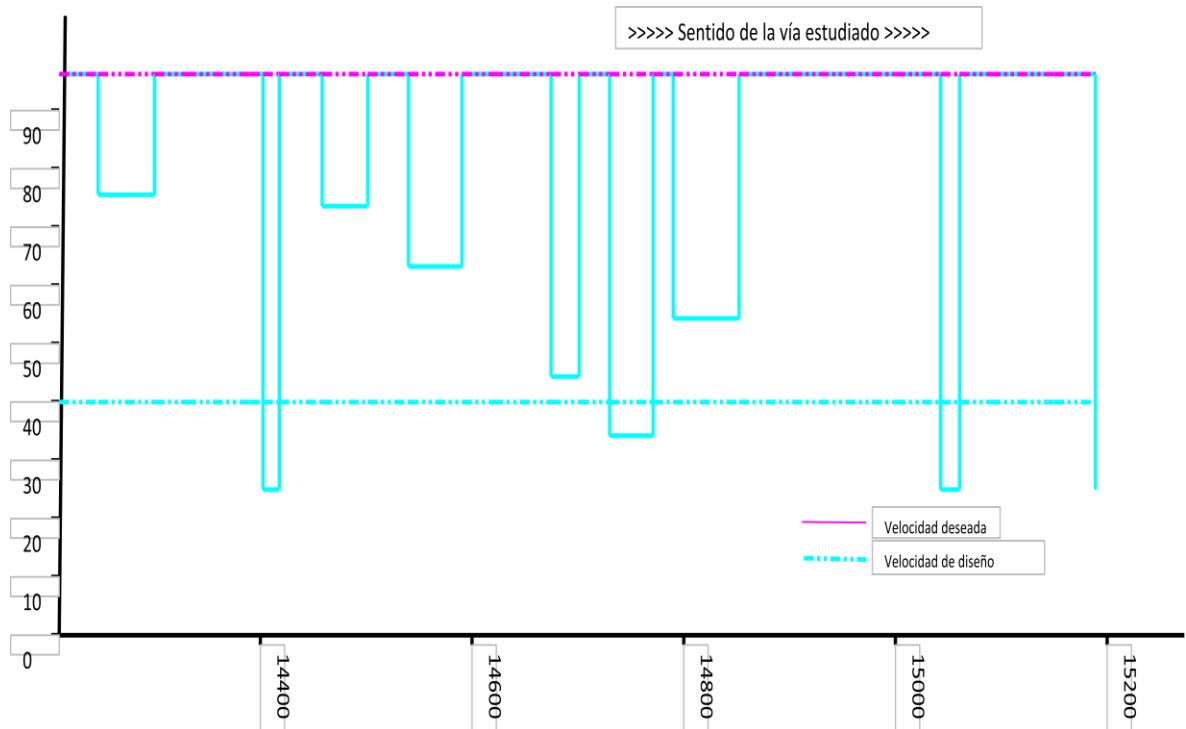
Si el cálculo de la velocidad resulta negativo ó menor a 25 km/h, se asigna al elemento como velocidad de operación el valor de 25 km/h. Esto se realiza porque se considera que la velocidad de operación en una curva no puede ser mayor que la velocidad de operación en tangente.

Tabla 43. Tasas de variación de aceleraciones y desaceleraciones

Abs ini	Abs Final	Velocidades corregidas
14210	14246.79	96.27
14246.79	14300.13	77.26
14300.13	14330	96.27
14330	14390	96.27
14390	14402.55	96.27
14402.55	14417.92	25.00
14417.92	14458.42	96.27
14458.42	14501.44	73.62
14501.44	14540	96.27
14540	14590.44	63.24
14590.44	14674.75	96.27
14674.75	14701.25	44.36
14701.25	14730	96.27
14730	14771.12	34.23
14771.12	14790	96.27
14790	14852.24	54.35
14852.24	15000	96.27
15000	15042.73	96.27
15042.73	15060.48	25.00
15060.48	15090	96.27
15090	15150	96.27

FUENTE: Elaboración propia

Figura 32. Perfil de velocidades de operación. Vía Patico – Coconuco.



FUENTE: Elaboración propia

- Ajuste de las velocidades por aceleración y desaceleración utilizando las ecuaciones de la tabla 39 de la página 117. Con los valores calculados se verifican las distancias disponibles para realizar las maniobras de desaceleración y aceleración antes y después de la curva seleccionada, y también se verifica si se presenta desaceleración forzada. En la tabla 44 se muestran las aceleraciones y desaceleraciones calculadas.

Tabla 44. Tasas de aceleraciones y desaceleraciones

Abs ini	Abs Final	alineamiento	Ecuación	Parámetros	Desaceleracion	Aceleración
14210	14246.79	Convexa SLDV	Ec. # 8			
14246.79	14300.13	Horizontal (-9%;-4%)	Ec. # 1	R=191.01	-0.029	0
14300.13	14330	Tangente	Velocidad deseada			
14330	14390	Cóncava	Ec. # 7			
14390	14402.55	Tangente	Velocidad deseada			
14402.55	14417.92	Horizontal (-4%;0%)	Ec. # 2	R=40.95	-1.00	0.54
14417.92	14458.42	Tangente	Velocidad deseada			
14458.42	14501.44	Horizontal (-4%;0%)	Ec. # 2	R=114.63	-1.00	0.54
14501.44	14540	Tangente	Velocidad deseada			
14540	14590.44	Combinada Cóncava	Ec. # 5		-1.00	0.54
14590.44	14674.75	Tangente	Velocidad deseada			
14674.75	14701.25	Horizontal (0%;4%)	Ec. # 3	R=63.73	-0.55	0.31
14701.25	14730	Cóncava	Ec. # 7			
14730	14771.12	Combinada Convexa	Ec. # 6		-1.00	0.54
14771.12	14790	Tangente	Velocidad deseada			
14790	14852.24	Combinada Cóncava	Ec. # 5		-1.00	0.54
14852.24	15000	Tangente	Velocidad deseada			
15000	15042.73	Convexa SLDV	Ec. # 8			
15042.73	15060.48	Horizontal (-4%;0%)	Ec. # 2	R=40.95	-1.00	0.54
15060.48	15090	Tangente	Velocidad deseada			
15090	15150	Cóncava	Ec. # 7			

FUENTE: Elaboración propia

Para determinar las distancias en las cuales se realizan los cambios de velocidades se utilizan las fórmulas del anexo 8. Como puede observarse en dicho anexo, los cambios de velocidades dependen de la distancia entre las curvas. Cabe mencionar que en aquellas curvas en las que su velocidad de operación es igual a la velocidad deseada, no se requieren ajustes por aceleración y

desaceleración. En la tabla 45 se presentan los cálculos realizados para determinar las distancias en las cuales se realizan los cambios de velocidad.

Tabla 45. Cálculo de las distancias de desarrollo de la aceleración y de la desaceleración

Abs fin n-1	Abs ini n	V ₈₅ n-1	V ₈₅ n	LSCA	Acel n-1	Desacel n	V ₈₅ n-1 corregida	V ₈₅ n corregida	Caso	Vel de Δ	Abs de Δ	Des Corregida
14210	14246.79	96.27	77.27	36.79	-	0.029			# 4			-3.48
14300.13	14402.44	77.26	25	102.42	0	1			# 4			2.01
14417.92	14458.42	25	73.62	40.50	0.54	1		34.52	# 6			
14501.44	14540	73.62	63.24	38.56	0.54	1	34.52	41.61	# 6			
14590.44	14674.75	63.24	44.36	84.31	0.54	0.55	41.61		# 2	49.46	14684.63	
14701.21	14730	44.36	34.23	28.75	0.31	1			# 4			1.068
14771.12	14790	34.23	54.35	18.88	0.54	1		37.89	# 6			
14852.24	15042.73	54.35	25	190.49	0.54	1	37.89		# 2	51.39	14956.65	
15060.40	-	25	96.27	139.52	0.54	-		43.34	# 6			

FUENTE: Elaboración propia

Debido a que el diseño de la carretera en estudio es de montaña se presentaron los casos #2, #4 y #6, de acuerdo con el anexo 8, los cuales se describen a continuación:

Caso # 2: En este caso los vehículos pueden alcanzar una velocidad mayor a la de las curvas que limitan el tramo, pero no se puede alcanzar la velocidad deseada debido a que la distancia entre las curvas es menor a la distancia necesaria para alcanzar dicha velocidad, es decir que la tangente es entre corta o mediana. El valor máximo de la velocidad de operación alcanzado no puede ser mantenido, y debe ser calculado ya que forma parte del perfil de velocidades de operación. La velocidad máxima está determinada por la aceleración de la curva n-1 y la desaceleración de la curva n

Caso #4: En este caso la desaceleración es mayor a la calculada, debido a que la distancia disponible entre las curvas es menor a la necesaria para alcanzar la velocidad de la curva n, por lo cual se debe aumentar la desaceleración.

Caso #6: En este caso el vehículo no puede alcanzar la velocidad de operación mayor de la curva siguiente con la aceleración que fue calculada de la curva n-1,

ya que la distancia disponible es menor a la necesaria para alcanzar dicha velocidad (curva n). Por lo tanto se calcula una nueva velocidad para la curva n con la aceleración de la curva n-1 y la distancia disponible entre ambas curvas, menor a la calculada para la curva n. En esta situación se considera que el conductor mantiene la aceleración hasta alcanzar la siguiente curva. La velocidad modificada será la utilizada en la elaboración del perfil de velocidad de operación.

Organizando las velocidades de operación y sus abscisas, obtenidas en el proceso anterior, en la tabla 46, se puede elaborar el perfil de velocidades de operación del tramo de vía estudiado, el cual se presenta en la figura 33.

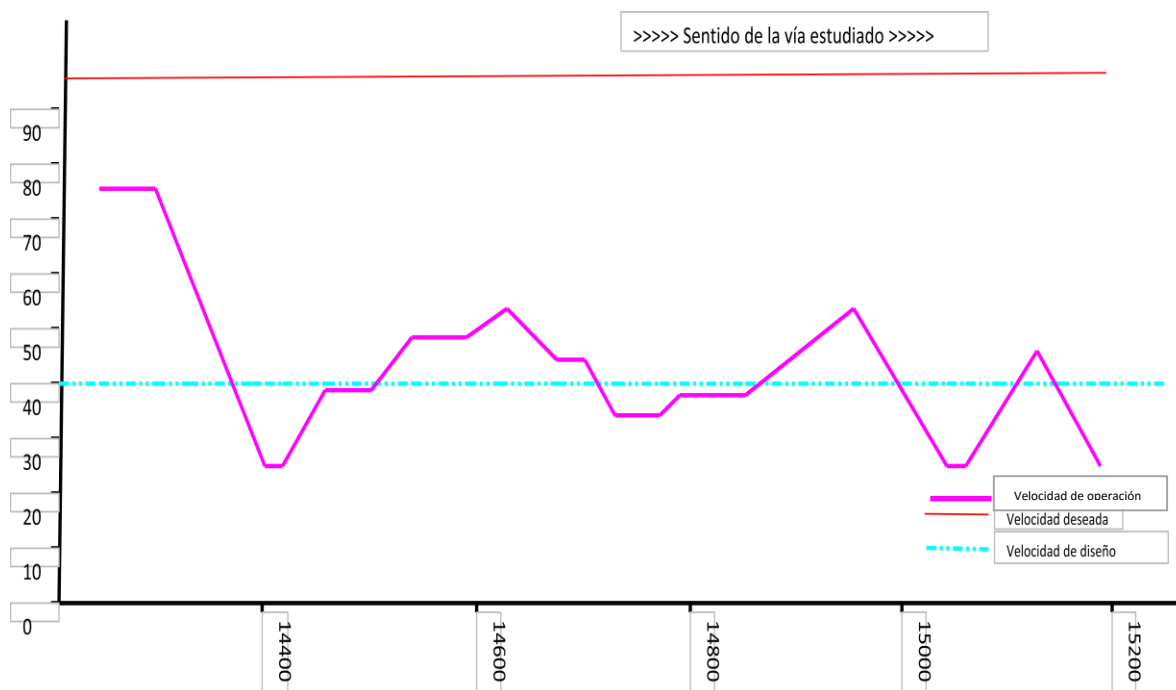
Tabla 46. Tasas de variación de aceleraciones y desaceleraciones

Abscisa	V ₈₅	Abscisa	V ₈₅	Abscisa	V ₈₅	Abscisa	V ₈₅
14210	96.27	14458.42	34.52	14674.75	44.36	14852.24	37.89
14246.79*	77.26	14501.44	34.52	14701.25	44.36	14956.65	51.39
14300.13	77.26	14540	41.61	14730	34.23	15042.73	25
14402.55*	25	14590.44	41.61	14771.12	34.23	15060.48	25
14417.92	25	14624.63	49.46	14790	37.89	15150	43.34

FUENTE: Elaboración propia

Para observar mejor el ejemplo realizado solamente se graficaron el perfil de velocidades de operación y el perfil con los ajustes por aceleración y desaceleración del primer kilómetro de la vía seleccionada (K 14 + 410 hasta K 15 + 255.27).

Figura 33. Perfil de velocidades de operación con los ajustes de velocidades por aceleración y desaceleración. Vía Patico – Coconuco



FUENTE: Elaboración propia

En el anexo 9 se incluye el perfil de velocidades de operaciones para todo el tramo considerado.

12.3 EJEMPLO DE LA EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA DEL DISEÑO GEOMÉTRICO

Para verificar la aplicabilidad de la metodología de evaluación de la consistencia del diseño geométrico en carreteras colombianas, desarrollada en la presente investigación, se estudiará el mismo tramo de la vía Patico – Coconuco, utilizando el perfil de velocidades elaborado en el numeral anterior.

También se evaluará la consistencia del diseño geométrico de esta misma vía utilizando el programa IHSDM, con el propósito de comparar los resultados de ambas metodologías, realizar ajustes al método desarrollado, obtener conclusiones del trabajo realizado y brindar recomendaciones para futuras investigaciones sobre este tema.

12.3.1 Evaluación de la consistencia de diseño aplicando la metodología desarrollada

Después de haber elaborado el perfil de velocidades de operación, se puede evaluar el diseño geométrico del tramo en estudio, utilizando los criterios de consistencias adoptados en la presente metodología y descritos en el numeral 12.1.5, La tabla 46 de la página 132, muestra las abscisas en donde se presentan cambios en las velocidades de operación y analizando estas variaciones podemos realizar la evaluación de la consistencia del diseño geométrico.

A continuación se presentan los resultados del análisis realizado:

- Diferencia entre las velocidades de operación y la velocidad de diseño: De acuerdo con los datos de la tabla 46, se interpola entre los valores consecutivos de velocidades de operación, segmentando este tramos en intervalos para determinar las abscisas iniciales y finales en donde el diferencial de velocidades cambia, de acuerdo con el criterio de evaluación, En la tabla 47 se presentan organizados por el valor de sus abscisas el resultado de la evaluación, aplicando el criterio de diferencia de velocidades de operación y de diseño.

Tabla 47. Diferencia entre las velocidades de operación y la velocidad de diseño

Abs ini	Absc Final	Condición	Abs ini	Absc Final	Condición
14210	14333.96	Deficiente	14868.56	14945.92	Bueno
14333.96	14353.55	Aceptable	14945.92	14961.17	Aceptable
14353.55	14373.15	Bueno	14961.17	14993.80	Bueno
14373.15	14531.23	V85<Vd	14993.80	15133.71	V85<Vd
14531.23	14713.61	Bueno	15133.71	15150	Bueno
14713.61	14868.56	V85<Vd			

FUENTE: Elaboración propia

Como puede observarse en la tabla anterior, las velocidades de operación presentan variaciones notorias con respecto a la velocidad de diseño. Se encuentran un tramo en el cual su diseño geométrico se considera deficiente, de acuerdo con el criterio aplicado, y otros en los cuales la velocidad de operación es inferior a la velocidad de diseño.

- Diferencia de velocidades de operación entre dos elementos consecutivos: De acuerdo con los datos de la tabla 46, se compara entre velocidades de elementos consecutivos. Esta diferencia se realiza entre aquellos elementos consecutivos de los cuales el primero presenta desaceleración. La aplicación de este criterio permite localizar elementos que presentan desaceleraciones forzadas. Cabe anotar que es necesario realizar la aplicación de este criterio en ambos sentidos de la vía, porque es posible que en un sentido no se presenten desaceleraciones forzadas pero en el otro sentido si. En la tabla 48 se pueden observar el resultado de la evaluación.

Tabla 48. Diferencia de velocidades de operación entre dos elementos consecutivos

Abscisa inicial	Abscisa final	ΔV_{85}	Condición
14210	14246.79	19.01	Aceptable
14402.55	14300.13	52.26	Deficiente
14674.75	14624.63	5.10	Bueno
14730	14701.21	10.13	Aceptable
15042.73	14956.65	26.39	Deficiente

FUENTE: Elaboración propia

Como puede observarse en la tabla anterior, existen dos puntos, que de acuerdo con el criterio aplicado, su diseño geométrico se considera deficiente. Esto quiere decir que en estos sitios se puede presentar desaceleración forzada, lo cual puede ser causa de accidentes en la vía.

- Desaceleraciones forzadas: Las aceleraciones y las desaceleraciones pueden observarse en la tabla 45, las cuales fueron calculadas y corregidas en el proceso de la elaboración del perfil de velocidades de operación. Los sitios que presentan desaceleración forzada suelen resaltarse con un asterisco en la tabla 46 con la cual se construye el perfil de velocidades de operación, pero para efectos prácticos del presente ejemplo en la 49 se muestran estos sitios.

Tabla 49. Sitios que presentan desaceleraciones forzadas

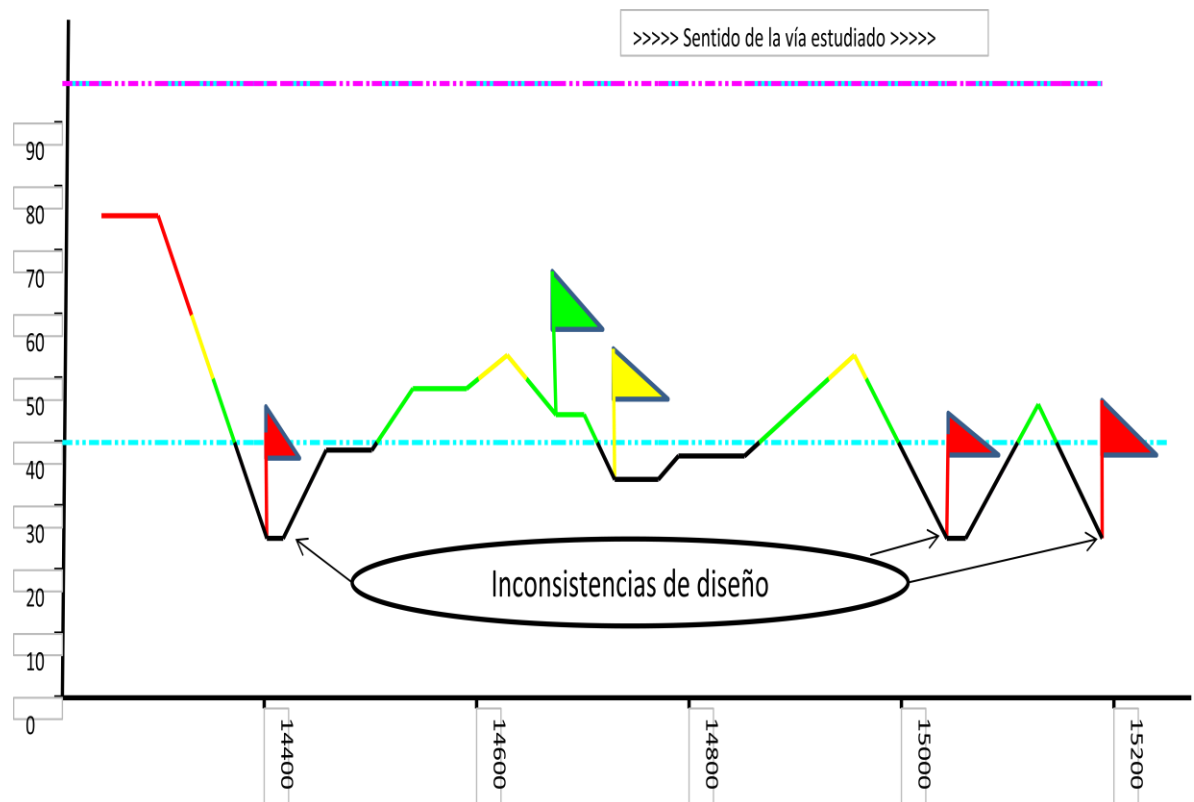
Abscisa inicial	Abscisa final	Desaceleración
14210	14246.79	3.45
14300.13	14402.55	2.01

FUENTE: Elaboración propia

De acuerdo con este criterio el diseño presente alguna deficiencia y debe ser analizado.

Los resultados obtenidos del proceso de evaluación del diseño geométrico del tramo estudiado también pueden mostrarse sobre el perfil de velocidades de operación elaborado en el numeral anterior, utilizando las convenciones descritas en la página 120, numeral 12.1.6.2 . A continuación se presenta en dicho perfil la evaluación realizada:

Figura 34. Evaluación de la consistencia del diseño geométrico en un tramo de la vía Patico – Coconuco



FUENTE: Elaboración propia

En la figura 34 se muestran los tramos del perfil de velocidades de operación del sector estudiado que presentan inconsistencias debidas a cambios de velocidades inaceptables entre elementos consecutivos..

En el perfil también se pueden observar los sectores donde la velocidad de operación es inferior a la velocidad de diseño y aquéllos cuyas velocidades son superiores en más de 20 km/h a este mismo parámetro.

En el tramo estudiado los vehículos no alcanzan la velocidad deseada y las velocidades de operación oscilan alrededor de un valor central que corresponde a la velocidad de diseño, pero se presentan con frecuencia elementos cuyas velocidades de operación son inferiores a dicho parámetro.

12.3.2 Evaluación de la consistencia de diseño aplicando IHSDM

La evaluación de la consistencia del diseño geométrico realizada al tramo de nuestro ejemplo, utilizando el programa IHSDM, arrojó resultados muy diferentes a los obtenidos anteriormente.

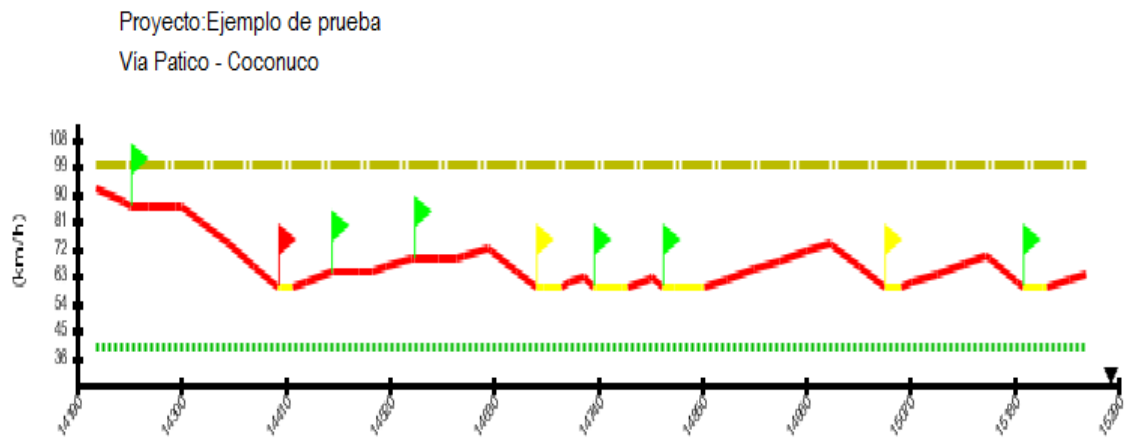
En la figura 35 se presenta el perfil de velocidades de operación del tramo estudiado, en el cual puede observarse de manera gráfica que las velocidades obtenidas no se ajustan a la geometría del tramo en estudio ni a sus parámetros de diseño.

Los resultados del IHSDM difieren con los obtenidos en la aplicación del método desarrollado, debido a que el IHSDM fue diseñado para carreteras que cumplen especificaciones diferentes a las colombianas; además, los modelos de pronóstico de velocidades y de aceleraciones nuestros fueron desarrollados con valores geométricos y parámetros de diseño que están por fuera del rango utilizados por ese programa.

Figura 35. Evaluación de la consistencia del diseño geométrico con IHSDM en un tramo de la vía Patico – Coconuco

REPORTE DE EVALUACIÓN DE CONSISTENCIA DE DISEÑO (HSDM)

PERFIL DE VELOCIDAD DE OPERACIÓN GENERADO POR IHSDM



NOTE: Speed profile does NOT account for intersections.

- Legend
- Intersections
 - Vertical Alignment (Elevation); m
 - Vertical Alignment Curvature K Value; m/%
 - Horizontal Alignment Degree of Curve; deg
 - Horizontal Alignment Radius; m
 - Desired Speed; km/h
 - Design Speed; km/h
 - V85 Speed; km/h; differential between design and V85 speed ≤ 10 km/h
 - V85 Speed; km/h; differential between design and V85 speed > 10 km/h, ≤ 20 km/h
 - V85 Speed; km/h; differential between design and V85 speed > 20 km/h
 - Criteria 2; V85 speed differential of adjacent horizontal elements ≤ 10 km/h
 - Criteria 2; V85 speed differential of adjacent horizontal elements > 10 km/h, ≤ 20 km/h
 - Criteria 2; V85 speed differential of adjacent horizontal elements > 20 km/h

FUENTE: Programa IHSDM(2008)

La tabla 50, generada por el programa IHSDM, muestra las abscisas de los sitios con inconsistencias de diseño. En el anexo 10 se presenta el archivo de los datos de entrada y el reporte completo de la evaluación de la consistencia del diseño geométrico con IHSDM.

Tabla 50. Ubicación de los sitios que presentan inconsistencias en su diseño geométrico realizada por IHSDM en un tramo de la vía Patíco – Coconuco

Station of max speed on preceding element	Max speed on preceding element (km/h)	Start Station of curve	Speed on curve (km/h)	Speed Differential (km/h)	Condition
14210.000	91.8	14246.790	86.6	5.2	1
14300.130	86.6	14402.550	60.0	26.6	3
14458.420	64.6	14458.420	64.6	0.0	1
14545.980	69.2	14545.980	69.2	0.0	1
14623.661	72.5	14674.750	60.0	12.5	2
14725.196	62.7	14735.540	60.0	2.7	1
14797.279	63.0	14808.580	60.0	3.0	1
14985.264	73.9	15042.730	60.0	13.9	2
15150.215	69.7	15188.980	60.0	9.7	1

FUENTE: Programa IHSDM (2008)

12.3.3 Utilización del programa SIMCAR para elaborar perfiles de velocidades de operación¹⁹

Una herramienta informática que podría ser utilizada para evaluar la consistencia de diseño geométrico es el programa computacional SIMCAR (Modelo analítico de simulación microscópica de carreteras de dos carriles), el cual fue desarrollado en la Universidad del Cauca. Un modelo microscópico de simulación consiste en un algoritmo en el que se le da unos valores iniciales a un grupo de ecuaciones y las actualiza en intervalos muy pequeños de tiempo, y los valores finales que resultan de cada intervalo son los iniciales para el intervalo siguiente. El programa analiza de manera realista los flujos de tráfico en carreteras de dos carriles, teniendo en

¹⁹ BUSTAMANTE MUÑOZ, Ary; SOLANO, Efraín de Jesús y ARBOLEDA VÉLEZ, Carlos Alberto. Op. Cit. p 37-46

cuenta las variables asociadas de la vía, los dispositivos de control de tráfico, el número de vehículos, el tipo de conductor y las características de los vehículos.

Para realizar lo anteriormente mencionado, el programa posee un modelo de asignación de las características de los vehículos que semeja la distribución de tráfico real, un conjunto de reglas lógicas de decisión que representan el comportamiento del conductor al maniobrar y un sistema de actualización de estados y eventos (entendiéndose por estado aquella situación en la que se encuentra un vehículo en un momento determinado, y evento al cambio de un estado a otro); además, considera de manera explícita las características aleatorias y determinísticas para cada unidad vehículo-conductor simulada.

El programa no evalúa la consistencia de diseño, ya que no fue concebido para realizar este tipo de estudio; sin embargo, de acuerdo con el diseñador de esta herramienta computacional, puede ser modificado para que la realice.

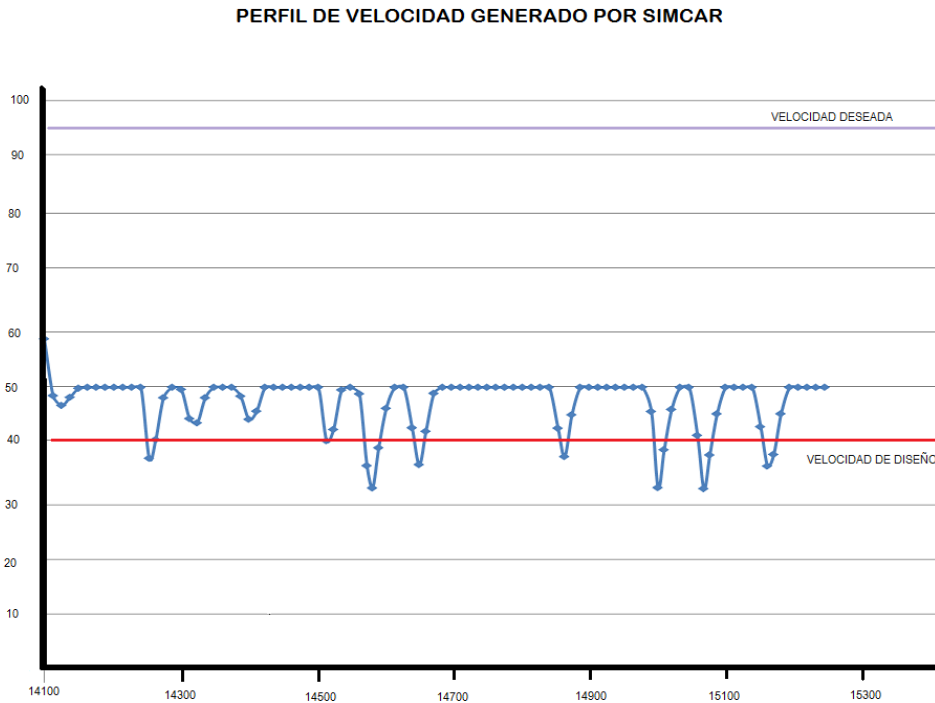
La principal diferencia entre la metodología desarrollada en la presente investigación y el diseño conceptual del programa SIMCAR radica en que, en la primera de ellas, las principales variables son estudiadas a partir de datos recopilados en campo, mientras que el programa computacional las estudia mediante un análisis microscópico.

El perfil de velocidades de operación se elabora afectando la velocidad del vehículo por factores establecidos para diferentes características geométricas de la vía (curvatura horizontal, curvatura vertical, pendientes, etc), tipo de vehículo, tipo de conductor; las aceleraciones y desaceleraciones son constantes a la entrada y salida de las curvas, dependiendo del tipo de vehículo utilizado en el análisis.

Lo recomendable es adoptar los modelos de velocidades y de aceleraciones obtenidos en la presente investigación e implementarlos en el programa para elaborar el perfil de velocidad.

En la figura 36 se puede observar el perfil de velocidades de la misma vía del ejemplo que estamos evaluando, generado por SIMCAR.

Figura 36. Perfil de velocidades de la vía Patico- Coconuco generado por SIMCAR



FUENTE: Programa SIMCAR (2008)

Se puede observar que las velocidades presentan una limitación (en 50 km/h) debido al tipo de vehículo, al tipo de terreno, al tipo de conductor y a la geometría de la vía pero no a la velocidad deseada ni a las tasa de aceleraciones establecidas. Sin embargo, en el perfil se pueden aplicar claramente los principales criterios de evaluación de consistencia de diseño como la diferencia de velocidad entre elementos consecutivos y la diferencia de la velocidad de operación con la velocidad de diseño. Aún así, el programa no localiza sitios con inconsistencias, ni califica el diseño de acuerdo con ella.

12.4 CONSIDERACIONES Y LIMITACIONES DEL MÉTODO DESARROLLADO

En la presente fase de la investigación (fase II) se desarrollaron ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación (V_{85}) en curvas verticales localizadas en rectas y en curvas horizontales combinadas con curvas verticales que presentan un traslapo significativo.

Como en todo estudio, la información disponible y la obtenida de campo es limitada, en ocasiones insuficiente para cubrir todas las variaciones del comportamiento de un fenómeno y todas las soluciones a un problema. Una de las limitaciones en el uso de las ecuaciones se presenta cuando se utilizan datos por fuera del rango de desarrollo de las mismas.

En el desarrollo de la metodología de evaluación del diseño geométrico de carreteras colombianas se realizaron las siguientes consideraciones:

- Velocidad de operación en curvas: La velocidad desarrollada por los vehículos en curva vertical ó en horizontal ó en combinada, se considera constante a lo largo de toda su longitud.
- Tipos de curvas verticales: Las curvas verticales se clasifican en cuatro tipos, de acuerdo con el manual de diseño geométrico colombiano²⁰. En la presente investigación se estudiaron solamente curvas tipo I (convexa con diferencia de pendientes positiva) y tipo III (cóncava con diferencia de pendientes negativa).
- La velocidad en rectas: En la fase I de la presente investigación se determinó que la velocidad sobre rectas corresponde al valor de la velocidad deseada, el cual es de 96.27 km/h.

²⁰ MINISTERIO DE TRANSPORTE, Instituto Nacional de Vías. Manual de diseño geométrico para carreteras, Santafé de Bogotá. 1998.

- Velocidad máxima en curvas: Con el propósito de mantener una coherencia en la metodología de la evaluación de la consistencia del diseño geométrico, se estableció que la velocidad máxima que puede presentarse en el centro de una curva corresponde al valor de la velocidad deseada. Esto se hace porque algunas de las ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación podrían arrojar valores superiores al de ésta.
- Velocidad mínima en curvas: La velocidad mínima en el centro de las curvas se establece en 25 km/h. Esta consideración se hace debido a que las ecuaciones de pronóstico de velocidad de operación en algunos casos arrojarían valores por debajo de 25 km/h, y en algunas ocasiones valores negativos. Esta velocidad fue el valor mínimo medido durante el desarrollo de la investigación.
- Longitud disponible para los cambios de velocidad: Corresponde a la distancia disponible para aplicar los cambios de velocidad por aceleración y desaceleración entre curvas (ver anexo 8); se establecen las siguientes:
 - Distancia entre el PC de la curva en estudio y el PT de la curva previa.
 - Distancia entre el PC de la curva en estudio y el PIV de la curva vertical CLDV previa (con limitaciones en la distancia de visibilidad). En curvas verticales CLDV los vehículos comienzan a acelerar a partir de su PIV, por lo tanto la distancia entre este punto y su PTV forma parte de la longitud disponible para cambios de velocidad.
 - Distancia entre el PCV de la curva vertical convexa CLDV en estudio y el PT de la curva previa.
 - Distancia entre el PCV de la curva vertical convexa CLDV en estudio y el PIV de la curva vertical convexa CLDV previa.
 - Las curvas verticales cóncavas y las convexas sin limitaciones en la distancia de visibilidad, de acuerdo con los resultados obtenidos en la

presente investigación, no influyen en las velocidades de operación y por lo tanto si una de ellas se ubica en una recta, su longitud será parte de la distancia disponible para realizar los cambios de velocidades necesarios.

Salvo los casos anteriormente mencionados no se realizan cambios de velocidad por aceleración y desaceleración dentro de curvas.

- Tasa de aceleración y desaceleración en curvas verticales y horizontales combinadas con verticales: Las ecuaciones de pronóstico de aceleraciones y desaceleraciones fueron desarrolladas a partir de información de campo recopilada en curvas horizontales con pendiente constante. Para las curvas verticales convexas con limitaciones en la distancia de visibilidad y horizontales combinadas con verticales, se adoptaron las tasas de aceleración y de desaceleración utilizadas en el programa computacional IHSDM.
- Tasas máximas de aceleración y desaceleración: Las ecuaciones de pronóstico de aceleración y de desaceleración desarrolladas en la primera fase arrojan valores máximos de 1.2 m/s^2 y -1.73 m/s^2 respectivamente. Aunque es normal observar mayores valores en campo, estas ecuaciones son útiles para realizar evaluaciones de consistencia de diseño geométrico.
- Tasas de aceleración y de desaceleración mayores que las calculadas: En ocasiones ocurre que la distancia disponible para realizar los cambios de velocidad es insuficiente, lo que puede señalarse en el método como una inconsistencia. Sin embargo, es necesario analizar estos casos más detalladamente utilizando el criterio de ingeniería, ya que los modelos desarrollados se basan en un rango limitados de datos de campo y pueden presentarse situaciones como:

- Los conductores pueden realizar los cambios de velocidad con valores de aceleración o de desaceleración más altos que los calculados.
 - Los conductores realizan parte del cambio de la velocidad dentro de las curvas.
- Traslado de curvas: Cuando se combinan las curvas horizontales con las verticales es necesario establecer un procedimiento para definir el valor de la velocidad que gobernará el elemento y que se graficará en el perfil de velocidades de operación (velocidad de la curva vertical, velocidad de la curva horizontal o la velocidad de la curva combinada). Además, este procedimiento debe establecer claramente cuándo se considera que dos curvas están traslapadas.

13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se describen las conclusiones y recomendaciones que se derivaron de los resultados obtenidos durante el desarrollo de la presente investigación.

13.1 CONCLUSIONES

- Con los resultados obtenidos en las dos fases que conforman la presente investigación, se completó el procedimiento para elaborar perfiles de velocidades de operación y se desarrolló un método para evaluar la consistencia de diseño geométrico para las condiciones topográficas y de tránsito predominantes en las carreteras colombianas.
- El método de evaluación de consistencia de diseño geométrico desarrollado se basa en el perfil de velocidades de operación, el cual es generado con las ecuaciones de pronóstico obtenidas.
- Los criterios de evaluación utilizados en el método son: los cambios de velocidad entre elementos geométricos consecutivos, las ratas de desaceleración forzadas y la diferencia entre la velocidad de operación y la de diseño. En la tabla 43 se indican los valores establecidos para aplicarlos.

Tabla 51. Criterios de evaluación de la consistencia de diseño geométrico

Criterios	Condiciones	Indicadores
Criterio 1	$0 \text{ km/h} \leq (V_{85} - V_{\text{diseño}}) \leq 10 \text{ km/h}$ $10 \text{ km/h} < (V_{85} - V_{\text{diseño}}) \leq 20 \text{ km/h}$ $20 \text{ km/h} < (V_{85} - V_{\text{diseño}})$	Diseño bueno Diseño aceptable Diseño deficiente
Criterio 2	$0 \text{ km/h} \leq (V_{85 \text{ Elemento 1}} - V_{85 \text{ Elemento 2}}) \leq 10 \text{ km/h}$ $10 \text{ km/h} < (V_{85 \text{ Elemento 1}} - V_{85 \text{ Elemento 2}}) \leq 20 \text{ km/h}$ $20 \text{ km/h} < (V_{85 \text{ Elemento 1}} - V_{85 \text{ Elemento 2}})$	Diseño bueno Diseño aceptable Diseño deficiente
Criterio 3	$0.54 < \text{Aceleración} \leq 0.89$ $0.89 < \text{Aceleración} \leq 1.25$ $\text{Aceleración} > 1.25$	Diseño bueno Diseño aceptable Diseño deficiente

FUENTE: Elaboración propia

- Para las curvas verticales cóncavas y convexas sin limitaciones en la distancia de visibilidad localizadas sobre rectas no se obtuvieron ecuaciones de pronóstico, lo cual coincide con el resultado obtenido por la FHWA en el desarrollo de su metodología. Para estos casos se adopta el valor de la velocidad deseada.
- En la presente fase se desarrollaron ecuaciones para pronosticar la velocidad de operación en curvas verticales localizadas en rectas, y en tramos donde se combinan curvas horizontales con curvas verticales. En la tabla 43 se presentan las ecuaciones obtenidas en las dos fases de la investigación.

Tabla 52. Resultados obtenidos en ambas fases de la investigación

Ec. No. (1)	Combinación en planta y en perfil del alineamiento	Ecuación (2)	No. de observ.	R ²
1	Curva Horizontal sobre pendiente -9% ≤ S < -4 % (3)	$V_{85} = 35.43 + 0.219R$	26	0.72
2	Curva Horizontal sobre pendiente -4% ≤ S < 9 % (3)	$V_{85} = 37.18 + 0.1R + 0.04R_{n-1}$	28	0.55
3	Curva horizontal combinada con curva vertical cóncava (4)	$V_{85} = 102.70 - \frac{730.39}{R} - \frac{1498.90}{L_H}$	15	0.84
4	Curva horizontal combinada con curva vertical convexa (4)	$V_{85} = 93.79 - \frac{867.61}{R} - \frac{935.62}{L_H}$	32	0.66
<p>(1) Número de la ecuación de pronóstico de velocidad para la combinación geométrica del alineamiento. (2) Donde V_{85} = Percentil 85 de velocidad de vehículo tipo autos (Km/h) K = Variación de la longitud de curva vertical por unidad de porcentaje (m/%) R = Radio de curva horizontal (m) S = Pendiente longitudinal (%) R_{n-1} = Radio de la curva horizontal previa (m) R^2 = Coeficiente de determinación múltiple (3) Ecuaciones desarrolladas en la fase I (4) Ecuaciones desarrolladas en la fase II</p>				
Velocidad deseada en tangentes largas = 96.27 km/h				
Desaceleración, d (m/s²)		Combinación en planta y en perfil del alineamiento		Aceleración, a (m/s²)
<u>Radio</u> 20 – 200	<u>d</u> 0.64ln(R)-3.33	1	Curva Horizontal sobre pendiente -9% ≤ S < -4 %	<u>Radio</u> 20 – 200 <u>d</u> 0.64ln(R)-3.33
145 – 550	0.27ln(R)-1.89	2	Curva Horizontal sobre pendiente 0 % ≤ S < 4 %	145 – 550 0.27ln(R)-1.89
20 – 200	0.78ln(R)-4.07	3	Curva Horizontal sobre pendiente -4% ≤ S < 9 %	20 – 200 0.78ln(R)-4.07
Donde: R= radio (m), S = Pendiente (%)				
Modelos de aceleración y desaceleración desarrollados en la fase I				

FUENTE: Elaboración propia

- Se desarrolló una sola ecuación de pronóstico de velocidades de operación para los dos tipos de curvas verticales convexas (con y sin limitaciones en la distancia de visibilidad) combinadas con curva horizontal.
- El resultado del proceso de validación de todas las ecuaciones de pronóstico de velocidades (V_{85}) desarrolladas en la presente investigación fue de aceptación.
- Las variables geométricas independientes que presentaron mayor correlación con la velocidad de operación (V_{85}) fueron el radio y la longitud de curva horizontal, representados en las ecuaciones de regresión por sus inversos multiplicativos ($1/R$) y ($1/L_H$).
- Los resultados del proceso de validación de las ecuaciones de pronóstico de velocidades del módulo de evaluación de consistencia del programa IHSDM fueron de aceptación, pero deben trabajarse utilizando valores de los datos de entrada dentro del rango con el que se desarrollaron.
- La aplicación del IHSDM en carreteras colombianas arrojó resultados que no corresponden a nuestra realidad, ya que trabaja con una velocidad mínima de 60 km/h, y modelos de velocidades y de desaceleraciones que fueron desarrollados con parámetros geométricos muy diferentes a los prevalecientes en Colombia.
- El programa SIMCAR permite obtener perfiles de velocidad de operación que podrían utilizarse para aplicar la metodología desarrollada.

13.2 RECOMENDACIONES

- Mejorar los modelos de pronóstico de velocidades desarrollados, realizando mediciones en sitios con geometrías que no se consideraron en la presente investigación, para aumentar el rango de aplicación de la metodología.
- Recopilar información en diferentes sitios del país para verificar la aplicabilidad del método, ya que las carreteras estudiadas en esta segunda fase están ubicadas en el departamento del Cauca y conviene validar de manera más amplia el procedimiento.
- Es conveniente desarrollar un procedimiento mediante el cual se identifiquen los elementos que no cumplen las especificaciones de diseño, ya que pueden pasar desapercibidos por el método, y realizar una mejor evaluación de la consistencia del diseño.
- Para implementar el método de evaluación de la consistencia del diseño geométrico es necesario desarrollar una herramienta computacional que elabore perfiles de velocidad de operación, que aplique los criterios de evaluación, detecte las inconsistencias de diseño y las reporte de manera gráfica y posicional.
- Ampliar el programa SIMCAR para evaluar la consistencia del diseño geométrico con el método desarrollado.
- Estudiar el modelo microscópico de simulación del tráfico TWOPAS, o un método alternativo, para considerar el efecto de las pendientes prolongadas sobre la velocidad de los vehículos.

BIBLIOGRAFÍA

BUSTAMANTE MUÑOZ, Ary Fernando; SOLANO, Efraín de Jesús y ARBOLEDA VÉLEZ, Carlos Alberto. Simcar modelo para simular los efectos de la circulación de vehículos en vías de dos carriles. En: Revista Ingeniería hoy. Popayán. No.24, junio de 2006. p. 37 - 46

FITZPATRICK, K.; WOOLDRIDGE, M.; TSIMHONI, O.; COLLINS, J.; GREEN, P.; BAUER, K.; PARMA, K.; KOPPA, R.; HARWOOD, D.; ANDERSON, I.; KRAMMES, R. and POGGIOLI, B. Alternative design consistency rating methods for two-lane rural highways. Final report FHWA – RD – 99 – 172. Enero de 1999

FITZPATRICK, K. con contribución de (en orden alfabético): ANDERSON, I.; BAUER, K.; COLLINS, J.; ELEFTERIADOU, L.; GREEN, P.; HARWOOD, D.; IRIZARRY, N.; KOPPA, R.; KRAMMES, R.; MCFADDEN, J.; PARMA, K.; PASSETTI, K.; POGGIOLI, B.; TSIMHONI, O. and WOOLDRIDGE, M. Evaluation of design consistency methods for two-lane rural highways, Executive summary. FHWA – RD – 99 – 173. Junio de 1999

FITZPATRICK, K.; ELEFTERIADOU, L; Harwood, D.; COLLINS, J.; McFADDEN, J.; ANDERSON, I.; KRAMMES, R.; IRIZARRY, N.; PARMA, K.; PASSETTI, K. and BAUER, K. Speed prediction for two-lane rural highways. Final report FHWA – RD – 99 – 171. Junio de 1999

Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM), Design consistency module (DCM) Engineer's manual. Federal Highway Administration (FHWA). IHSDM Version 2.05b. March 7 2003

Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM), Design consistency module (DCM) User's manual. Federal Highway Administration (FHWA). IHSDM Version 2.05b. March 7 2003

Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM), IHSDM Highway model. Federal Highway Administration (FHWA). IHSDM Version 2.05b. March 7 2003

Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM), IHSDM User's manual. Federal Highway Administration (FHWA). IHSDM Version 2.05b. March 7 2003

Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM), Installation manual. Federal Highway Administration (FHWA). IHSDM Version 2.05b. March 7 2003

Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM), Running IHSDM Software manual. Federal highway administration (FHWA). IHSDM Version 2.05b. March 7 2003

MELO BENAVIDES, John. Desarrollo de un método para evaluar la consistencia del diseño geométrico de carreteras en Colombia basado en el perfil de velocidades de operación, fase I. Popayán 2005. Tesis de maestría (Magister en ingeniería de vías terrestres). Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.

MINISTERIO DE TRANSPORTE, Instituto Nacional de Vías. Manual de diseño geométrico para carreteras. Santafé de Bogotá 1998

MONTGOMERY, Douglas y RUNGER, George. Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. 2 ed. México: Limusa, 2005

Techbrief, evaluation of design consistency Methods for two-lane rural highways. FHWA – RD – 99 – 174. Noviembre de 1999

SÁNCHEZ ORDONEZ, José Fernando. y CASTRO MALPICA, María. Procedimientos de evaluación de la consistencia de trazado de las carreteras: *IHSDM*. En: Revista Rutas. Madrid-España. Volumen 96. Mayo-Junio 2003. p 5 – 14.

ANEXOS

Anexo 1. Archivo Maestro

Anexo 2. Registro de mediciones de velocidades en campo

Anexo 3. Validación de las ecuaciones de pronóstico de velocidades de operación del IHSDM

Anexo 4. Análisis de regresión de las ecuaciones preliminares para pronosticar velocidades de operación

Anexo 5. Validación de las ecuaciones preliminares para pronosticar velocidades de operación

Anexo 6. Análisis de regresión de las ecuaciones para pronosticar velocidades de operación

Anexo 7. Prueba F a las ecuaciones para pronosticar velocidades de operación de curvas horizontales combinadas con curvas verticales convexas

Anexo 8. Ajustes de velocidades por aceleración y desaceleración.

Anexo 9. Ejemplo de aplicación del método desarrollado para vías colombianas

Anexo 10. Ejemplo con IHSDM.

Anexo 11. Planos (en medio magnético, 1 CD)