

**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**

JOHN ANDRÉS MELO BENAVIDES



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
INSTITUTO DE POSGRADOS EN INGENIERIA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE VÍAS TERRESTRES
POPAYÁN
2006**

**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**

JOHN ANDRÉS MELO BENAVIDES

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de
Magíster en Ingeniería de Vías Terrestres**

Asesor:

**Ingeniero José Fernando Sánchez Ordoñez
Docente Departamento De Vías Y Transportes**



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
INSTITUTO DE POSGRADOS EN INGENIERIA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE VÍAS TERRESTRES
POPAYÁN
2006**

Nota De Aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Popayán 30 de Noviembre de 2006

Dedicada a mis padres por su apoyo incondicional, a mis hermanos Ricardo y Giovanni, en especial a la memoria Javier quien esta presente en cada uno de mis logros y me inspira para alcanzar mis metas.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor de tesis Ingeniero José Fernando Sánchez Ordóñez por su dedicación y colaboración en el desarrollo de éste trabajo.

A los docentes de UNICAUCA que compartieron sus conocimientos para ilustrar las bases de este trabajo

Al Instituto de Posgrados en Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, en especial al Ingeniero Ary Fernando Bustamante.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS.	V
LISTA DE FIGURAS.	VI
LISTA DE ANEXOS.	VII
NOMENCLATURA	VIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. JUSTIFICACIÓN	3
3. OBJETIVOS.	7
3.1 OBJETIVO GENERAL.	7
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	7
4. ALCANCE.	8
5. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.	9
6. MARCO TEÓRICO.	15
6.1 DEFINICIONES.	15
6.1.1 Carretera.	15
6.1.2 Carretera típica de terreno plano.	15
6.1.3 Carretera típica de terreno ondulado.	15
6.1.4 Carretera típica de terreno montañoso.	15
6.1.5 Carretera típica de terreno escarpado.	15
6.1.6 Velocidad a flujo libre.	16
6.1.7 Velocidad instantánea.	16
6.1.8 Velocidad de operación.	16
6.1.9 Velocidad puntual.	16
6.1.10 Consistencia del diseño.	16
6.1.11 Perfil de velocidad.	16
6.1.12 IHSDM.	16
6.1.13 TWOPAS.	17
6.2 MEDIDAS DE LA CONSISTENCIA DEL DISEÑO.	17
6.2.1 Perfil de velocidad.	18
6.3 IHSDM.	19

6.3.1	Módulo de consistencia del diseño de IHSDM.	21
6.3.2	Procedimiento para determinar el perfil de velocidades.	23
6.3.3	Evaluación de la consistencia del diseño.	42
6.3.4	Datos requeridos.	43
7.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.	45
7.1.	RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA.	45
7.2	RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN PRIMARIA.	46
7.2.1	Información geométrica.	46
7.2.2	Datos de velocidad.	50
7.3	VALIDACIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN de V_{85} PLANTEADOS EN EL ESTUDIO DEL IHSDM PARA SU USO EN COLOMBIA.	57
7.3.1	Validación de modelos de predicción de V_{85} para curvas horizon_ tales en pendientes entre 0 y 4%.	59
7.3.2	Validación de modelos de predicción de V_{85} para curvas horizon_ tales en pendientes entre 4 y 9%.	68
7.3.3	Validación de modelos de predicción de V_{85} para curvas horizon_ tales en pendientes entre -9 y -4%.	75
7.4	PLANTEAMIENTO DE LOS MODELOS PARA PREDECIR V_{85} EN CARRETERAS COLOMBIANAS	82
7.4.1	Modelos de predicción de V_{85} para curvas horizontales en pen_ dientes entre 4 y 9%.	83
7.4.2	Modelos de predicción de V_{85} para curvas horizontales en pendientes entre -9 y -4%.	89
7.4.3	Determinación de la velocidad deseada.	94
7.5	VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN DE ACELERACIÓN PLANTEADOS EN EL ESTUDIO DEL IHSDM PARA SU USO EN COLOMBIA.	95
7.6	PLANTEAMIENTO DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN DE ACELERACIÓN PARA SU USO EN COLOMBIA.	101
7.6.1	Modelos de regresión usando todos los radios de curvatura para cada tipo de pendiente	110

7.6.2 Modelos de regresión usando todos los radios de curvatura para todo tipo de pendiente	113
7.6.3 Modelo de tasas de aceleración máxima promedio	115
8. EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA	124
8.1 EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA CON IHSDM	126
8.2 EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA CON LOS MODELOS DESARROLLADOS EN ÉSTA INVESTIGACIÓN.	130
RESULTADOS DE LA INVESTIGACION.	133
CONCLUSIONES.	137
RECOMENDACIONES.	139
BIBLIOGRAFÍA.	140
ANEXOS.	142

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Criterios de selección de tramos de estudio.	9
Tabla 2	Localización de las carreteras y tramos para el estudio.	10
Tabla 3	Ecuaciones para estimar V_{85} considerando la geometría en planta y perfil.	25
Tabla 4	Clasificación de los vehículos por el modelo TWOPAS.	27
Tabla 5	Ecuaciones de rendimiento para automóviles del modelo TWOPAS.	28
Tabla 6	Tasas de aceleración y desaceleración del modelo IHSDM.	32
Tabla 7	Ecuaciones para determinar las variables consideradas en el ajuste del perfil de V_{85} considerando la aceleración pronosticada.	40
Tabla 8	Matriz de los sitios de estudio.	47
Tabla 9	Localización de curvas horizontales en terreno plano.	48
Tabla 10	Localización de curvas horizontales en terreno montañoso.	49
Tabla 11	Localización de rectas en terreno plano.	50
Tabla 12	Desviación estándar estimada de pruebas piloto.	53
Tabla 13	Tamaño mínimo de la muestra para cada combinación geométrica considerada.	54
Tabla 14	Ecuaciones para estimar V_{85} considerando sólo el alineamiento horizontal	60
Tabla 15	V_{85} observado y V_{85} pronosticado utilizando los modelos de predicción para curvas horizontales en pendientes entre 0 y 4%	61

Tabla 16	Evaluación de los modelos de predicción de V_{85} para curvas horizontales en pendientes entre 0 y 4% utilizando MSE, DMA, DMA%, BIAS y CHI cuadrado	67
Tabla 17	V_{85} observado y V_{85} pronosticado utilizando los modelos de predicción para curvas horizontales en pendientes entre 4 y 9%	69
Tabla 18	Evaluación de los modelos de predicción de V_{85} para curvas horizontales en pendientes entre 4 y 9% utilizando MSE, DMA, DMA%, BIAS y CHI cuadrado empleando curvas con radio mayor de 50 m.	74
Tabla 19	V_{85} observado y V_{85} pronosticado utilizando los modelos de predicción para curvas horizontales en pendientes entre -9 y -4%	76
Tabla 20	Evaluación de los modelos de predicción de V_{85} para curvas horizontales en pendientes entre -9 y -4% utilizando MSE, DMA, DMA%, BIAS y CHI cuadrado empleando curvas con radio mayor de 50 m.	81
Tabla 21	Modelos planteados para la predicción de V_{85} en curvas horizontales sobre pendientes entre 4 y 9%.	86
Tabla 22	Resumen de los resultados de la regresión múltiple para los modelos planteados en curvas horizontales sobre pendientes entre 4 a 9%.	88
Tabla 23	Modelos planteados para la predicción de V_{85} en curvas horizontales sobre pendientes entre -9 a -4%.	91
Tabla 24	Resumen de los resultados de la regresión múltiple para los modelos planteados en curvas horizontales sobre pendientes entre -9 a -4%.	92
Tabla 25	Localización de las rectas para determinar la velocidad deseada.	94
Tabla 26	Cálculo de las aceleraciones máximas de campo y del modelo IHSDM en curvas entre 0 y 4%	97
Tabla 27	Cálculo de las aceleraciones máximas de campo y del modelo IHSDM en curvas entre -9 y -4%	98

Tabla 28	Cálculo de las aceleraciones máximas de campo y del modelo IHSDM en curvas entre 4 y 9%	99
Tabla 29	Evaluación del modelo de aceleraciones de IHSDM utilizando MSE, DMA, DMA%, BIAS y CHI cuadrado	100
Tabla 30	Regresiones de los modelos de aceleración y deceleración para cada rango de pendiente	113
Tabla 31	Tasa media de aceleración en curvas horizontales con radio de curvatura menor de 50 m	116
Tabla 32	Tasa media de aceleración en curvas horizontales con radio de curvatura entre 50 y 100 m	116
Tabla 33	Tasa media de aceleración en curvas horizontales con radio de curvatura mayor de 100 m	117
Tabla 34	Tasa media de deceleración en curvas horizontales con radio de curvatura menor de 50 m.	118
Tabla 35	Tasa media de deceleración en curvas horizontales con radio de curvatura entre 50 y 100 m	118
Tabla 36	Tasa media de deceleración en curvas horizontales con radio de curvatura mayor de 100 m	119
Tabla 37	Evaluación estadística de los modelos de predicción de aceleración y deceleración en curvas horizontales desarrollados con V_{85} de campo	121
Tabla 38	Radios de curvatura recomendados para la utilización de los modelos de predicción de aceleración y deceleración	122

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Muertes por accidentes de tránsito en Colombia..	3
Figura 2	Muertes y lesiones por accidentes de tránsito en carreteras colomb_ bianas 1989 –2000.	4
Figura 3	Objeto de colisión en muertes por accidentes de tránsito en Colom_ bia 1996-2003.	4
Figura 4	Tipo de vehículo involucrado en muerte por accidente de tránsito en Colombia 2003.	5
Figura 5	Localización de la zona de estudio en el país.	11
Figura 6	Localización de los tramos de estudio en la Territorial Cauca.	12
Figura 7	Localización de los tramos de estudio en la Territorial Valle	13
Figura 8	Localización de los tramos de estudio en la Territorial Quindío.	14
Figura 9	Diagrama de flujo del funcionamiento del modulo de consistencia del diseño de IHSDM.	22
Figura 10	Diagrama de flujo para determinar el perfil de velocidades utilizando el modelo IHSDM	23
Figura 11	Diagrama de flujo para estimar V_{85} usando las ecuaciones de la Ta_ bla 3.	25
Figura 12	Perfil de velocidades por efecto de la curvatura	26
Figura 13	Procedimiento para calcular la velocidad limitada por pendiente utilizando las ecuaciones del modelo TWOPAS.	30
Figura 14	Perfil de velocidades por efecto de la pendiente.	31
Figura 15	Perfil de velocidades con base en la predicción de V_{85}	31

Figura 16	Ajuste del perfil de V_{85} utilizando las aceleraciones pronosticadas Caso 1 : $LSC_a > X_{fa} + X_{fd}$	34
Figura 17	Ajuste del perfil de V_{85} utilizando las aceleraciones pronosticadas Caso 2 : $LSC_a < X_{fa} + X_{fd}$ y $LSC_a > X_{cd}$	35
Figura 18	Ajuste del perfil de V_{85} utilizando las aceleraciones pronosticadas Caso 3 : $LSC_a = X_{cd}$	36
Figura 19	Ajuste del perfil de V_{85} utilizando las aceleraciones pronosticadas Caso 4 : $LSC_a < X_{cd}$	37
Figura 20	Ajuste del perfil de V_{85} utilizando las aceleraciones pronosticadas Caso 5 : $LSC_a > X_{ca}$	38
Figura 21	Ajuste del perfil de V_{85} utilizando las aceleraciones pronosticadas Caso 6 : $LSC_a < X_{ca}$	39
Figura 22	Diagrama de flujo para ajustar el perfil de V_{85} con las aceleraciones pronosticadas.	41
Figura 23	Puntos considerados para medir velocidades en curvas horizontales con recta precedente corta	51
Figura 24	Puntos considerados para medir velocidades en curvas horizontales con recta precedente larga.	51
Figura 25	Puntos considerados para medir velocidades en curvas verticales convexas con limitación en la distancia de visibilidad.	52
Figura 26	Puntos considerados para medir velocidades en curvas verticales cóncavas sin limitación en la distancia de visibilidad	53
Figura 27	Radar FALCON.	55
Figura 28	Ángulo de incidencia ϕ entre la trayectoria del vehículo y la visual del radar.	57

Figura 29	Relación entre V_{85} Observado y V_{85} pronosticado por el modelo de IHSDM para curvas horizontales en pendientes entre 0 y 4%	63
Figura 30	Relación entre V_{85} Observado y V_{85} pronosticado por los modelos de Lamm, Lamm y Choueiri, Islam y Seneviratne, Ottesen y Krammes(3) para curvas horizontales en pendientes entre 0 y 4%.	64
Figura 31	Relación entre V_{85} Observado y V_{85} pronosticado por los modelos de McFadden y Elefteriadou, Voigt, Morrall y Talarico, Gibreel et para curvas horizontales en pendientes entre 0 y 4%	65
Figura 32	Relación entre V_{85} Observado y V_{85} pronosticado por los modelos de Krammes et., Ottesen y Krammes (1)(3), Kanellaidis et al., y Gibreel et. para curvas horizontales en pendientes entre 0 y 4%	66
Figura 33	Relación entre V_{85} observado y V_{85} pronosticado por el modelo de IHSDM para curvas horizontales en pendientes entre 4 y 9%.	70
Figura 34	Relación entre V_{85} Observado y V_{85} pronosticado por los modelos de Lamm, Lamm y Choueiri, Islam y Seneviratne, Ottesen y Krammes(3) para curvas horizontales en pendientes entre 4 y 9%.	71
Figura 35	Relación entre V_{85} Observado y V_{85} pronosticado por los modelos de McFadden y Elefteriadou, Voigt, Morrall y Talarico, Gibreel et para curvas horizontales en pendientes entre 4 y 9%.	72
Figura 36	Relación entre V_{85} Observado y V_{85} pronosticado por los modelos de Krammes et., Ottesen y Krammes (1)(3), Kanellaidis et al. y Gibreel et. para curvas horizontales en pendientes entre 4 y 9%	73
Figura 37	Relación entre V_{85} observado y V_{85} pronosticado por el modelo de IHSDM para curvas horizontales en pendientes entre -9 y -4%.	77
Figura 38	Relación entre V_{85} Observado y V_{85} pronosticado por los modelos de Lamm, Lamm y Choueiri, Islam y Seneviratne, Ottesen y Krammes(3) para curvas horizontales en pendientes entre -9 y -4%	78

Figura 39	Relación entre V_{85} Observado y V_{85} pronosticado por los modelos de McFadden y Elefteriadou, Voigt, Morrall y Talarico, Gibreel et para curvas horizontales en pendientes entre -9 y -4%.	79
Figura 40	Relación entre V_{85} Observado y V_{85} pronosticado por los modelos de Krammes et., Ottesen y Krames (1)(3), Kanellaidis et al. y Gibreel et. para curvas horizontales en pendientes entre -9 y -4%	80
Figura 41	Correlación entre V_{85} y radio de curvatura para pendientes entre 4 y 9%.	84
Figura 42	Correlación entre V_{85} y el grado de curvatura para pendientes entre 4 y 9%	84
Figura 43	Correlación entre V_{85} y el inverso de la deflexión para pendientes entre 4 y 9%.	85
Figura 44	Correlación entre V_{85} y radio de curvatura para pendientes entre -9 y -4%.	89
Figura 45	Correlación entre V_{85} y el grado de curvatura para pendientes entre -9 y -4%	89
Figura 46	Correlación entre V_{85} y el inverso de la deflexión para pendientes entre -9 y -4%	90
Figura 47	Relación entre V_{85} en el centro de la curva y radio para curvas horizontales en pendientes entre 0 y 4%.	102
Figura 48	Relación entre V_{85} en el centro de la curva y radio para curvas horizontales en pendientes entre 4 y 9%	102
Figura 49	Relación entre V_{85} en el centro de la curva y radio para curvas horizontales en pendientes entre -9 y -4%.	103
Figura 50	Perfil de velocidades para curvas horizontales con radio menor de 50 m en pendientes entre 4 y 9%.	104

Figura 51	Perfil de velocidades para curvas horizontales con radio entre 50 y 100 m en pendientes entre 4 y 9%	104
Figura 52	Perfil de velocidades para curvas horizontales con radio mayor de 100 m en pendientes entre 4 y 9%	105
Figura 53	Perfil de velocidades para curvas horizontales con radio menor de 50 m en pendientes entre -9 y -4%.	105
Figura 54	Perfil de velocidades para curvas horizontales con radio entre 50 y 100 m en pendientes entre -9 y-4%.	106
Figura 55	Perfil de velocidades para curvas horizontales con radio mayor de 100 m en pendientes entre 4 y 9%	106
Figura 56	Perfil de velocidades para curvas horizontales con radio menor 200 m en pendientes entre 0 y 4%.	107
Figura 57	Perfil de velocidades para curvas horizontales con radio entre 200 y 300 m en pendientes entre 0 y 4%	107
Figura 58	Perfil de velocidades para curvas horizontales con radio entre 300 y 400 m en pendientes entre 0 y 4%.	108
Figura 59	Perfil de velocidades para curvas horizontales con radio mayor a 400 m en pendientes entre 0 y 4%	108
Figura 60	Modelo de predicción de aceleración en curvas horizontales sobre pendientes entre 0 y 4%.	110
Figura 61	Modelo de predicción de deceleración en curvas horizontales sobre pendientes entre 0 y 4%	110
Figura 62	Modelo de predicción de aceleración en curvas horizontales sobre pendientes entre 4 y 9%.	111
Figura 63	Modelo de predicción de deceleración en curvas horizontales sobre pendientes entre 4 y 9%.	111

Figura 64	Modelo de predicción de aceleración en curvas horizontales sobre pendientes entre -4 y -9%.	112
Figura 65	Modelo de predicción de deceleración en curvas horizontales sobre pendientes entre - 4 y -9%.	112
Figura 66	Modelo de predicción de aceleración en curvas horizontales sobre pendientes entre - 9 y 9%	114
Figura 67	Modelo de predicción de deceleración en curvas horizontales sobre pendientes entre -9 y 9%.	114
Figura 68	Resultados de la evaluación de consistencia del tramo de la carretera 2503-0 con IHSDM	128
Figura 69	Detalle del perfil de V_{85} generado por IHSDM.	129
Figura 70	Perfil de V_{85} generado por los modelos desarrollados en ésta investigación	131

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1	Análisis de regresión múltiple para modelos de predicción de V_{85} en pendiente entre 4 y 9%.	142
Anexo 2	Análisis de regresión múltiple para modelos de predicción de V_{85} en pendiente entre -9 y -4%.	153
Anexo 3	Reporte de evaluación de la consistencia empleando IHSDM.	164
Anexo 4	Tablas de cálculo para evaluación de consistencia empleando el modelo generado en ésta investigación	168
Anexo 5	Geometría del tramo evaluado con IHSDM y el modelo generado en ésta investigación	173

NOMENCLATURA

- a: aceleración de vehículo ft/s^2 en las ecuaciones de TWOPAS
- a_0 : aceleración máxima en ft/s^2 que puede alcanzar el vehículo partiendo del reposo en las ecuaciones de TWOPAS
- CCR: tasa de cambio de curvatura
- Curva n: corresponde a la primera curva en el alineamiento
- Curva n+1: corresponde a la siguiente curva en el alineamiento
- d: tasa de deceleración (m/s^2)
- Δ : deflexión de la curva de interés
- ΔV_a : diferencia entre la velocidad en la curva n y la velocidad máxima en la entretangencia en Km/h
- e: peralte (%)
- g: gravedad tomada como 32.17 ft/s^2 en las ecuaciones de TWOPAS
- G: pendiente expresada como una fracción decimal ; + para ascensos, - para descensos en % en las ecuaciones de TWOPAS
- GC: grado de curvatura en grados
- Lc: longitud de la curva circular en m
- LSC_a: longitud de entretangencia del diseño en m
- LSC_c: longitud necesaria para alcanzar la aceleración y deceleración pronosticada utilizando la Tabla 6
- LSD: abreviatura empleada para indicar curvas verticales convexas que tienen distancia de visibilidad limitada, $K < 43 \text{ m/\%}$
- Lr: longitud de la recta en m
- NLSD: abreviatura empleada para indicar curvas verticales convexas que tienen buena distancia de visibilidad, es decir $K \geq 43 \text{ m/\%}$
- Ω : ángulo de deflexión en grados

PC:	punto donde inicia la curva horizontal
PM:	punto medio curva circular
PMDV	punto de mínima distancia de visibilidad que tiene una elevación de 1.15 m por debajo del punto inflexión antes de la cresta de la curva vertical
PMTP	punto medio de la tangente precedente
PMV:	punto medio de la curva vertical
PRC:	punto medio recta corta precedente al PC
PT:	punto donde termina la curva horizontal
P1:	punto 200 m antes del PC
P2:	punto 130 m antes del PC
P3:	punto 60 m antes del PC
R:	radio de curvatura en m
R_n :	radio de la curva de interés en m
R_{n-1} :	radio de la curva anterior en m
t:	duración del intervalo de tiempo en segundos
V:	velocidad del vehículo en ft/s al inicio del intervalo de 1 segundo en las ecuaciones de TWOPAS
V_a :	velocidad máxima en la entretangencia en Km/h
V_{n+1}^a :	velocidad de la curva n+1 determinada en función de la tasa de aceleración pronosticada utilizando la Tabla 6
V_d :	velocidad deseada en Km/h y expresada en ft/s para las ecuaciones de TWOPAS
V_D :	velocidad de diseño en Km/h
V_m :	velocidad máxima en ft/s que el vehículo puede alcanzar en terreno plano
V_n :	V_{85} en la curva n en Km/h
V_{n+1} :	V_{85} en la curva n+1 en Km/h
V_r :	velocidad en la recta en Km/h

- X_{ca} : longitud necesaria para acelerar desde la velocidad de la curva n hasta la velocidad de la curva $n+1$ en m
- X_{cd} : longitud necesaria para decelerar desde la velocidad de la curva n hasta la velocidad de la curva $n+1$ en m
- X_{fa} : longitud necesaria para acelerar desde la velocidad de la curva n hasta la velocidad deseada en m
- X_{fd} : longitud necesaria para decelerar desde la velocidad deseada hasta la velocidad de la curva $n+1$ en m
- X_{fs} : longitud recorrida con la velocidad deseada en m
- X_n : posición al final del intervalo de tiempo t en ft para las ecuaciones de TWOPAS
- X_o : posición al inicio del intervalo de tiempo t en ft en las ecuaciones de TWOPAS
- X_{td} : longitud necesaria para decelerar desde la velocidad máxima V_a hasta la velocidad de la curva $n+1$ en m

1. INTRODUCCIÓN

Las carreteras son las principales vías de comunicación a nivel mundial y su diseño geométrico es una de las etapas más importantes en el momento de garantizar comodidad y seguridad a sus usuarios.

Desde los años treinta países como Suiza, Estados Unidos, Australia, y Alemania han venido investigando la manera de evaluar el diseño geométrico de las carreteras desde el punto de vista de la seguridad mediante el concepto de consistencia del diseño, concepto que se refiere a la relación entre las características geométricas existentes de la carretera y las que el conductor espera encontrar cuando transita por ella y que se relaciona íntimamente con la homogeneidad de las características geométricas de la misma. Los resultados de estas investigaciones llevaron a muchos países a modificar sus normas para reforzar este concepto.

De las líneas de investigación desarrolladas para determinar las medidas de consistencia, se encontró que la reducción de velocidad en una curva horizontal en relación con la curva o recta precedente tiene la más fuerte y sensible relación con la frecuencia de accidentes, utilizando como herramienta el perfil de velocidades de operación para visualizar las inconsistencias entre los elementos consecutivos.

Desde 1990 la Federal Highway Administration (FHWA) de los Estados Unidos viene trabajando en la organización del conocimiento disponible sobre la seguridad, investiga técnicas y desarrolla un programa de investigación de alta prioridad para poner en práctica un sistema integrado de módulos, con la finalidad de evaluar cuantitativamente las relaciones entre la seguridad y el diseño geométrico a un costo de 10 millones de dólares.

El objetivo del programa de investigación esta destinado a desarrollar un sistema totalmente funcional llamado IHSDM, Modelo interactivo para el diseño de seguridad vial, cuyo propósito es dotar a los ingenieros de vías de una herramienta que permita evaluar explícitamente la seguridad de las decisiones que se tomen en las etapas de planeamiento, diseño, rehabilitación y evaluación de carreteras existentes. Modelo que actualmente se encuentra en versión de prueba.

Colombia ha adaptado sus normas para el diseño geométrico de carreteras de los Estados Unidos y algunos países Europeos, que implícitamente tienen en cuenta la seguridad pero que no permiten cuantificarla. Este estudio esta orientado a implementar una herramienta para diseñar la seguridad vial de acuerdo a las condiciones colombianas con base en las investigaciones de consistencia del diseño desarrolladas por la FHWA.

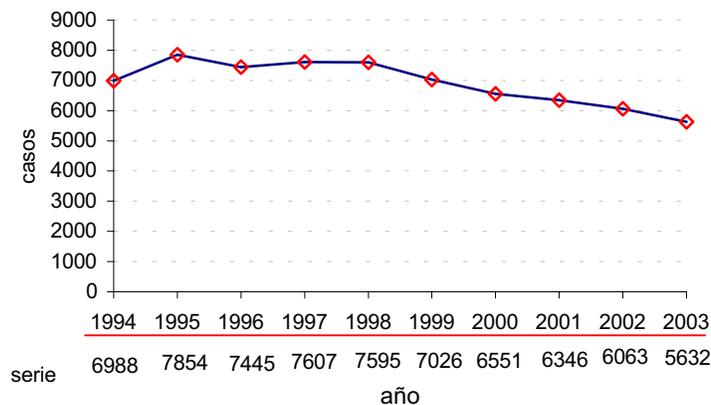
2. JUSTIFICACIÓN

Los accidentes de tránsito en el mundo dejan cada año cerca de 1.2 millones de muertos y cerca de 50 millones de heridos (2), y Colombia se encuentra catalogado como uno de los 10 países con mayor accidentalidad por tránsito en el mundo.

En los últimos años, la tasa de mortalidad causada por los accidentes de tránsito es tan alarmante como la que produce el conflicto armado del país; organismos como el Ministerio de Transporte, INVIAS, el Fondo de Prevención Vial y el desaparecido INTRA, han desarrollado campañas preventivas para reducir esta cifra en las carreteras colombianas desde hace más de 15 años, sin conseguir los resultados esperados.

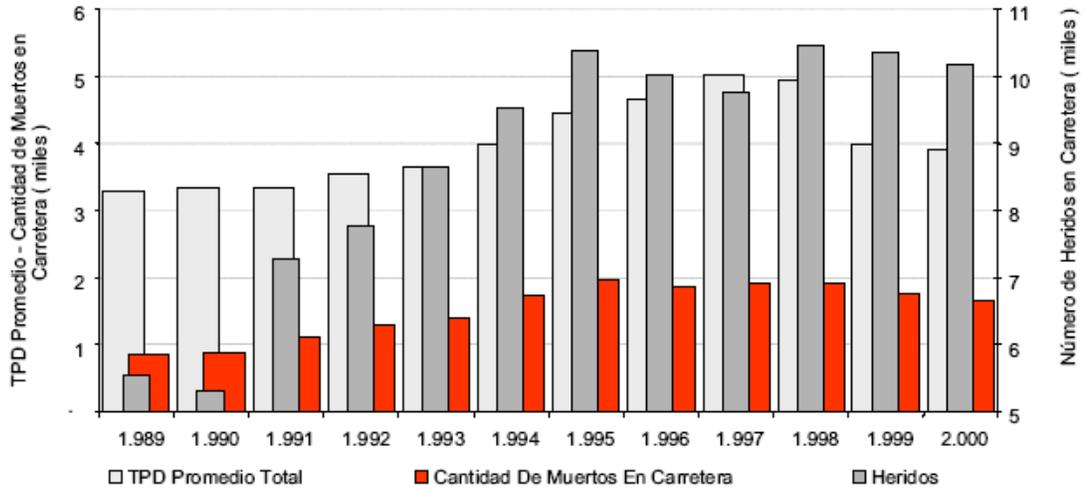
Las cifras de accidentalidad muestran que en el año 2003 murieron 5632 personas y fueron lesionadas 36743, siendo el automóvil el tipo de vehículo y objeto que más se involucra en estos hechos, según los estudios desarrollados por el Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses, el Fondo de Prevención Vial e INVIAS. Las figuras 1, 2, 3 y 4 muestran gráficamente éstas cifras.

Figura 1 Muertes por accidentes de tránsito en Colombia



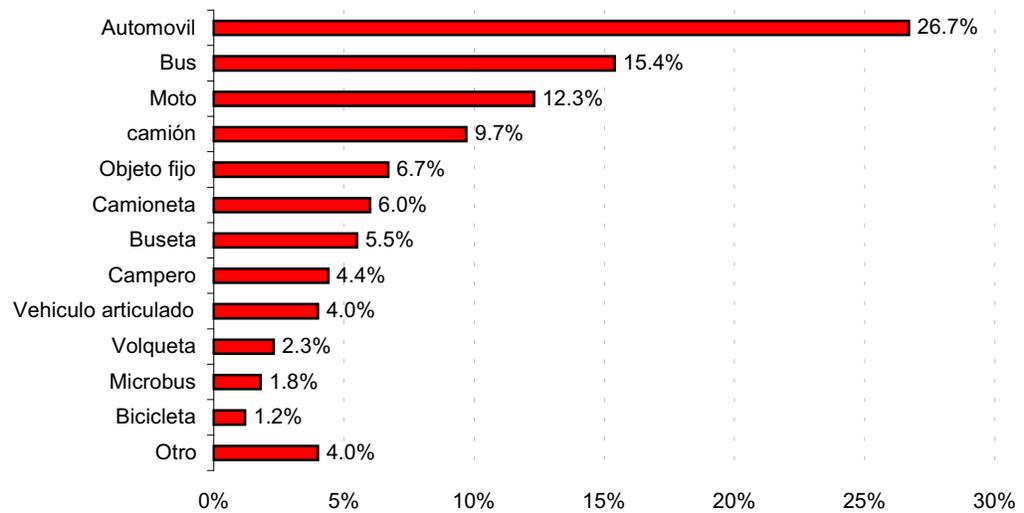
Fuente: FORENSIS, Datos para la vida. 2003

Figura 2 Muertes y lesiones por accidentes de tránsito en carreteras colombianas
 1989 -2000



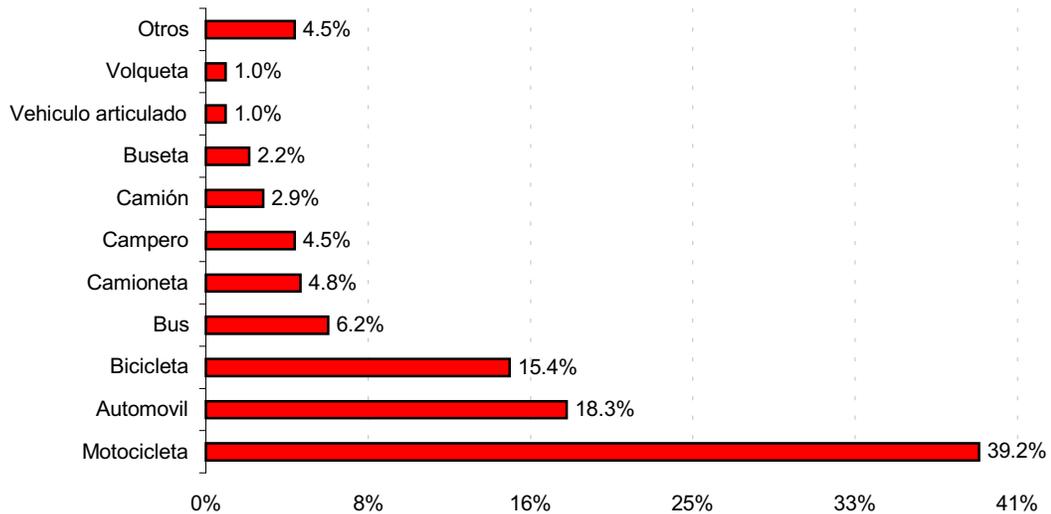
Fuente: INVIAS.

Figura 3 Objeto de colisión en muertes por accidentes de tránsito en Colombia
 1996-2003



Fuente: FORENSIS, Datos para la vida. 2003

Figura 4 Tipo de vehículo involucrado en muerte por accidente de tránsito en Colombia 2003



Fuente: FORENSIS, Datos para la vida. 2003

Los accidentes de tránsito le han costado al país en los últimos tres años cerca de los 8 billones de pesos como resultado del valor que se paga en atención hospitalaria, funerarias, reparación de vehículos, indemnizaciones, etc.(2)

De acuerdo con el documento de las Naciones Unidas del 2004 “Informe mundial sobre prevención y traumatismos causados por el tránsito”, para el año 2020 la tercera causa de la morbilidad serán los traumatismos causados por el tránsito y se espera que los países de ingresos bajos y medianos, en el cual se encuentra Colombia, las muertes aumenten considerablemente (2) tendencia que surge de acuerdo con diferentes factores como la vejez del parque automotor en estos países, la poca inversión en programas de seguridad vial, el diseño de vías sin auditorías de seguridad vial, etc.

Desde Leisch y Leischen (8) en adelante, los investigadores y diseñadores viales reconocen la necesidad de complementar los procedimientos basados en la velocidad de diseño con métodos y herramientas más confiables para evaluar cuantitativamente la seguridad.

El desarrollo de un método para evaluar la consistencia del diseño para carreteras en Colombia basado en la velocidad de operación como una herramienta confiable para evaluar la seguridad vial en los trabajos de diseñadores, planeadores y administradores de carreteras, buscando carreteras más seguras son las razones que motivan esta investigación.

3. OBJETIVOS

El proyecto pretende lograr los siguientes objetivos:

3.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un procedimiento que permita evaluar la consistencia del diseño geométrico de las carreteras de dos carriles en Colombia, con base en el perfil de velocidades de operación.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Estudiar el módulo de consistencia del diseño geométrico del programa de computador IHSDM y evaluar la posibilidad de adaptarlo a las condiciones Colombianas.
2. Aplicar en carreteras colombianas los modelos de estimación del perfil de velocidades de operación planteados por investigadores internacionales y evaluar su aplicabilidad.
3. Desarrollar o adaptar un modelo para estimar el perfil de velocidades de operación, validándolo con mediciones de campo y con herramientas como el manual de capacidad y niveles de servicio para carreteras de dos carriles, o con el modelo de simulación SIMCAR.

4. ALCANCE

En ésta fase de la investigación se implementa una metodología basada en el perfil de velocidades de operación para evaluar la consistencia del diseño geométrico de carreteras colombianas basado en las investigaciones de la Federal Highway Administration de los Estados Unidos, y se obtiene las ecuaciones para predecir velocidades de operación y aceleraciones en condiciones de terreno plano y montañoso.

5. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La investigación se desarrolla en la región sur occidental y central del país, comprendida entre los departamentos de Cauca, Valle y Quindío respectivamente. La selección de las carreteras que se indicarán más adelante se efectuó en dicha región teniendo en cuenta las siguientes razones:

1. Disponibilidad de la información geométrica
2. Representan gran parte de las condiciones topográficas del país
3. Cumplen con los criterios utilizados en el estudio de la FHWA que se muestran en la Tabla 1
4. Disponibilidad de las bases de datos de estudios desarrollados en las carreteras de éstos departamentos
5. Proximidad entre los sitios de estudio
6. El volumen de vehículos pesados permite medir velocidades a flujo libre.

Tabla 1 Criterios de selección de tramos de estudio

CRITERIO	ESTUDIO FHWA	ÉSTE ESTUDIO
Zona de localización	Rural	Rural
Clasificación funcional	Colectora o arterial menor	Arterial
Densidad de puntos de acceso	3/Km.	3/Km
Velocidad máxima permitida	Entre 75 y 115 Km/h	80 Km/h
Velocidad de diseño	< 120 Km/h	< 120 Km/h
Tipo de terreno	Sin restricciones	Plano y montañoso
Radio de curvatura	Entre 110 y 3500 m	Entre 20 y 700 m
Pendiente Longitudinal	Entre -10 y 10 %	Entre -10 y 10 %
Volúmenes de tráfico	Entre 500 y 4000 veh/día	Entre 500 y 6000 veh/día
Ancho de carriles	Entre 2.74 y 3.66 m	Entre 2.74 y 3.65 m
Longitud de curvas horizontales	Sin restricciones	Sin restricciones
Tipo curvas verticales	Convexas	Convexas
Longitud de curvas verticales	< 60 m	< 60 m
Longitud de tangentes	Sin restricciones	Sin restricciones

Fuente: Elaboración propia

Los tramos de carretera se preseleccionaron revisando inicialmente los planos de diseño y archivos de información de los Administradores de Mantenimiento Vial del INVIAS. Posteriormente se realizó la selección definitiva una vez efectuada la visita de campo donde se verificó la información geométrica y estado de la superficie del pavimento.

Las carreteras seleccionadas para el estudio se muestran en la Tabla 2.

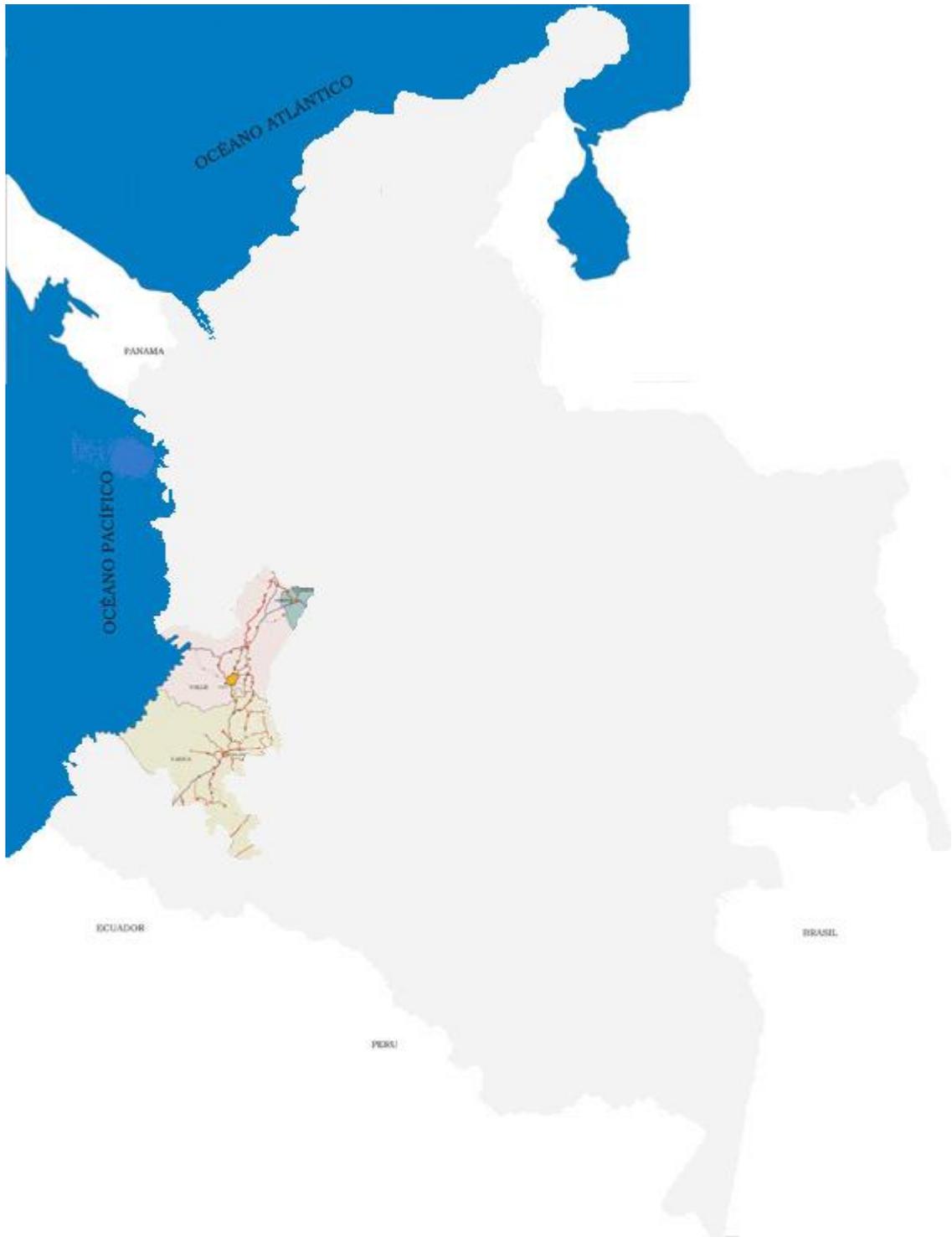
Tabla 2 Localización de las carreteras y tramos para el estudio

DEPARTAMENTO	CARRETERA	TRAMO
Valle	Palma Seca - Crucero Guajira	Palma Seca - Crucero Guajira
Valle	Cali - Cerrito	Rozo - Cerrito
Valle	Popayán - Palmira	Candelaria - Palmira
Valle	Cali-Pereira Ruta 25	Amaime - Cerrito
Valle	Cali - Pereira Ruta 25	Cerrito - Guacarí
Valle	Cali - Buga Ruta 23	Mediacanoa - Buga
Valle	Cali - Pereira Ruta 25	La Paila - Zarzal
Valle	Cali - Pereira Ruta 25	Zarzal - Obando
Valle	Cali - Pereira Ruta 23	Vijes - Mediacanoa
Valle	Cali - Pereira Ruta 23	Mediacanoa - Riofrío
Valle-Cauca	Popayán - Palmira	Puerto Tejada - Candelaria
Valle-Cauca	Popayán - Cali	Y de Villa Rica - Jamundí
Cauca	Popayán - Palmira	Villa Rica - Puerto Tejada
Cauca	Popayán - Cali	Popayán - Santander
Cauca	Pasto - Popayán	Mojarras - Remolino
Cauca	Mojarras - Popayán	Mojarras - Piedra Sentada
Cauca	Mojarras - Popayán	Rosas - Timbío
Quindío	Armenia - Ibagué	Calarcá - Alto de la Linea

Fuente: Elaboración propia

Los Departamentos de Cauca, Valle y Quindío corresponden a las Territoriales 8, 25 y 20 del INVIAS respectivamente y la localización de su red vial se puede observar en las Figuras 5, 6, 7 y 8.

Figura 5 Localización de la zona de estudio en el país



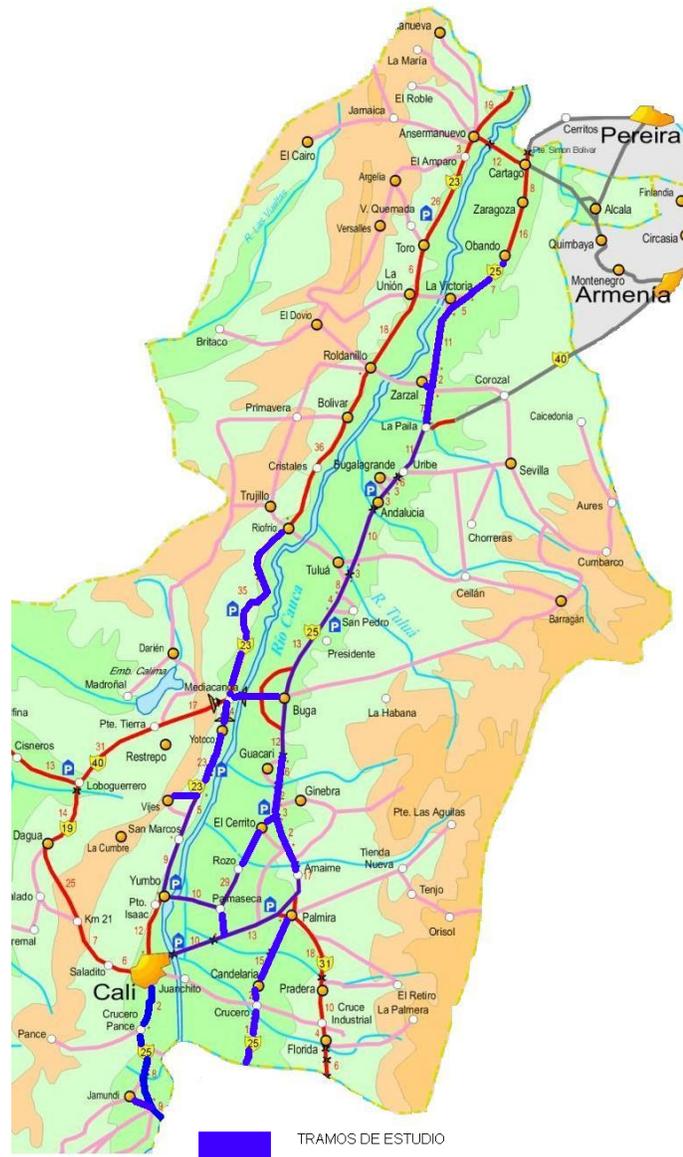
Fuente: *INVIAS*

Figura 6 Localización de los tramos de estudio en la Territorial Cauca



Fuente: INVIAS

Figura 7 Localización de los tramos de estudio en la Territorial Valle del Cauca



Fuente: INVIAS

Figura 8 Localización de los tramos de estudio en la Territorial Quindío



Fuente: *INVIAS*

6. MARCO TEÓRICO

A continuación se plantea la definición de algunos términos a tener en cuenta en la evaluación de la consistencia del diseño.

6.1 DEFINICIONES

Se consideran los siguientes términos:

6.1.1 Carretera: Infraestructura de transporte cuya finalidad es permitir la circulación de vehículos en condiciones de continuidad en el espacio y el tiempo, con niveles adecuados de seguridad y de comodidad (10)

6.1.2 Carretera típica de terreno plano: Combinación de alineamientos horizontal y vertical, que permite a los vehículos pesados mantener aproximadamente la misma velocidad que la de los vehículos ligeros (10)

6.1.3 Carretera típica de terreno ondulado: Combinación de alineamientos horizontal y vertical que obliga a los vehículos pesados a reducir sus velocidades significativamente por debajo de las de los vehículos de pasajeros, sin ocasionar el que aquellos operen a velocidades sostenidas en rampa por un intervalo de tiempo largo (10)

6.1.4 Carretera típica de terreno montañoso: Combinación de alineamientos horizontal y vertical que obliga a los vehículos pesados a circular a velocidad sostenida en rampa durante distancias considerables o a intervalos frecuentes (10)

6.1.5 Carretera típica de terreno escarpado: Combinación de alineamientos horizontal y vertical que obliga a los vehículos pesados a operar a menores velocidades sostenidas en rampa que aquellas a las que operan en terreno montañoso, para distancias significativas o a intervalos muy frecuentes (10)

6.1.6 Velocidad a flujo libre: 1. Velocidad teórica del tránsito cuando la densidad es cero. 2. Velocidad de los vehículos cuya marcha no está impedida por la interacción vehicular ni por la regulación del tránsito (12)

6.1.7 Velocidad instantánea: Velocidad de un vehículo en un instante determinado, teóricamente en un tiempo infinitamente pequeño (12)

6.1.8 Velocidad de operación: De un determinado elemento geométrico, es la velocidad segura y cómoda a la que un vehículo aislado circularía por él, sin que ningún factor relacionado con la intensidad del tránsito o meteorológica condicione la elección de la velocidad del conductor, es decir la velocidad en función de las características físicas de la vía y su entorno apreciadas por el conductor. Normalmente se asimila al percentil 85 de la distribución de velocidades puntuales observadas en un sitio determinado considerando únicamente las velocidades de los vehículos livianos que circulan a flujo libre(12). En este estudio se llamará V_{85} .

6.1.9 Velocidad puntual: Velocidad de un vehículo cuando pasa por un punto determinado de la vía (12)

6.1.10 Consistencia del diseño: Es la correspondencia entre el diseño geométrico de la carretera y las expectativas del conductor, característica importante de la carretera desde el punto de vista de la seguridad (8)

6.1.11 Perfil de velocidad: Es la representación gráfica de las V_{85} reales o pronosticadas en el eje vertical, en función de las abscisas en el eje horizontal (8)

6.1.12 IHSDM: Modelo Interactivo de Diseño de Seguridad Vial (Interactive Highway Safety Design Model) es un programa de evaluación de la seguridad en carreteras creado por la FHWA (Federal Highway Administration) de los Estados Unidos, diseñado para carreteras rurales de dos carriles y que actualmente está en versión de prueba (6).

6.1.13 TWOPAS: Es un modelo de simulación microscópica por computadora del tráfico en vías de dos carriles con o sin carriles de adelantamiento. Su función es simular las operaciones de tráfico de las carreteras de dos carriles revisando la posición, velocidad y aceleración de cada uno de los vehículos en la vía simulada a intervalos de un segundo (5)

6.2 MEDIDAS DE LA CONSISTENCIA DEL DISEÑO

El objeto de muchas de las investigaciones desarrolladas en países como Australia, Suiza, Alemania y Estados Unidos fue proporcionar una herramienta a los ingenieros diseñadores que les permita evaluar la seguridad vial en sus diseños.

La evaluación de la seguridad vial se realiza a través de la consistencia del diseño basada en el perfil de V_{85} , considerando la reducción de velocidad entre elementos consecutivos de la carretera como la causa que tiene la relación más fuerte y sensible con la frecuencia de accidentes.

Algunas técnicas complementarias planteadas para evaluar la consistencia del diseño son(8):

1. Distribución de velocidades
2. Índices de alineamiento
3. Carga de trabajo
4. Listas de verificación

La técnica de distribución de velocidades se basa en las medidas estadísticas partiendo de la hipótesis que las velocidades de los vehículos a flujo libre se distribuyen normalmente alrededor de la media, la evidencia encontrada en las investigaciones llevó a la conclusión de que la variación de la velocidad y la frecuencia de los accidentes están directamente relacionadas; cuanto mayor es la desviación estándar de la velocidad media del tránsito, más alta es la tasa de accidentes.

Los índices de alineamiento son medidas cuantitativas de carácter general del alineamiento de un tramo de carretera, que pueden identificar inconsistencias geométricas cuando existen grandes variaciones en una sucesión de segmentos del camino. Un ejemplo común es donde existen transiciones de terreno ondulado a montañoso.

La carga de trabajo se define como una medida del esfuerzo gastado por un operador humano mientras realiza una tarea, independientemente del comportamiento de la tarea misma.(8)

Una geometría consistente permite a un conductor predecir con precisión la correcta trayectoria mientras usa poca capacidad para procesar la información visual, permitiendo así que la atención se dedique a evitar los obstáculos. Una forma de medir la cantidad de carga de trabajo es usar la demanda visual, la cual refleja el porcentaje de tiempo en que un conductor observa el camino.

Las listas de verificación de expectativas y consistencia de diseño comprenden recordatorios para examinar varias características geométricas.

6.2.1 Perfil de velocidad

Es el método que usa la V_{85} como herramienta para verificar la consistencia del diseño. Se puede definir como la representación gráfica de las V_{85} en el eje vertical, en función de las abscisas en el eje horizontal.

Para determinar el perfil de V_{85} de una carretera existente el procedimiento más preciso es medir las velocidades de operación a lo largo del alineamiento. Para el caso de una carretera en proyecto, se aplican ecuaciones de regresión basadas en datos obtenidos de mediciones en carreteras existentes, que permiten correlacionar las V_{85} y las distintas características del diseño geométrico, particularmente las curvaturas horizontales y verticales. Las inconsistencias se identifican sobre el perfil de velocidades comparando las diferencias de V_{85} entre

elementos consecutivos del alineamiento con valores prefijados utilizados para la evaluación y las diferencias entre la velocidad de diseño y las V_{85} (8)

6.3 IHSDM

El Modelo Interactivo para el Diseño de Seguridad Vial, es un programa de computador creado por la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos que permite evaluar varios aspectos de seguridad vial.

Puede ser usado por planificadores, diseñadores y administradores viales y permite detectar problemas potenciales de seguridad, comparar la seguridad de varias alternativas y optimizar la seguridad de un diseño determinado.

Actualmente se encuentra en fase de desarrollo y se tiene disponible una versión de prueba de dos de los seis módulos que lo conforman, su aplicación esta enfocada a carreteras rurales de dos carriles y se prevé para el año 2006 la versión para carreteras multi-carril.

El IHSDM consta de los siguientes módulos(8):

- 1. Módulo de predicción de accidentes:** (Crash Prediction Module) Estima la cantidad de accidentes que pueden producirse en una carretera, determinando el porcentaje y severidad de los sucesos, incluyendo el numero de muertos, lo que permite al diseñador comparar los resultados entre diferentes alternativas de diseño. Además, permite realizar análisis de sensibilidad modificando las dimensiones de los elementos de la sección transversal de la carretera con la accidentalidad.
- 2. Módulo de consistencia del diseño:** (Design Consistency Module) Identifica los tramos de carretera que no son consistentes en función de la velocidad de operación, permitiendo que el diseñador tome medidas para minimizarlos o suprimirlos

3. Módulo conductor / vehículo: (Driver/Vehicle Module) Evalúa la manera en que un conductor maniobra su vehículo de acuerdo al diseño de la carretera e identifica las condiciones en las que puede presentarse la pérdida del control del vehículo. El módulo consta de dos modelos que interactúan entre sí, uno de ellos simula el comportamiento del conductor al maniobrar su vehículo sin presencia de tráfico, estimando la velocidad y trayectoria del vehículo al transitar la carretera. El otro modelo simula el comportamiento del vehículo sobre la carretera con base en los datos del comportamiento del conductor y estima la aceleración transversal, demanda de fricción y momento de vuelco.

4. Módulo de revisión y diagnóstico de intersecciones: (Intersection Diagnostic Review Module) Evalúa el trazado geométrico de intersecciones a nivel en carreteras interurbanas de dos carriles e identifica posibles tratamientos para mejorar su seguridad. Incorpora las normas de diseño del “Libro verde” (AASHTO, A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. Washington D. C., 1994), Guía de Diseño de Carreteras (AASHTO, Roadside Design Guide. Washington D. C., 1996) entre otras, y las recomendaciones basadas en investigaciones realizadas y en la opinión de expertos en el tema.

El enfoque preliminar de este módulo es identificar combinaciones de elementos de diseño geométrico que representen un peligro potencial de accidentes, ayudar en la interpretación de las causas de los mismos y recomendar medidas de solución.

5. Módulo de revisión de normas: (Policy Review Module). Verifica el cumplimiento de las normas de diseño de carreteras, e identifica los elementos que las incumplen, considera los elementos en planta, perfil longitudinal, sección transversal y distancia de visibilidad.

El módulo incorpora las siguientes normas: “Libro verde” (AASHTO, A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. Washington D. C., 1994), Guía de Diseño de Carreteras (AASHTO, Roadside Design Guide. Washington D. C.,

1996) y Guía para el desarrollo de infraestructuras para bicicletas (AASHTO, Guide for the Development of Bicycle Facilities. Washington D. C., 1999).

6. Módulo de análisis de tráfico: (Traffic Analysis Module) Herramienta para estudiar el efecto operacional de diseños de carreteras, señalización, controles de tráfico, tamaño y características de los vehículos para intensidades de tráfico actuales y futuras.

El modelo de análisis de tráfico involucra la geometría de la carretera en el modelo de simulación de tráfico TWOPAS, que suministra información sobre velocidad, tiempo de viaje, demoras, porcentaje de adelantamientos, viaje en grupos, conflictos de tráfico y otros elementos vinculados con la seguridad vial.

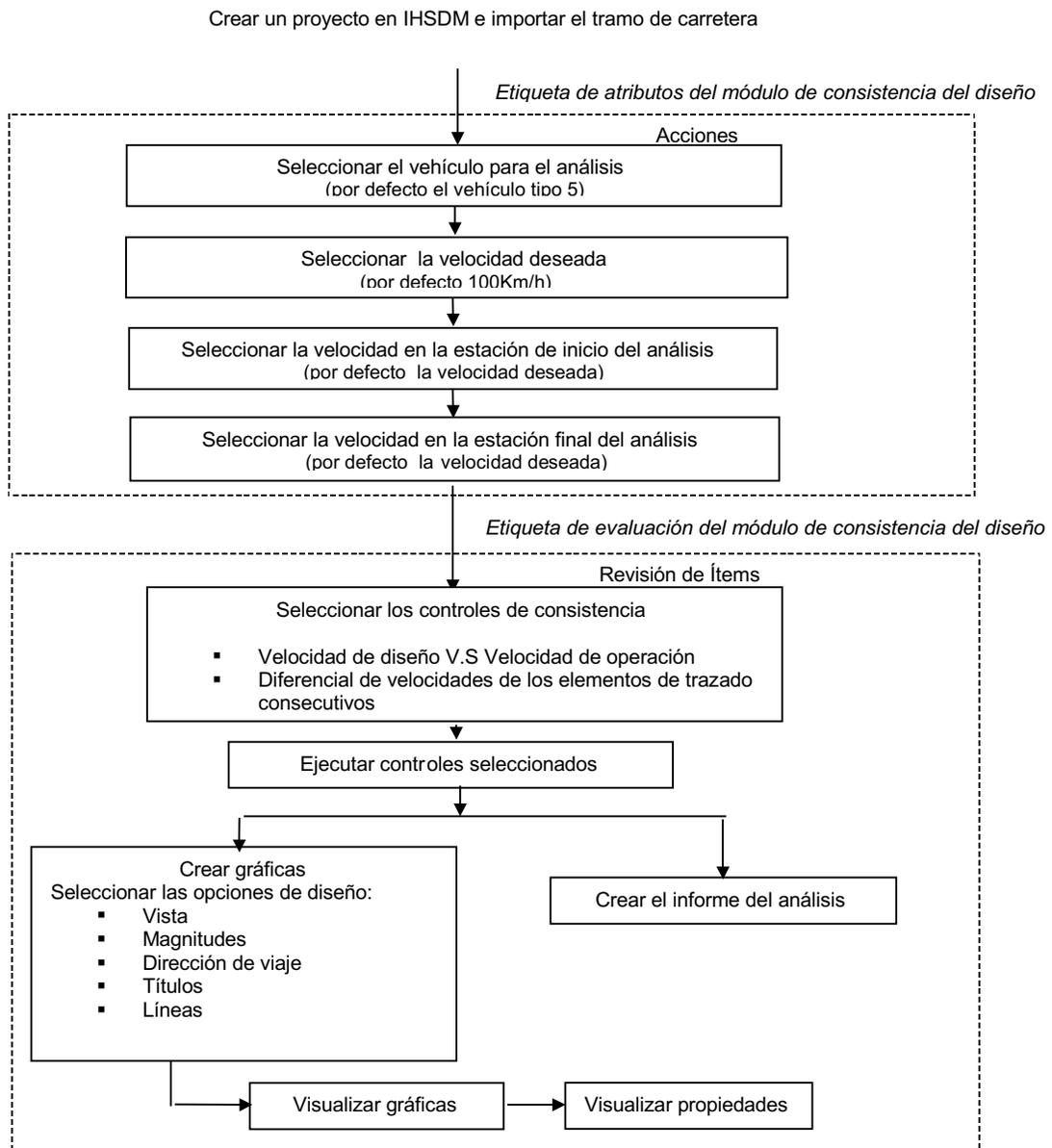
El modelo TWOPAS simula la operación del tráfico en carreteras rurales de dos carriles teniendo en cuenta la posición, velocidad y aceleración de cada vehículo a cada segundo, simulando su avance. Considera el efecto de la geometría de la carretera, las preferencias y características del conductor, el tamaño y las características del vehículo y la presencia de vehículos que viajan en el mismo sentido y en el sentido opuesto, que están visibles durante un tiempo dado.

6.3.1 Módulo de consistencia del diseño de IHSDM

El módulo de consistencia de IHSDM fundamenta su evaluación en la estimación de V_{85} ; para ello genera un perfil de velocidades y analiza su variación a lo largo de la carretera comparándolo con la velocidad de diseño. El modelo utiliza las ecuaciones de predicción de V_{85} que consideran los elementos geométricos en planta y perfil, y las ecuaciones del modelo TWOPAS que predicen la velocidad teniendo en cuenta el perfil de la carretera y el rendimiento del vehículo. Adicionalmente, compara las V_{85} al iniciar cada curva con la velocidad del elemento anterior, e informa cuando la diferencia supera un determinado valor. La evaluación se hace para cada uno de los dos sentidos de avance.

El funcionamiento del módulo de consistencia del diseño de IHSDM se resume en el diagrama de flujo de la Figura 9.

Figura 9 Diagrama de flujo del funcionamiento del modulo de consistencia del diseño de IHSDM

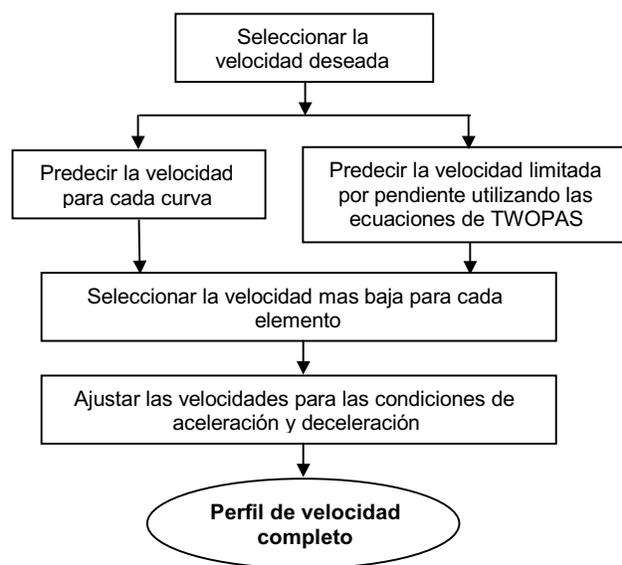


Fuente: *IHSDM User's Manual (2004)*.

6.3.2 Procedimiento para determinar el perfil de velocidades

El procedimiento para determinar el perfil de velocidades esta definido en la serie de etapas que se muestran en la Figura 10 y que se explican a continuación. (8)

Figura 10 Diagrama de flujo para determinar el perfil de velocidades utilizando el modelo IHSDM.



Fuente: *EVALUATION OF DESIGN CONSISTENCY METHODS FOR TWOLANE RURAL HIGHWAYS.* (2000). Executive Summary Publication NO. FHWA-RD-99-171

- **Etapa 1: Seleccionar la velocidad deseada**

Después de seleccionar un diseño para su evaluación, se selecciona la velocidad deseada que es la velocidad escogida por el conductor para desplazarse en tramos rectos de gran longitud, libre de la influencia de curvas horizontales, verticales y tráfico adicional. Tema que no está completamente definido y que depende del criterio del diseñador, que deberá basarse en las condiciones del medio y las características de la carretera y de sus usuarios. Por defecto, la velocidad deseada que toma el programa es de 100 Km/h.

• **Etapla 2: Calcular la V_{85}**

Se hace en cada elemento geométrico utilizando las ecuaciones de predicción indicadas en la Tabla 3, siguiendo el procedimiento que se muestra en la Figura 11. En la Tabla 3 la columna “No. de curvas” corresponde al número de curvas del estudio de la Federal Highway Administration empleadas para obtener la ecuación en cada caso.

Tabla 3 Ecuaciones para estimar V_{85} considerando la geometría en planta y perfil

CASO	ALINEAMIENTO	ECUACIÓN	No. DE CURVAS	r^2
1	Curva horizontal $-9 \% \leq$ Inclinación de rasante $< -4 \%$	$V_{85} = 102.10 - 3077.13 / R$	21	0.58
2	Curva horizontal $-4 \% \leq$ Inclinación de rasante $< 0 \%$	$V_{85} = 105.98 - 3709.90 / R$	25	0.76
3	Curva horizontal $0 \% \leq$ Inclinación de rasante $< 4 \%$	$V_{85} = 104.82 - 3574.51 / R$	25	0.76
4	Curva horizontal $4 \% \leq$ Inclinación de rasante $< 9 \%$	$V_{85} = 96.61 - 2752.19 / R$	23	0.53
5	Curva horizontal combinada con curva vertical cóncava	$V_{85} = 105.32 - 3438.19 / R$	25	0.92
6	Curva horizontal combinada con curva vertical convexa sin limitación de visibilidad ($K > 43 \text{ m} / \%$)	V_{85} = menor valor entre los casos 1 y 2 para bajada, y entre 3 y 4 para subida.	13	-
7	Curva horizontal combinada con curva vertical convexa y limitación en la distancia de visibilidad ($K \leq 43 \text{ m} / \%$)	$V_{85} = 103.24 - 3576.51 / R$	22	0.74
8	Curva vertical cóncava en recta	V_{85} = velocidad libre en recta	7	-
9	Curva vertical convexa en recta, sin limitación en la distancia de visibilidad ($K > 43 \text{ m} / \%$)	V_{85} = velocidad libre en recta	6	-
10	Curva vertical convexa en recta, con limitación en la distancia de visibilidad ($K \leq 43 \text{ m} / \%$)	$V_{85} = 105.08 - 149.69 / K$	9	0.60

Fuente : FITZPATRICK, K., et al. (1999). *Speed prediction for two-lanes rural highways*. Washington: Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-99-171.

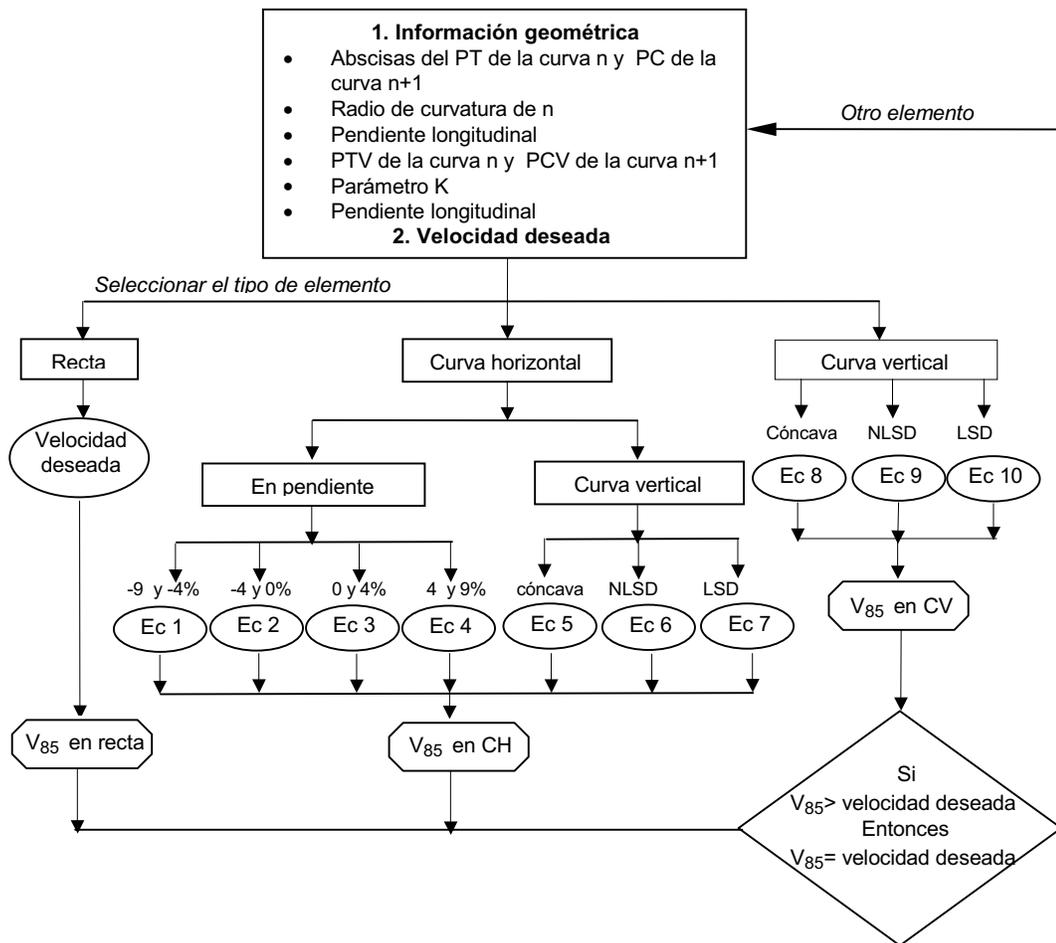
Donde

R: radio de la curva horizontal, en metros

K: porcentaje de curvatura vertical (m/%). Éste factor establece, para una determinada velocidad, las condiciones de visibilidad y drenaje en el sector de la curva.

Figura 11 Diagrama de flujo para estimar V_{85} usando las ecuaciones de la Tabla

3



Fuente : FITZPATRICK, K., et al. (1999). *Speed prediction for two-lanes rural highways*. Washington: Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-99-171.

Donde:

PT: punto donde termina la curva horizontal

PC: punto donde inicia la curva horizontal

Curva n: corresponde a la primera curva en el alineamiento

Curva n+1: corresponde a la siguiente curva en el alineamiento

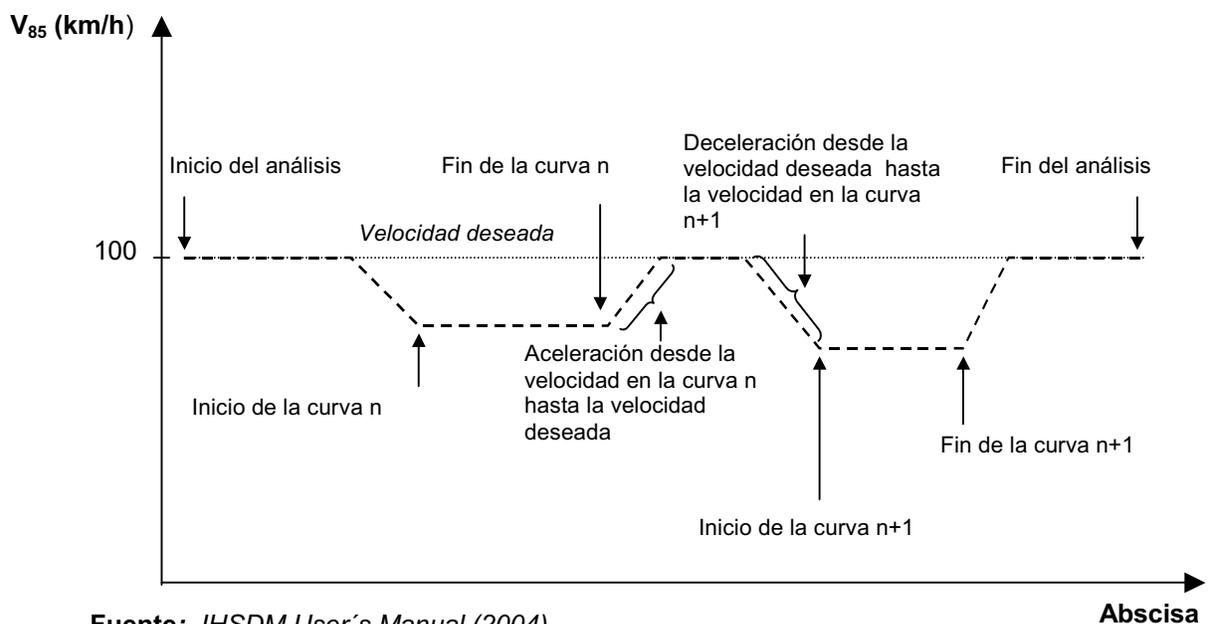
NLSD: abreviatura empleada para indicar curvas verticales convexas que tienen buena distancia de visibilidad, es decir $K \geq 43$

LSD: abreviatura empleada para indicar curvas verticales convexas que tienen distancia de visibilidad limitada, $K < 43$

Las V_{85} pronosticadas utilizando las ecuaciones representan las V_{85} en el punto medio de la curva. El modelo asume que ésta velocidad es constante a lo largo de la curva horizontal o vertical.

La Figura 12 muestra el perfil de velocidades obtenido utilizando las ecuaciones de regresión de la Tabla 3

Figura 12 Perfil de velocidades por efecto de la curvatura



Fuente: IHSDM User's Manual (2004).

- **Etapas 3: Calcular la velocidad limitada por pendiente**

Se utilizan las ecuaciones de rendimiento de vehículos del modelo TWOPAS para generar un perfil de velocidades basado en la inclinación de los alineamientos.

El efecto de las pendientes sobre los vehículos es limitar la aceleración que los vehículos puedan lograr haciendo que no puedan mantener la velocidad deseada por el conductor.

TWOPAS clasifica los vehículos por su rendimiento en 5 tipos, dependiendo de su máxima potencia la cual se refleja en características de aceleración y velocidad máximas. La Tabla 4 muestra los tipos de vehículo considerados por el modelo.

Tabla 4 Clasificación de los vehículos por el modelo TWOPAS

TIPO DE VEHÍCULO	ACELERACIÓN MÁXIMA [(km/h)/s]	VELOCIDAD MÁXIMA (km/h)	% DE LA POBLACIÓN	RENDIMIENTO
Tipo 9	10.20	120	10	El más bajo
Tipo 10	10.70	125	15	
Tipo 11	11.10	130	20	
Tipo 12	11.40	135	25	
Tipo 13	12.30	145	30	El más alto

Fuente : FITZPATRICK, K., et al. (1999). *Speed prediction for two-lanes rural highways*. Washington: Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-99-171.

El objetivo de principal de las ecuaciones del modelo TWOPAS es verificar si el cambio de velocidad pronosticado utilizando las ecuaciones de regresión en cualquier punto de la carretera, excede la capacidad del vehículo.

La Figura 13 muestra el procedimiento para calcular la velocidad limitada por la pendiente utilizando las ecuaciones del modelo TWOPAS, que se muestran en la Tabla 5

Tabla 5 Ecuaciones de rendimiento para automóviles del modelo TWOPAS

CASO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN
1	Aceleración del automóvil utilizando la aceleración y velocidad máximas	$a = a_0 \left(1 - \frac{V}{V_m} \right) - gG$
2	Aceleración del automóvil utilizando el 73% de aceleración máxima y el 90 % de velocidad máxima	$a = 0.73a_0 \left(1 - \frac{V}{0.90V_m} \right) - gG$
3	Velocidad final del vehículo en un intervalo de 1 segundo	$V_n = V + a t$
4	Velocidad basada en las preferencias de aceleración del conductor si $ V_d - V \leq 1.2$	$V_n = V_d$
5	Velocidad basada en las preferencias de aceleración del conductor sí $ V_d - V > 1.2$ y $V_d - V > 0$	$V_n = V_d + (1.2 + 0.108 * V_d - V) * t$
6	Velocidad basada en las pre ferencias de aceleración del conductor sí $ V_d - V > 1.2$ y $V_d - V < 0$	$V_n = V - 1.2 * t$
7	Aceleración del vehículo utilizando la la velocidad al final del intervalo de 1 segundo	$a = \frac{V_n - V}{t}$
8	Posición del vehículo al final del intervalo de 1 segundo	$X_n = X_0 + V t + 0.5 a t^2$

Fuente: *EVALUATION OF DESIGN CONSISTENCY METHODS FOR TWOLANE RURAL HIGHWAYS.* (2000). Executive Summary Publication NO. FHWA-RD-99-171

Donde:

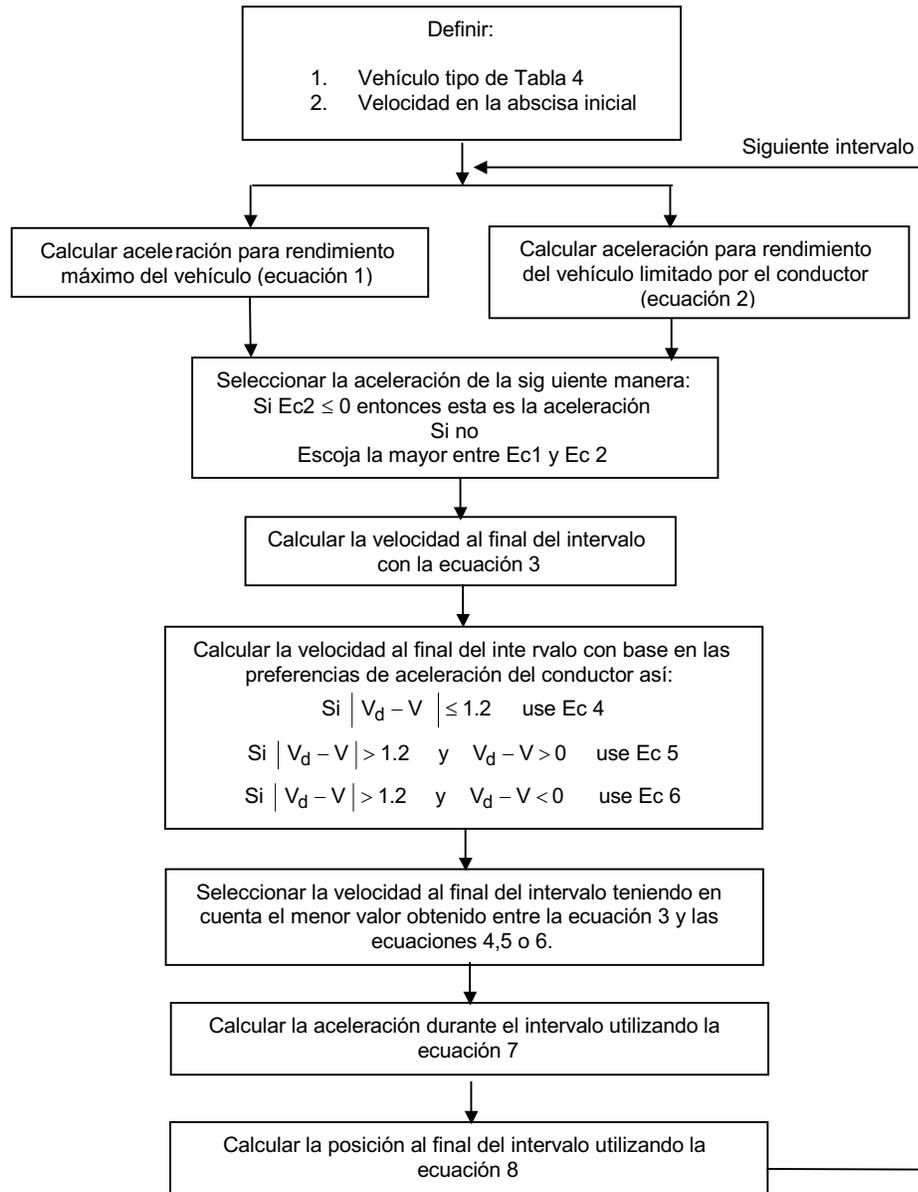
V_d : velocidad deseada en ft/s

V : velocidad del vehículo en ft/s al inicio del intervalo de 1 segundo

a : aceleración de vehículo en ft/s^2 a la velocidad V

- a_0 : aceleración máxima en ft/s^2 que puede alcanzar el vehículo partiendo del reposo
- V_m : velocidad máxima en ft/s que el vehículo puede alcanzar en terreno plano
- g : gravedad tomada como 32.17 ft/s^2
- G : pendiente expresada como una fracción decimal ; + para ascensos, - para descensos
- V_n : velocidad en ft/s al final del intervalo (generalmente 1 segundo)
- t : duración del intervalo de tiempo en segundos
- X_n : posición al final del intervalo de tiempo t
- X_o : posición al inicio del intervalo de tiempo t

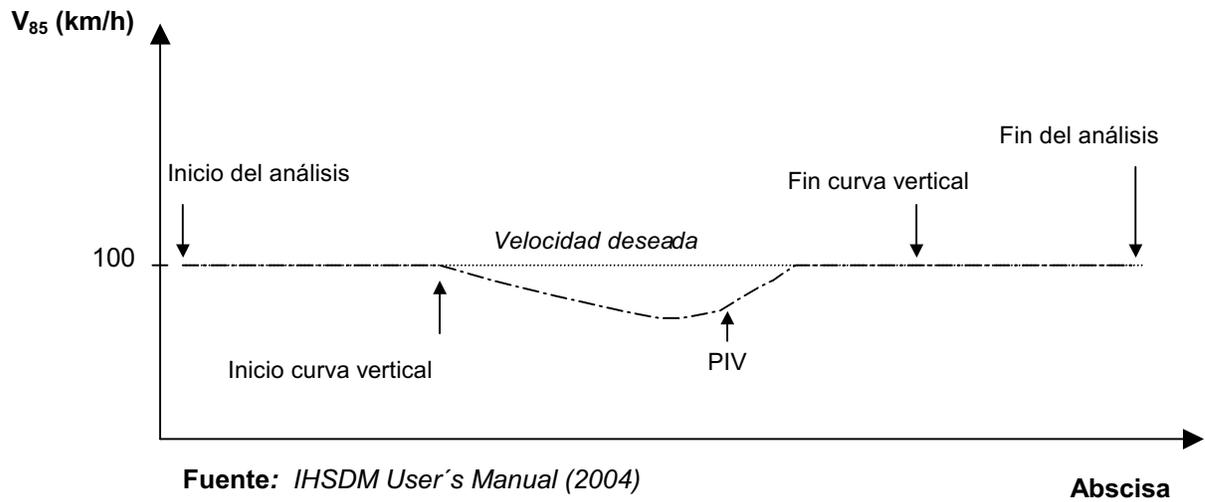
Figura 13 Procedimiento para calcular la velocidad limitada por pendiente utilizando las ecuaciones del modelo TWOPAS (Tabla 5)



Fuente: Elaboración propia

La Figura 14 muestra el perfil de velocidades limitado por pendiente, donde se puede observar la reducción de la velocidad por efecto del alineamiento vertical considerando las condiciones de desempeño del vehículo.

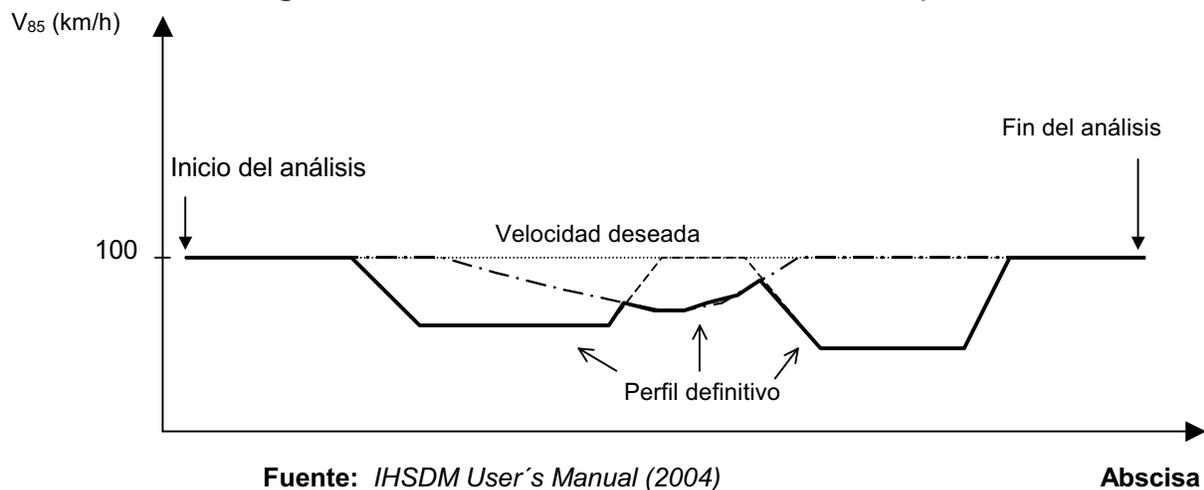
Figura 14 Perfil de velocidades por efecto de la pendiente



- **Etap 4: Deducción del perfil V_{85} con base en la predicción de velocidades**

Se comparan los dos perfiles y se obtiene el perfil seleccionando el menor valor de V_{85} en cada elemento. Ver Figura 15

Figura 15 Perfil de velocidades con base en la predicción de V_{85}



• **Etapa 5: Ajustar el perfil de V_{85} con las aceleraciones pronosticadas**

En esta etapa se busca verificar si las velocidades del perfil de V_{85} se pueden alcanzar realmente entre elementos geométricos consecutivos, utilizando las aceleraciones pronosticadas mediante las ecuaciones de la Tabla 6, para obtener el perfil de velocidades definitivo.

Tabla 6 Tasas de aceleración y desaceleración del modelo IHSDM

TASA DE DECELERACIÓN (m/s^2)		CONDICIÓN DE ALINEAMIENTO		TASA DE ACELERACIÓN (m/s^2)	
Perfil de velocidades					
Radio	Valor	1 a 4	Curvas horizontales en pendiente entre -9 y 9%	Radio	Valor
>436 m	0			R>875	0
175<R<436	0.6794-295.14/R			436<R<875	0.21
<175	1			250<R<436	0.43
	1	5	Curvas Horizontales combinadas con curvas verticales cóncavas	0.54	
Use tasas para condiciones de alineamiento 1 a 4		6	Curvas horizontales combinadas con curvas verticales con distancia de visibilidad no limitada	Use tasas para condiciones de alineamiento 1 a 4	
	1	7	Curvas horizontales combinadas con curvas verticales convexas con distancia de visibilidad limitada	0.54	
No se considera		8	Curva vertical cóncava en tangente horizontal	No se considera	
No se considera		9	Curva vertical convexa con distancia de visibilidad no limitada en tangente horizontal	No se considera	
No se considera		10	Curva vertical convexa con distancia de visibilidad limitada en tangente horizontal	No se considera	
CONSISTENCIA DEL DISEÑO PARA TODAS LAS CONDICIONES DE ALINEAMIENTO					
1 a 1.48		Diseño bueno		0.54 a 0.89	
1.48 a 2		Diseño regular		0.89 a 1.25	
>2		Diseño pobre		>1.25	

Fuente: EVALUATION OF DESIGN CONSISTENCY METHODS FOR TWOLANE RURAL HIGHWAYS. (2000). Executive Summary Publication NO. FHWA-RD-99-171.

El modelo IHSDM considera 6 casos para ajustar la velocidad teniendo en cuenta la longitud disponible de entretangencia en función de la aceleración y deceleración que en ella desarrollan los vehículos, considerando un comportamiento racional del conductor.

La siguiente es la terminología utilizada en los 6 casos que se explican a continuación:

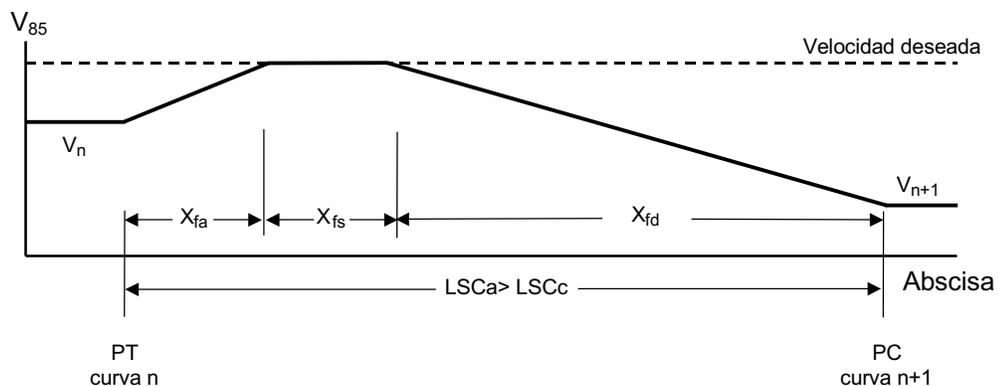
- LSC_a: Longitud de entretangencia del diseño
- LSC_c: Longitud necesaria para alcanzar la aceleración y deceleración pronosticada utilizando la Tabla 6
- V_a: Velocidad máxima en la entretangencia
- ΔV_a: Diferencia entre la velocidad en la curva n y la velocidad máxima en la entretangencia
- V^a_{n+1}: Velocidad de la curva n+1 determinada en función de la tasa de aceleración pronosticada utilizando la Tabla 6
- V_a: Velocidad máxima en la entretangencia
- V_n: Velocidad en la curva n
- V_{n+1}: Velocidad en la curva n+1
- X_{fa}: Longitud necesaria para acelerar desde la velocidad de la curva n hasta la velocidad deseada
- X_{fd}: Longitud necesaria para decelerar desde la velocidad deseada hasta la velocidad de la curva n+1
- X_{fs}: Longitud recorrida con la velocidad deseada
- X_{cd}: Longitud necesaria para decelerar desde la velocidad de la curva n hasta la velocidad de la curva n+1
- X_{ca}: Longitud necesaria para acelerar desde la velocidad de la curva n hasta la velocidad de la curva n+1
- X_{td}: Longitud necesaria para decelerar desde la velocidad máxima V_a hasta la velocidad de la curva n+1

• **Caso 1 : $LSC_a > X_{fa} + X_{fd}$**

Se presenta cuando la longitud de entretangencia del diseño es mayor que la longitud necesaria para alcanzar la velocidad deseada, sin que la aceleración desde la curva n afecte la deceleración de la curva n+1 (Ver Figura 16).

El ajuste en el perfil de velocidad se hace localizando las abscisas inicial y final de la longitud recorrida a la velocidad deseada. El calculo de las variables se hace utilizando las ecuaciones que se muestran en la Tabla 6

Figura 16 Ajuste del perfil de V_{85} utilizando las aceleraciones pronosticadas
 Caso 1 : $LSC_a > X_{fa} + X_{fd}$



Fuente: EVALUATION OF DESIGN CONSISTENCY METHODS FOR TWOLANE RURAL HIGHWAYS. (2000). Report NO. FHWA-RD-99-171.

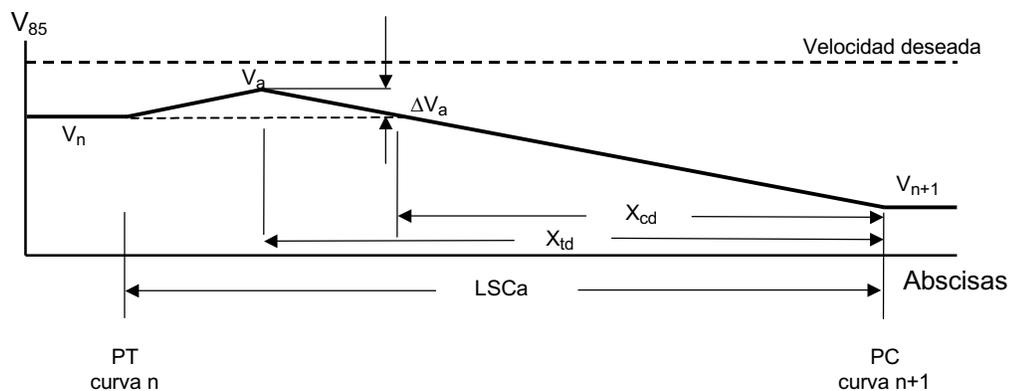
• **Caso 2 : $LSC_a < X_{fa} + X_{fd}$ y $LSC_a > X_{cd}$**

Se presenta cuando la longitud de entretangencia del diseño no es suficiente para alcanzar la velocidad deseada acelerando desde la curva n ($LSC_a < X_{fa} + X_{fd}$), pero es mayor que la longitud necesaria para la deceleración ($LSC_a > X_{cd}$). En este caso se producirá una aceleración menor en la curva n que la aceleración pronosticada utilizando la Tabla 6 (ver Figura 17).

El ajuste en el perfil de velocidades se hace localizando las abscisas donde se produce la velocidad máxima en la entretangencia, las variables que se muestran en la Figura 17 se calculan utilizando las ecuaciones que se muestran en la Tabla 6

Figura 17 Ajuste del perfil de V_{85} utilizando las aceleraciones pronosticadas

Caso 2 : $LSC_a < X_{fa} + X_{fd}$ y $LSC_a > X_{cd}$



Fuente: EVALUATION OF DESIGN CONSISTENCY METHODS FOR TWOLANE RURAL HIGHWAYS. (2000). Report NO. FHWA-RD-99-171.

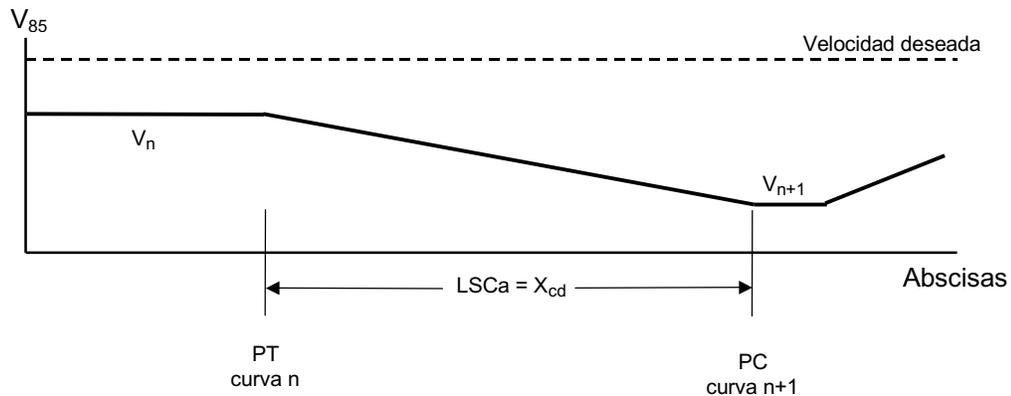
- **Caso 3 : $LSC_a = X_{cd}$**

Se presenta cuando la distancia necesaria para decelerar desde la curva n hasta la curva $n+1$ es igual a la entretangencia ($LSC_a = X_{cd}$), en este caso los vehículos no aceleran en la curva n sino que empiezan a decelerar desde el PT de la curva n hasta el PC de la curva $n+1$ (ver Figura 18).

Las variables que se muestran en la Figura 18 se calculan utilizando las ecuaciones que se muestran en la Tabla 6.

Figura 18 Ajuste del perfil de V_{85} utilizando las aceleraciones pronosticadas

Caso 3 : $LSC_a = X_{cd}$

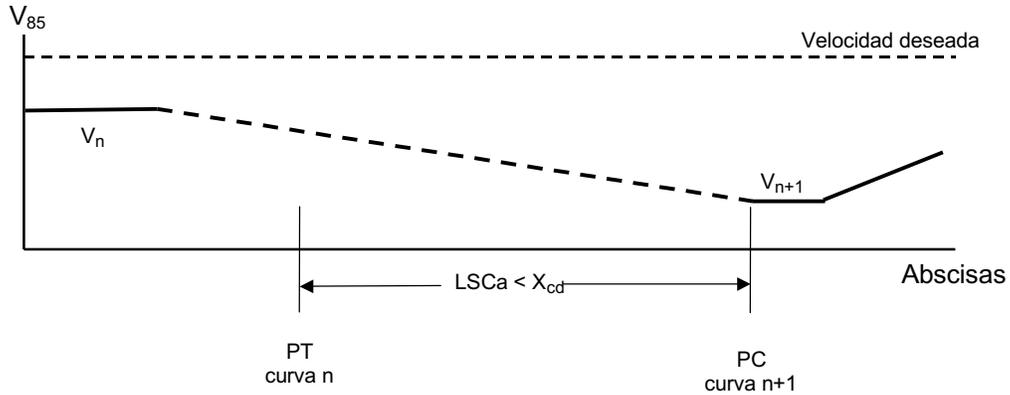


Fuente: EVALUATION OF DESIGN CONSISTENCY METHODS FOR TWOLANE RURAL HIGHWAYS. (2000). Report NO. FHWA-RD-99-171.

- **Caso 4 : $LSC_a < X_{cd}$**

Se presenta cuando la distancia de deceleración desde la curva n hasta la curva n+1 es mayor que la longitud de entretangencia ($LSC_a < X_{cd}$), en este caso se toma la longitud faltante para completar la distancia de deceleración de la longitud de la curva n (ver Figura 19). El Ajuste en el perfil de velocidades se hace localizando la abscisa dentro de la curva n donde los conductores empezarán la deceleración, disminuyendo la velocidad hasta el PC de la curva n+1. Las variables que se muestran en la Figura 19 se calculan utilizando las ecuaciones que se muestran en la Tabla 6.

Figura 19 Ajuste del perfil de V_{85} utilizando las aceleraciones pronosticadas
Caso 4 : $LSC_a < X_{cd}$



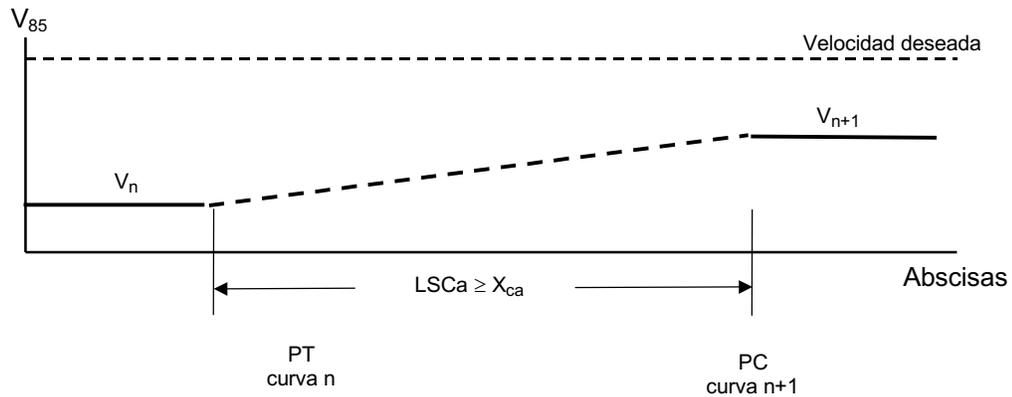
Fuente: *EVALUATION OF DESIGN CONSISTENCY METHODS FOR TWOLANE RURAL HIGHWAYS.* (2000). Report NO. FHWA-RD-99-171.

- **Caso 5 : $LSC_a > X_{ca}$**

Este caso se presenta cuando la velocidad en la curva n es menor que la velocidad en la curva n+1, y en la longitud disponible de entretangencia es mayor que distancia calculada usando las tasas de aceleración de la Tabla 6 (ver Figura 20). El perfil de velocidades no se ajusta, pero se calcula la aceleración con las velocidades del perfil pronosticadas anteriormente.

Las variables que se muestran en la Figura 20 se calculan utilizando las ecuaciones que se muestran en la Tabla 6.

Figura 20 Ajuste del perfil de V_{85} utilizando las aceleraciones pronosticadas
 Caso 5 : $LSC_a > X_{ca}$



Fuente: *EVALUATION OF DESIGN CONSISTENCY METHODS FOR TWOLANE RURAL HIGHWAYS.* (2000). Report NO. FHWA-RD-99-171.

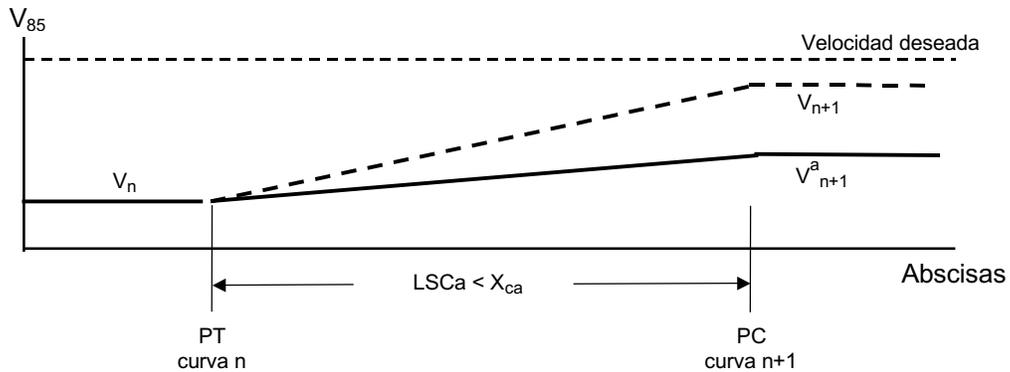
- **Caso 6 : $LSC_a < X_{ca}$**

Se presenta cuando la velocidad en la curva n es menor que la velocidad en la curva n+1, y la longitud disponible de entretangencia es menor que la distancia calculada usando las tasas de aceleración de la Tabla 6.

El ajuste en el perfil de velocidades se hace modificando la velocidad de la curva n+1 a la velocidad V_{n+1}^a , considerando una conducta de manejo razonable del conductor en lugar de asumir que se excederá la tasa de aceleración para alcanzar la velocidad pronosticada (ver Figura 21).

Las variables que se muestran en la Figura 21 se calculan utilizando las ecuaciones que se muestran en la Tabla 6.

Figura 21 Ajuste del perfil de V_{85} utilizando las aceleraciones pronosticadas
Caso 6 : $LSC_a < X_{ca}$



Fuente: *EVALUATION OF DESIGN CONSISTENCY METHODS FOR TWOLANE RURAL HIGHWAYS.* (2000). Report NO. FHWA-RD-99-171.

Para determinar que caso se presenta entre elementos consecutivos a lo largo del alineamiento se debe seguir el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 22.

Además se debe tener en cuenta que en la combinación de curvas horizontales y verticales convexas, la longitud de carretera disponible para la aceleración y deceleración es la longitud de la cresta de la curva vertical.

Tabla 7 Ecuaciones para determinar las variables consideradas en el ajuste del perfil de V_{85} considerando la aceleración pronosticada

#	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN
1	Longitud necesaria para acelerar desde la velocidad de la curva n hasta la velocidad deseada	$X_{fa} = \left(\frac{V_{fs}^2 - V_n^2}{25.92 a} \right)$
2	Longitud necesaria para decelerar desde la velocidad deseada hasta la velocidad de la curva n+1	$X_{fd} = \left(\frac{V_{fs}^2 - V_{n+1}^2}{25.92 d} \right)$
3	Longitud necesaria para alcanzar la aceleración y deceleración pronosticada utilizando la Tabla 6	$LSC_c = X_{fa} + X_{fd}$
4	Longitud recorrida con la velocidad deseada	$X_{fs} = LSC_a - X_{fd} - X_{fa}$
5	Longitud necesaria para decelerar desde la velocidad de la curva n hasta la velocidad de la curva n+1	$X_{cd} = \left(\frac{V_n^2 - V_{n+1}^2}{25.92 d} \right)$
6	Longitud necesaria para acelerar desde la velocidad de la curva n hasta la velocidad de la curva n+1	$X_{ca} = \left(\frac{V_{n+1}^2 - V_n^2}{25.92 a} \right)$
7	Longitud necesaria para decelerar desde la velocidad máxima V_a hasta la velocidad de la curva n+1 (CASO 2)	$X_{td} = \left(\frac{V_a^2 - V_n^2}{25.92 d} \right)$
8	Velocidad máxima en la entretangencia (CASO 2)	$V_a = V_n + \Delta V_a$
9	Diferencia entre la velocidad en la curva n y la velocidad máxima en la entretangencia (CASO 2)	$\Delta V_a = \left(\frac{25.92 a d(LSC_a) + d V_n^2 + a V_{n+1}^2}{(a + d)} \right)^{1/2} - V_n$
10	V_{85} de la curva n+1 determinada en función de la tasa de aceleración pronosticada utilizando la Tabla 6	$V_{n+1}^a = \left(V_n^2 + 25.92 a (LSC_a) \right)^{1/2}$

Fuente: EVALUATION OF DESIGN CONSISTENCY METHODS FOR TWOLANE RURAL HIGHWAYS. (2000). Executive Summary Publication NO. FHWA-RD-99-171.

Donde:

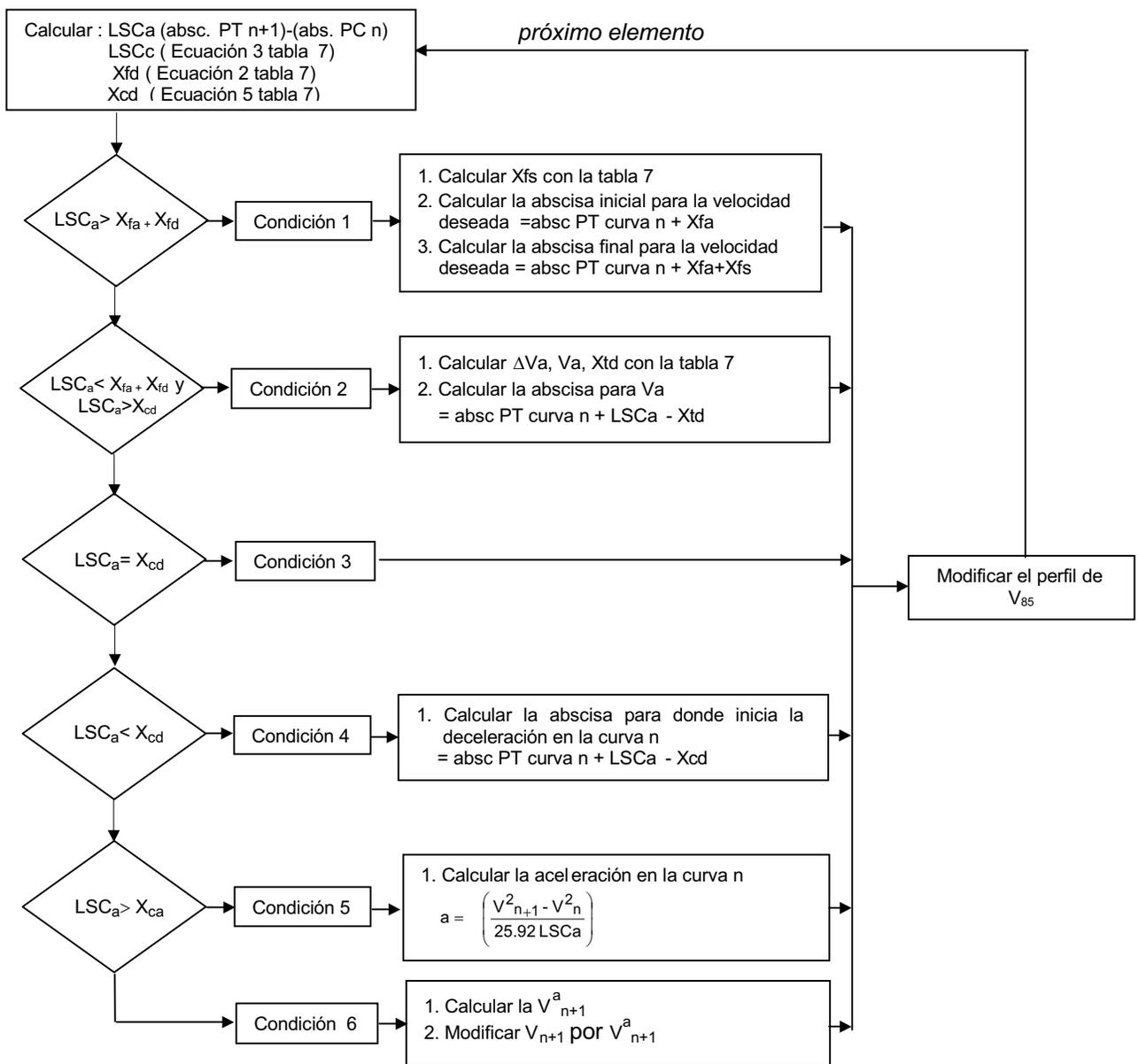
V_{fs} : Velocidad deseada (Km/h)

V_n : V_{85} en la curva n en (Km/h)

V_{n+1} : V_{85} en de la curva n+1 (Km/h)

- d: tasa de deceleración pronosticada utilizando la Tabla 5.2.4 (m/s^2)
 a : tasa de aceleración pronosticada utilizando la Tabla 5.2.4 (m/s^2)
 LSCa : longitud de entretangencia del diseño (m)

Figura 22 Diagrama de flujo para ajustar el perfil de V_{85} con las aceleraciones pronosticadas



Fuente: *Elaboración propia*

6.3.3 Evaluación de la consistencia del diseño

La evaluación de la consistencia se hace mediante dos indicadores: el chequeo de la velocidad de diseño de la carretera y el chequeo de la diferencia de velocidades entre dos elementos consecutivos.

- **Chequeo de la velocidad de diseño**

El módulo compara la velocidad V_{85} obtenida en la etapa anterior con la velocidad de diseño de la carretera (V_D), lo que da origen a cuatro condiciones:

$$\text{Condición 1: } 0 \text{ Km/h} \leq (V_{85} - V_D) \leq 10 \text{ Km/h}$$

$$\text{Condición 2: } 10 \text{ Km/h} < (V_{85} - V_D) \leq 20 \text{ Km/h}$$

$$\text{Condición 3: } 20 \text{ Km/h} < (V_{85} - V_D)$$

$$\text{Condición 4: } (V_{85} - V_D) < 0 \text{ Km/h}$$

En el perfil de velocidades, diferencias mayores de 20 Km/h se representan en color rojo e indican que puede ser falso asumir que la mayor parte de los vehículos viajan a velocidades cercanas a la de diseño. En este caso debe chequearse el diseño para asegurar que las características de la carretera correspondan a las velocidades de operación esperadas.

Diferencias entre 10 y 20 Km/h se representan en color amarillo y corresponden a situaciones que deberían ser revisadas por el diseñador, mientras que diferencias menores a 10 Km/h se representan en color verde y sugieren unas condiciones más favorables y que la velocidad de diseño es un buen estimador de la velocidad de operación de los vehículos.

- **Chequeo de la diferencia de velocidad entre elementos consecutivos**

Es el indicador más importante en la medida de la consistencia en carreteras de dos carriles y se refiere a la variación del V_{85} entre dos elementos en planta. Pueden presentarse tres condiciones, tanto al pasar de recta a curva como para dos curvas consecutivas:

Condición 1: $(V_{85 \text{ en recta}} - V_{85 \text{ en curva}}) \leq 10 \text{ Km/h}$

Condición 2: $10 \text{ Km/h} < (V_{85 \text{ en recta}} - V_{85 \text{ en curva}}) \leq 20 \text{ Km/h}$

Condición 3: $20 \text{ Km/h} < (V_{85 \text{ en recta}} - V_{85 \text{ en curva}})$

En el perfil de velocidades se colocan banderas que indican la condición; las banderas rojas indican cambios de velocidad de mayores de 20 Km/h, las amarillas cambios entre 10 y 20 Km/h y las verdes cambios menores de 10 Km/h.

Por otra parte considera las estaciones en las que se produce una deceleración mayor que la considerada como confortable entre curvas (1.25 m/s^2 ó 4.5 [Km/h]/s), estas se marcan con un asterisco en el informe de resultados.

La desaceleración entre dos elementos se puede calcular mediante la expresión

$$d = \left(\frac{V_{n+1}^2 - V_n^2}{25.92 \text{ LSCa}} \right)$$

donde

d: tasa de desaceleración (m/s^2)

V_n : velocidad en la curva n (Km/h)

V_{n+1} : velocidad en la curva n+1 (Km/h)

LSC_a : distancia entre las curvas o entretangencia (m)

6.3.4. Datos requeridos

Los datos requeridos por el módulo de consistencia son:

- **Planta**

Del Alineamiento horizontal es necesaria la siguiente información:

- Inicio y fin de tramos rectos. Abscisa donde inicia y abscisa donde termina cada tramo recto
- Inicio y fin de clotoides. Abscisa donde inicia y abscisa donde termina cada clotoide
- Inicio, fin, radio y dirección (izquierda o derecha) de las curvas circulares
- Estación de inicio. Abscisa de inicio del diseño
- Coordenadas de inicio. Coordenada X, coordenada Y
- Azimut de inicio. En formato centesimal

- **Perfil**

Del alineamiento vertical se requieren:

- Ubicación y altitud del vértice de la curva vertical. Abscisa y cota
- Inclinationes de la rasante, en porcentaje (positivo en ascenso, negativo en descenso)
- Longitud de las curvas verticales (se indica la longitud en metros antes y después del vértice)

- **Sección transversal**

De la sección transversal se requieren:

- Ancho de carril (m)
- Ancho de berma (metros)

- **Otros datos**

Adicionalmente se requiere la siguiente información de carácter general:

- Velocidad de diseño en Km/h.
- Tipo de vehículo. Se aceptan los cinco tipos de vehículo indicados en la Tabla 4 (8).

7. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

El desarrollo de la investigación comprendió las siguientes etapas:

7.1. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

Se consultaron algunos estudios desarrollados por la Universidad del Cauca, entre ellos la tesis “Efecto de la curvatura en la velocidad de los vehículos” (14), “Efecto de la curvatura en la velocidad en terreno Montaño” (13) y “Trenes Cañeros” (1)

Vía Internet se descargaron los reportes de estudios desarrollados por la Administración Federal de Carreteras FHWA de los Estados Unidos tales como “Alternative Design Consistency Rating Methods for Two-Lane Rural Highways”(8), “Speed Prediction For Two-Lane Rural Highways,”(7), “Evaluation of Design Consistency Methods for Two-Lane Rural Highways”(11) “Prediction Of The Expected Safety Performance Of Rural Two-Lane Highways(9)”, y se obtuvo el artículo “Procedimientos de evaluación de la consistencia del trazado de las carreteras: IHSDM (3)“.

Adicionalmente se obtuvieron los planos planta - perfil de las carreteras Pasto - Popayán (tramo Mojarras - Popayán) y Popayán - Cali (tramo Popayán - Santander de Quilichao), suministrados por las firmas Pablo Emilio Bravo Ltda. e Inargos Ltda. respectivamente y el inventario de características geométricas del tramo Mojarras - Popayán - La variante a Popayán, suministrado por la firma Escala Ingeniería encargada de la Administración de Mantenimiento Vial.

7.2 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN PRIMARIA

Se realizó haciendo uso de los criterios y condiciones planteados en las investigaciones desarrolladas por la FHWA para el estudio del IHSDM, buscando homogeneidad entre las condiciones con las que se plantearon los modelos de predicción y las V_{85} de campo, de tal forma que en la evaluación de estos modelos no exista influencia de ellas y permita establecer la validación para su uso en Colombia.

Las siguientes son las consideraciones hechas en el desarrollo de los modelos de predicción de V_{85} de la FHWA.

7.2.1 Información geométrica

Para poder apreciar el efecto del alineamiento horizontal y vertical por separado en el análisis estadístico, se realizó una matriz de los sitios de estudio que consideró las siguientes combinaciones entre el alineamiento horizontal y vertical:

- **Curvas horizontales sobre pendientes:** Esta combinación utiliza como variables el radio de curvatura y la pendiente en porcentaje, variables que se agrupan en rangos donde los vehículos tienen un comportamiento homogéneo de acuerdo al estudio realizado por la FHWA en 176 curvas en los Estados Unidos (8)
- **Curvas verticales convexas en rectas:** Esta combinación utiliza curvas verticales convexas clasificadas por la limitación en la distancia de visibilidad, es decir si el coeficiente de curvatura vertical K es menor de 43 la curva tiene limitación en la distancia de visibilidad, si es mayor o igual que 43 no tiene esta limitación. El valor de K se estima para una velocidad de diseño de 90 Km/h.
- **Curvas verticales cóncavas en rectas**
- **Curvas horizontales y curvas verticales cóncavas**
- **Curvas horizontales y curvas verticales convexas**

Estas últimas combinaciones consideran una separación máxima de 30 m entre los puntos de inflexión de las curvas horizontales y verticales, esta separación revela el efecto de la combinación de los dos alineamientos, aunque se están realizando estudios para obtener cuantitativamente una mejor apreciación (8)

- **Rectas en pendiente horizontal:** Dentro de las rectas se consideran rectas largas, moderadas y cortas; Las rectas largas son aquéllas donde el conductor puede alcanzar y mantener la velocidad deseada, las rectas moderadas permiten al conductor acelerar y alcanzar la velocidad deseada pero no mantenerla, y las rectas cortas no permiten acelerar hasta alcanzar la velocidad deseada(8)

La Tabla 8 muestra la matriz de las combinaciones expuestas, así como la cantidad de tramos seleccionados para el presente estudio.

Tabla 8 Matriz de los sitios de estudio

ALINEAMIENTO VERTICAL (% de pendiente o tipo de curva)	ALINEAMIENTO HORIZONTAL Radio de curvatura (m)					
	Recta	400-3500	200 - 399	145 -199	<144	Total
-10 a -4%	-	-	2	3	23	28
-4 a 0%						
0 a 4%	14	5	16	6	2	43
4 a 10%	-	-	2	3	23	28
Curvas Convexas	LDV					
	NLDV					
Curvas Cóncavas	3					3
Total	17	5	20	12	48	102

LDV = Limitada por la distancia de visibilidad $K < 43$.
 NLDV= No limitada por la distancia de visibilidad $K \geq 43$.

Fuente: *Elaboración propia*

Con base en las combinaciones geométricas de la Tabla 8 se seleccionaron 56 curvas en terreno montañoso, 29 curvas y 14 rectas en terreno plano, localizadas

en los tramos que se muestran en las Tablas 9, 10 y 11, en las que se agrupan por tipo de terreno y pendiente longitudinal.

Tabla 9 Localización de curvas horizontales en terreno plano

Curva No	CARRETERA	TRAMO	SENTIDO	R (m)	Δ (°)	e (%)
1	Pto Tejada - Cali	Pto Tejada - Cruce Candelaria	Cruce Candelaria - Pto Tejada	435.85	36.0000	2.06
2	Pto Tejada - Cali	Pto Tejada - Cruce Candelaria	Pto Tejada - Cruce Candelaria	331.17	20.0000	3.28
3	Pto Tejada - Cali	Pto Tejada - Cruce Candelaria	Pto Tejada - Cruce Candelaria	322.13	36.0000	2.72
4	Pto Tejada - Cali	Pto Tejada - Cruce Candelaria	Pto Tejada - Cruce Candelaria	343.77	38.0000	3.40
5	Pto Tejada - Cali	Pto Tejada - Cruce Candelaria	Pto Tejada - Cruce Candelaria	402.50	40.0000	4.77
6	Popayán - Cali	Y de Villa Rica - Jamundí	Y de Villa Rica - Jamundí	248.85	60.0000	2.06
7	Popayán - Cali	Y de Villa Rica - Jamundí	Y de Villa Rica - Jamundí	678.10	20.0000	4.93
123	Popayán - Cali	Popayán - Santander	Santander - Popayán	151.83	18.5833	12.17
124	Popayán - Cali	Popayán - Santander	Popayán - Santander	146.36	41.6806	10.14
187	Popayán - Cali	Popayán - Santander	Popayán - Santander	381.05	28.4778	6.00
37	Popayán - Cali	Popayán - Santander	Santander - Popayán	145.39	39.2722	10.49
38	Popayán - Cali	Popayán - Santander	Santander - Popayán	291.75	24.3333	9.43
39	Popayán - Cali	Popayán - Santander	Popayán - Santander	284.92	37.3667	9.86
40	Popayán - Cali	Popayán - Santander	Popayán - Santander	436.08	25.2000	4.14
100	Pasto - Popayán	Mojarras - Remolino	Popayán - Pasto	260.43	22.0000	6.56
69	Pasto - Popayán	Mojarras - Piedra Sentada	Pasto - Popayán	350.62	15.0067	3.89
70	Pasto - Popayán	Mojarras - Piedra Sentada	Pasto - Popayán	267.54	22.4167	5.96
75	Pasto - Popayán	Mojarras - Piedra Sentada	Pasto - Popayán	381.98	11.6667	4.76
77	Pasto - Popayán	Mojarras - Piedra Sentada	Pasto - Popayán	166.91	40.0167	8.06
80	Pasto - Popayán	Mojarras - Piedra Sentada	Popayán - Pasto	390.66	19.0167	5.28
82	Pasto - Popayán	Mojarras - Piedra Sentada	Pasto - Popayán	229.20	31.0667	6.71
83	Pasto - Popayán	Mojarras - Piedra Sentada	Popayán - Pasto	177.23	33.4889	6.67
84	Pasto - Popayán	Mojarras - Piedra Sentada	Pasto - Popayán	238.75	21.3222	5.48
86	Pasto - Popayán	Mojarras - Piedra Sentada	Popayán - Pasto	554.48	11.7417	5.59
87	Pasto - Popayán	Mojarras - Piedra Sentada	Popayán - Pasto	242.11	25.1750	7.27
96	Pasto - Popayán	Mojarras - Piedra Sentada	Popayán - Pasto	306.96	20.3333	5.17
136	Pasto - Popayán	Mojarras - Piedra Sentada	Pasto - Popayán	193.15	45.8917	6.08
242	Pasto - Popayán	Mojarras - Piedra Sentada	Popayán - Pasto	124.59	29.4333	7.70
243	Pasto - Popayán	Mojarras - Piedra Sentada	Pasto - Popayán	131.78	40.2667	7.63

Tomado de PRIETO GERMÁN. *Efecto de curvatura en la velocidad de los vehículos.* (1994)

Nota: La numeración de las curvas corresponde al orden dado en ése estudio.

Tabla 10 Localización de curvas horizontales en terreno montañoso

CURVA No	CARRETERA	TRAMO	SENTIDO	PENDIENTE (%)	R (m)	Δ (°)	e (%)
1*	Armenia - Ibagué	Armenia-La Linea	Armenia - Ibagué	6-8%	35	97.87	9.7
2*	Armenia - Ibagué	Armenia-La Linea	Armenia - Ibagué	6-8%	152	23.11	1.25
3*	Armenia - Ibagué	Armenia-La Linea	Armenia - Ibagué	6-8%	146	26.30	7.4
4*	Armenia - Ibagué	Armenia-La Linea	Armenia - Ibagué	6-8%	54	67.37	5.3
5*	Armenia - Ibagué	Armenia-La Linea	Armenia - Ibagué	6-8%	85	83.78	7.4
6*	Armenia - Ibagué	Armenia-La Linea	Armenia - Ibagué	6-8%	98	30.84	6
7*	Armenia - Ibagué	Armenia-La Linea	Armenia - Ibagué	6-8%	76	20.93	6.9
8*	Armenia - Ibagué	Armenia-La Linea	Armenia - Ibagué	6-8%	105	20.53	8
9*	Armenia - Ibagué	Armenia-La Linea	Armenia - Ibagué	6-8%	24	133.62	9.9
10	Mojarras - Popayán	Rosas - Timbío	Mojarras - Popayán	5.6%	80	47.47	5
11	Mojarras - Popayán	Rosas - Timbío	Mojarras - Popayán	5.6%	76	34	5
12	Mojarras - Popayán	Rosas - Timbío	Mojarras - Popayán	5.6%	76	30	5
13	Mojarras - Popayán	Rosas - Timbío	Mojarras - Popayán	5.6%	130	23.43	4
14	Mojarras - Popayán	Rosas - Timbío	Mojarras - Popayán	6.18%	63	27.5	4
15	Mojarras - Popayán	Rosas - Timbío	Mojarras - Popayán	6.18%	29	57.57	6
16	Mojarras - Popayán	Rosas - Timbío	Mojarras - Popayán	6.18%	20	72.43	6
17	Mojarras - Popayán	Rosas - Timbío	Mojarras - Popayán	6.18%	33	54	6
18	Mojarras - Popayán	Rosas - Timbío	Mojarras - Popayán	6.18%	31	54	6
19	Mojarras - Popayán	Rosas - Timbío	Mojarras - Popayán	6.18%	30	71.76	6
20	Mojarras - Popayán	Rosas - Timbío	Mojarras - Popayán	5.67%	64	34.67	4
21	Mojarras - Popayán	Rosas - Timbío	Mojarras - Popayán	5.67%	95	26	4
22	Mojarras - Popayán	Rosas - Timbío	Mojarras - Popayán	5.67%	24	110.24	6
23	Mojarras - Popayán	Rosas - Timbío	Mojarras - Popayán	5.67%	41	68.57	5
24	Mojarras - Popayán	Rosas - Timbío	Mojarras - Popayán	5.67%	54	52.67	4
25	Mojarras - Popayán	Rosas - Timbío	Popayán - Mojarras	7.90%	227	11.1	2
26	Mojarras - Popayán	Rosas - Timbío	Popayán - Mojarras	7.90%	117	47.13	5
27	Mojarras - Popayán	Rosas - Timbío	Popayán - Mojarras	7.90%	204	21.93	5
28	Mojarras - Popayán	Rosas - Timbío	Popayán - Mojarras	7.90%	173	29.43	5

* Tomado de UNIVERSIDAD DEL CAUCA. (1996) *Investigación sobre capacidad , niveles de servicio y mejoras de carreteras de dos carriles: Efecto de la curvatura en la velocidad (Terreno montañoso)*. Colombia.

Nota: La numeración de las curvas corresponde al orden dado en éste estudio.

Tabla 11 Localización de rectas en terreno plano

RECTA	TRAMO	ABSCISA
1	Puerto Tejada - Candelaria	PR25+500
2	Villa de Rica - Jamundí	PR95+800
3	Villa de Rica - Puerto Tejada	PR5+200
4	Puerto Tejada - Candelaria	PR25+500
5	Palma seca - Crucero Guajira	PR5+800
6	Rozo - Cerrito	PR8+800
7	Candelaria - Palmira	PR37+500
8	Amaime - Cerrito	PR37+900
9	Cerrito - Guacarí	PR47+900
10	Mediacanoa - Buga	PR115+000
11	La Paila - Zarzal	PR27+000
12	Zarzal - Obando	PR43+500
13	Vijes - Media canoa	PR35+500
14	Media canoa - Río frío	PR16+500

Tomado de UNIVERSIDAD DEL CAUCA.(2004).Informe Final convenio INVIAS 315-2004 "Trenes Cañeros".Colombia.

7.2.2 Datos de velocidad

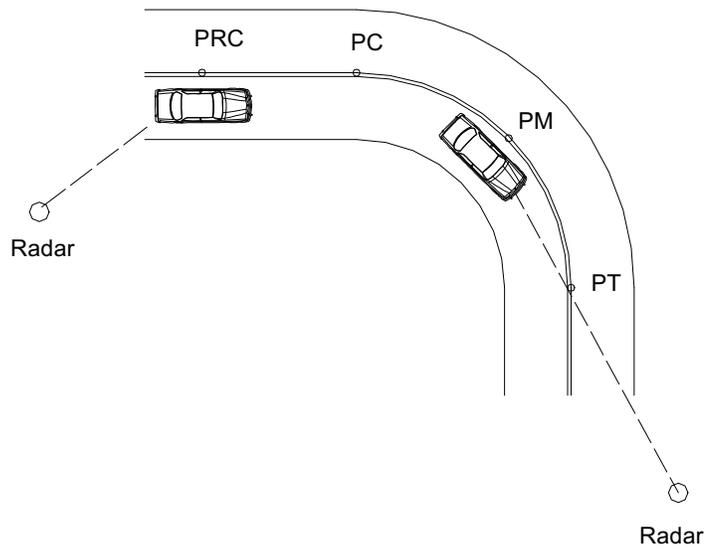
Las condiciones utilizadas para medir las velocidades fueron las siguientes:

1. Vehículo tipo automóvil
2. Durante el día
3. Velocidad a flujo libre
4. Bajo condiciones atmosféricas de tiempo seco
5. Superficie del pavimento en buen estado

Además se consideraron los siguientes puntos dentro de cada elemento geométrico para medir las velocidades puntuales:

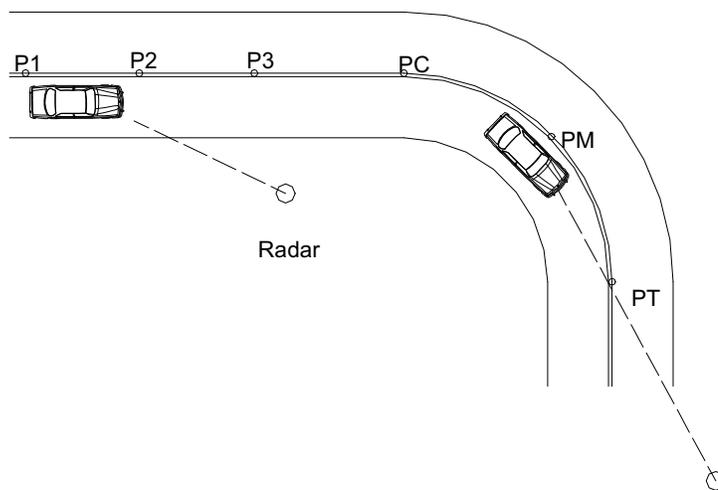
- **Curvas horizontales:** Inicio de la curva circular (PC), centro de la curva circular (PM), fin de la curva circular (PT), en el punto medio para rectas precedentes cortas (PRC) como se puede ver en la Figura 23 y para rectas precedentes largas se considera puntos hasta 200 m antes del PC, en este estudio se toman a 60 m (P3), 130 m (P2) y 200 m (P1), como se muestra en la Figura 24.

Figura 23 Puntos considerados para medir velocidades en curvas horizontales con recta precedente corta



Fuente: *Elaboración propia*

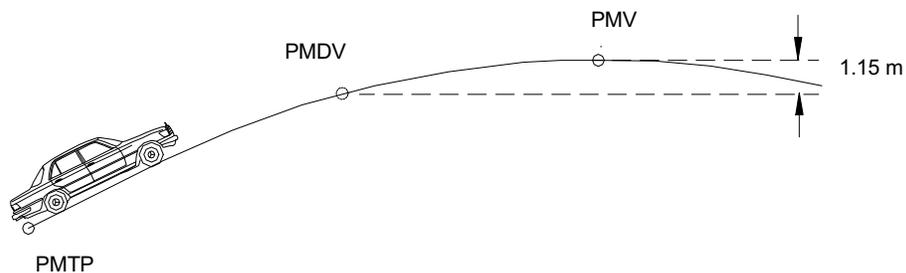
Figura 24 Puntos considerados para medir velocidades en curvas horizontales con recta precedente larga



Fuente: *Elaboración propia*

- **Curvas verticales con limitación en la distancia de visibilidad:** Punto medio de la curva vertical (PMV), punto de mínima distancia de visibilidad (PMDV) y el punto medio de la tangente precedente (PMTP). En este estudio se define el PMDV como el punto que tiene una elevación de 1.15 m por debajo del punto inflexión antes de la cresta de la curva vertical (ver Figura 25). La altura de 1.15 m corresponde a la altura del ojo del conductor, de acuerdo a las normas de diseño geométrico del INVIAS.

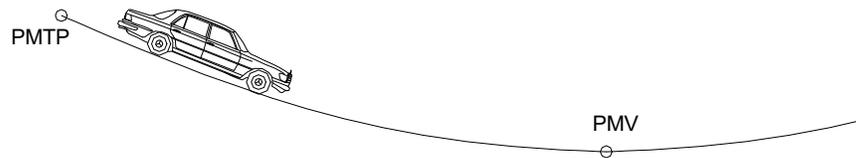
Figura 25 Puntos considerados para medir velocidades en curvas verticales convexas con limitación en la distancia de visibilidad



Fuente: *Elaboración propia*

- **Combinación de curvas horizontales y curvas verticales con limitación en la distancia de visibilidad:** Punto medio de la curva horizontal (PM), punto de mínima distancia de visibilidad de la curva vertical (PMDV), y el punto medio entre PM y PMV (8)
- **Curvas verticales con distancia de visibilidad no limitada:** Punto medio de la tangente precedente (PMT) y el punto de inflexión de la curva vertical (PMV) (ver Figura 26).

Figura 26 Puntos considerados para medir velocidades en curvas verticales cóncavas sin limitación en la distancia de visibilidad



Fuente: *Elaboración propia*

En éste estudio, para obtener las V_{85} de campo de cada combinación de los elementos geométricos antes expuestos, se desarrollaron las siguientes etapas:

- 1. Determinar el tamaño de la muestra:** El número de observaciones se determinó teniendo en cuenta la desviación estándar obtenida en pruebas piloto para cada condición de alineamiento horizontal y vertical, tal como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12 Desviación estándar estimada de pruebas piloto

PENDIENTE (%)	ELEMENTO HORIZ/TAL	CARRETERA	SECTOR	SENTIDO	N	σ (Km/h)
0 a 4 %	Recta*	Popayán - Santander	K38+003.62 - k38+566.92	Santander - Popayán	62	15.50
4 a 9%	Curva	Mojarras - Popayán	PR 106+869 - 106+935	Mojarras - Popayán	38	7
-4 a -9%	Curva	Mojarras - Popayán	PR 106+869 - 106+935	Popayán - Mojarras	48	6
Cóncava	Recta	Mojarras - Popayán	PR 111+855 - 111+950	Popayán - Mojarras	51	9.4
Convexa	Recta	Mojarras - Popayán	PR 112+939 - 112+973	Mojarras - Popayán	40	9.7

* Tomado PRIETO GERMÁN. *Efecto de curvatura en la velocidad de los vehículos. (1994)*

Fuente: *Elaboración propia*

El tamaño mínimo de la muestra permite obtener la velocidad representativa del total de vehículos que pasaron por un punto de la vía y que van a pasar mientras las condiciones no cambien significativamente, sus características permiten inferir las características de la población.

Para controlar los errores de inferencia de los valores estimados se fijaron los siguientes parámetros:

- Error tolerable máximo 2.5 Km/h, (error de inferencia en el parámetro estimado que se puede tolerar frecuentemente)
- Nivel de confianza 90%, (probabilidad de que parámetro estimado no rebase el error tolerable máximo)

Una vez determinados estos valores, se aplicó la siguiente expresión (12):

$$\text{Tamaño mínimo de la muestra} = \left(\frac{\text{Constante } z \times \text{desviación estándar}}{\text{Error máximo tolerable}} \right)^2$$

La constante z depende del nivel de confianza seleccionado y corresponde a 1.64 para el nivel de confianza del 90%. El tamaño mínimo de muestra para cada combinación geométrica se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13 Tamaño mínimo de la muestra para cada combinación geométrica considerada

PENDIENTE (%)	ELEMENTO HORIZONTAL	σ ESTIMADA (Km/h)	TAMAÑO MUESTRA N.C 90%
0 a 3	Recta	15.50	105
4 a 9	Curva	7	20
-4 a -9	Curva	6	20
Cóncava	Recta	9.4	40
Convexa	Recta	9.7	40

Fuente: *Elaboración propia*

2. Seleccionar del dispositivo para medir velocidades puntuales: Los dispositivos seleccionados para medir velocidad puntual fueron los radares de mano Kustom's FALCON con las siguientes características:

Microondas

- Frecuencia de radio : 24.15 Gigahertz
- Poder de salida: 12 nW típica, 40 nW máx
- Tipo de antena: Corno cónica
- Polarización: Circular a la izquierda
- Ancho del Haz dB: 12+-1°
- Densidad del poder : 0.31 mW/cm² típica, 1.08 mW/cm² máx

Unidad de conteo

- Rango de operación del voltaje: 10.8 VDC - 16.5 VDC , 13.6 nominal
- Operación T° / humedad: 0 a 60 °C.
- Rango de registro de velocidades: 20 a 90 MPH sin dB objetivo, y típicamente de 15 a 199 MPH.

Figura 27 Radar FALCON



Fuente: *Elaboración propia*

3. Chequear del funcionamiento correcto del radar: Antes de iniciar cada jornada se realizaron las 4 pruebas recomendadas por el fabricante para garantizar el correcto funcionamiento del radar.

1. Prueba de luces

Esta prueba consiste en presionar el botón LAMP TEST, y el tablero del radar debe registrar el número 888 y los indicadores “LED” deben iluminarse.

- **Prueba de circuito automático**

Esta prueba consiste en presionar el botón TEST; en la pantalla del radar debe aparecer la lectura “32”, que corresponde a la comparación interna de los cristales de cuarzo que tiene el radar. La no correlación de estos cristales hace que se ilumine el indicador “XTAL ERR”.

- **Prueba del diapasón**

Consiste en enfocar el diapasón en vibración con el radar y hacer la lectura. El diapasón es una herramienta adicional calibrada exclusivamente para verificar el correcto funcionamiento del radar. La vibración producida por el diapasón debe generar una lectura de 80 Km/h.

- **Prueba del movimiento**

Es una prueba adicional que se hace al radar y consiste en realizar lecturas de velocidad en un vehículo que viaja adelante del vehículo de pruebas; estas lecturas se comparan con la velocidad reportada por el velocímetro del vehículo y no debe haber gran discrepancia.

Si alguna de estas pruebas no se cumple el radar debe ser revisado por un técnico.

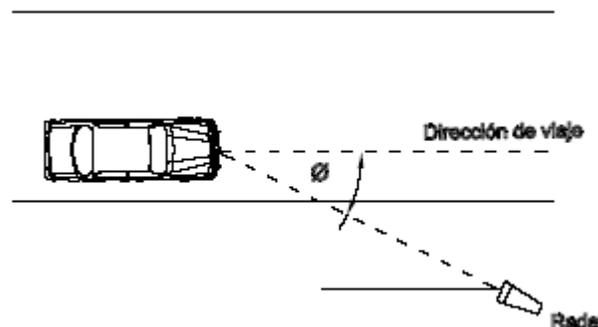
4. Consideraciones para medir velocidades puntuales con radar

La velocidad que se mide con estos instrumentos se ve afectada por el ángulo de incidencia que forma el radar con respecto a la dirección de viaje del

vehículo, ya que la distancia desde el radar al vehículo resulta menor que la que lleva el vehículo con respecto a la vía. Para corregir ese error se debe dividir la velocidad medida entre el coseno del ángulo de incidencia (12), o sea, el que forma la visual del radar al vehículo con la trayectoria del vehículo (ver Figura 28). Si el ángulo es menor de 15° , los errores introducidos no son significativos.

Otro factor importante a considerar es que su presencia no afecte la velocidad natural de los vehículos, de tal forma que debe ocultarse y, si es posible, apuntar a los vehículos por detrás.

Figura 28 Ángulo de incidencia ϕ entre la trayectoria del vehículo y la visual del radar



Fuente: *Elaboración propia*

7.3 VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN de V_{85} PLANTEADOS EN EL ESTUDIO DEL IHSDM PARA SU USO EN COLOMBIA

Uno de los objetivos planteados en ésta investigación es determinar la conveniencia de la utilización en Colombia de los modelos desarrollados en el estudio de IHSDM. En el proceso de evaluación se utilizaron herramientas estadísticas que permiten observar la precisión y comportamiento reflejado en las frecuencias pronosticadas por estos modelos frente a las frecuencias observadas en el campo.

El proceso de evaluación comprendió las siguientes etapas:

1. Calcular el V_{85} en el punto medio de la curva para cada sitio del estudio utilizando los modelos del IHSDM (ver Tabla 3) y los modelos planteados por los investigadores internacionales (ver Tabla 14).
2. Graficar el V_{85} pronosticado contra el V_{85} de campo, esta grafica permitió observar cualitativamente el comportamiento de cada uno de los modelos, pudiéndose seleccionar a priori el mejor modelo como aquel que agrupa sus valores en la recta trazada a 45 grados del eje x.
3. Calcular el error medio cuadrático (MSE), la diferencia absoluta media (DMA), la diferencia absoluta media en % (DMA%) y sesgo (BIAS) para cada uno de los sitios de estudio. Estas estadísticas se usaron para describir la diferencia entre las V_{85} pronosticadas por el modelo y las V_{85} observadas en el campo mediante la medición con radar; Se definen así:

- Cuadrado del error medio

$$MSE = \sum_{i=1}^n \frac{(V_{85} \text{ observado }_i - V_{85} \text{ pronostica do }_i)^2}{n}$$

- Diferencia absoluta media

$$DMA = \text{Media de } |V_{85} \text{ observado }_i - V_{85} \text{ pronostica do }_i|$$

- Diferencia absoluta media en porcentaje

$$DMA\% = \text{Media de } \left| \frac{V_{85} \text{ observado }_i - V_{85} \text{ pronostica do }_i}{V_{85} \text{ pronostica do }_i} \right| \times 100$$

- Sesgo

$$BIAS = \text{Media de } (V_{85} \text{ observado }_i - V_{85} \text{ pronostica do }_i)$$

4. Realizar la prueba de Chi-cuadrado para evaluar el comportamiento de los modelos de predicción de V_{85} determinando si existe una diferencia significativa entre las V_{85} observadas y las V_{85} pronosticadas por los modelos empleando un nivel de confianza 95%. La estadística Chi-cuadrado se define así:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(V_{85\text{observado}_i} - V_{85\text{pronosticado}_i})^2}{V_{85\text{pronosticado}_i}}$$

En ésta prueba se plantea como hipótesis nula que si χ^2 calculado es menor que χ^2 crítico obtenido de una tabla estadística, las diferencias entre V_{85} observadas y las V_{85} pronosticadas por los modelos no son significativas para el nivel de confianza dado.

5. Analizar los resultados de las pruebas estadísticas desarrolladas en las anteriores etapas para determinar la validación de un modelo para su uso en Colombia.

7.3.1 Validación de modelos de predicción de V_{85} para curvas horizontales en pendientes entre 0 y 4%

Se utilizó el modelo de predicción 3 de IHSDM (ver Tabla 3) y los modelos planteados por investigadores internacionales que solo consideran el alineamiento horizontal (ver Tabla 14)

En la validación del modelo para éstas condiciones se calculó el V_{85} de campo empleando la base de datos de velocidades puntuales medidas con radar de la tesis “Efecto de la curvatura en la velocidad de los vehículos” del ingeniero German Prieto(14), las cuales se midieron bajo las condiciones antes expuestas.

En las Tablas 15, 16 y 17, y Figuras 29, 30, 31 y 32 se desarrolló el proceso de evaluación para estas condiciones de alineamiento y pendiente

Tabla 14 Ecuaciones para estimar V_{85} considerando sólo el alineamiento horizontal

AUTOR (ES)	ECUACIÓN	AÑO
Lamm y Choueiri	$V_{85} = 95.78 - 0.076 \text{ CCR}$ $V_{85} = 96.152 - 0.302 \text{ GC}$	1987
Lamm et al.	$V_{85} = 94.398 - 3188.656 / R$	1990
Kanellaidis et al.	$V_{85} = 129.88 - 623.1 / (\sqrt{R})$	1990
Morrall y Talarico	$V_{85} = \exp(4.561 - 0.0058 \text{ GC})$	1994
Islam y Seneviratne	$V_{85 \text{ PC}} = 95.41 - 0.45 \text{ GC} - 0.001 \text{ GC}^2$ $V_{85 \text{ PR}} = 103.03 - 0.73 \text{ GC} - 0.003 \text{ GC}^2$ $V_{85 \text{ PM}} = 96.11 - 0.32 \text{ GC}$	1994
Krammes et al.	$V_{85} = 102.44 - 2471.81 / R + 0.012 \text{ Lc} - 0.10 \Omega$	1995
Voigt	$V_{85} = 99.61 - 2951.37/R + 0.014 \text{ Lc} - 0.13 \Omega - 71.82e$	1996
McFadden y Elefteriadou	$V_{85} = 103.66 - 1.95 \text{ GC}$ $V_{85} = 41.62 - 1.29 \text{ GC} + 0.0049 \text{ Lc} - 0.12 \Omega + 0.95 \text{ Vr}$	1997
Cardoso et al.	$V_{85} = 35086 * 289999 / \sqrt{R} + 0.759 * \text{Vr} + c$	1998
Ottesen y Krames	$V_{85} = 103.66 - 1.95 \text{ GC}$ $V_{85} = 102.44 - 1.57 \text{ GC} + 0.012 \text{ Lc} - 0.01 \text{ GC Lc}$ $V_{85} = 41.62 - 1.29 \text{ GC} + 0.0049 \text{ Lc} - 0.12 \text{ GC Lc} + 0.95 \text{ Vr}$	2000
McFadden y Elefteriadou	$V_{85 \text{ reduc}} = -14.90 + 0.144 * V_{85 @ \text{PC}200} + 0.0153 * \text{Lr} + 954.55 / R$ $V_{85 \text{ reduc}} = -0.812 + 0.0017 * \text{Lr} + 998.19 / R$	2000
Gibreel et al.	$V_{85} = 102.2 - 0.10 \Omega$	2001

Fuente: SANCHEZ, J.; CASTRO, M. (2005). *Evaluación de la consistencia del trazado de las carreteras (Paper)*. Madrid, España.

Donde:

CCR: tasa de cambio de curvatura

GC: grado de curvatura

R: radio de curvatura

Ω : ángulo de deflexión

Lc: longitud de la curva circular

e: peralte

Vr: velocidad en la recta

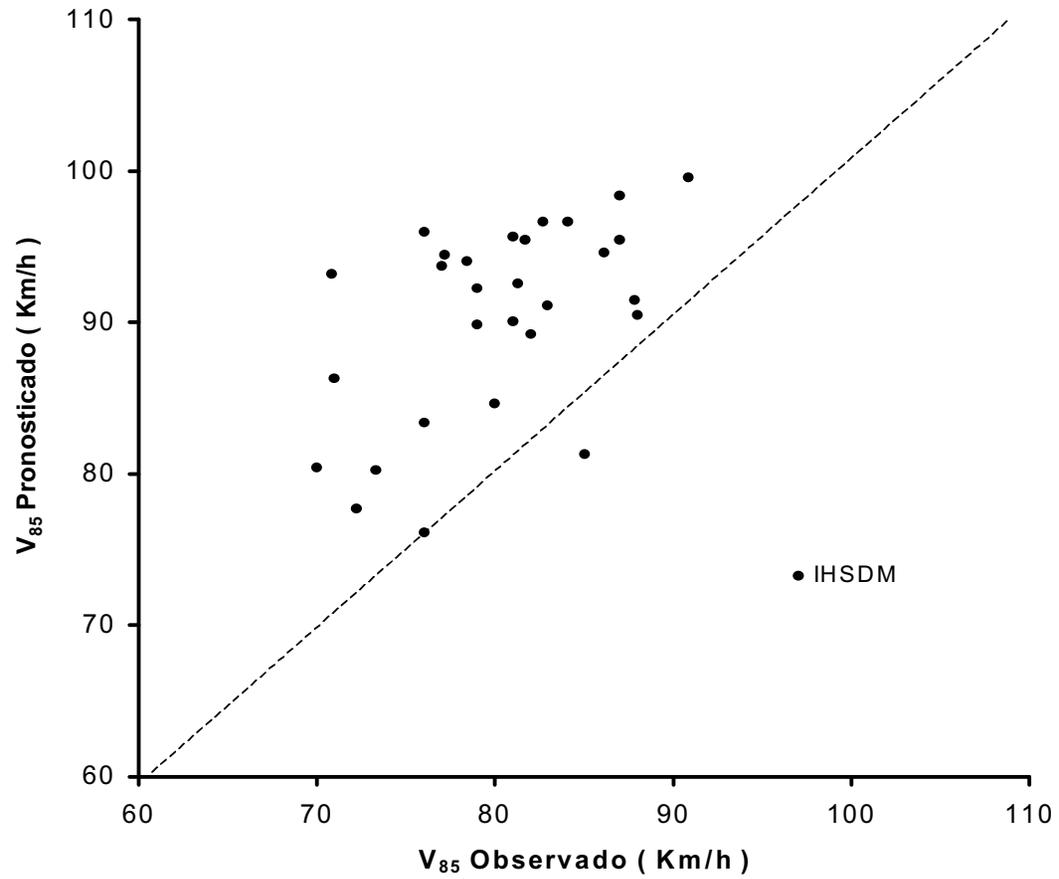
Lr: longitud de la recta

Tabla 15 V_{85} observado y V_{85} pronosticado utilizando los modelos de predicción
para curvas horizontales en pendientes entre 0 y 4%

CURVA	CAMPO	IHSDM	CONSIDERA SOLO EL ALINEAMIENTO HORIZONTAL (TABLA 14)												
	V_{85} (Km/h)	V_{85} (Km/h)	Lamm y Choueiri	Lamm et al.	Kanellaidis et al.	Morrall y Talarico	Islam y Seneviratne	Krammes et al.	Voigt	McFadden y Elefteriadou	Ottesen y Krames		Gibreel et al.		
1	84.10	96.62	95.75	87.08	100.03	94.95	95.69	96.45	90.51	101.10	120.55	101.10	100.06	81.24	98.60
2	78.40	94.03	95.63	84.77	95.64	94.72	95.56	94.36	87.36	100.29	113.74	100.29	99.11	91.67	100.20
3	77.00	93.72	95.61	84.50	95.16	94.70	95.54	93.60	86.65	100.19	116.03	100.19	98.48	76.20	98.60
4	77.15	94.42	95.65	85.12	96.27	94.76	95.58	94.19	86.83	100.41	119.63	100.41	98.76	77.70	98.40
5	76.00	95.94	95.72	86.48	98.82	94.89	95.65	95.67	87.59	100.88	112.62	100.88	99.58	69.42	98.20
6	88.00	90.46	95.46	81.58	90.38	94.41	95.37	89.63	82.12	99.17	121.50	99.17	95.95	56.21	96.20
7	90.85	99.55	95.90	89.70	105.95	95.21	95.84	99.64	92.43	102.01	130.75	102.01	101.95	107.94	100.20
123	85.00	81.28	95.01	73.40	79.31	93.61	94.90	84.89	69.70	96.30	120.21	96.30	95.25	99.49	100.34
124	70.00	80.40	94.97	72.61	78.38	93.53	94.86	82.66	68.23	96.02	111.48	96.02	93.40	66.44	98.03
187	81.70	95.44	95.70	86.03	97.96	94.85	95.63	95.38	86.50	100.73	125.45	100.73	99.50	93.71	99.35
37	73.30	80.23	94.96	72.47	78.20	93.52	94.85	82.71	68.07	95.97	116.19	95.97	93.51	72.18	98.27
38	81.30	92.57	95.56	83.47	93.40	94.60	95.48	93.02	81.29	99.83	119.95	99.83	98.41	92.76	99.77
39	79.00	92.27	95.54	83.21	92.97	94.57	95.47	92.26	79.91	99.74	116.34	99.74	97.77	75.67	98.46
40	82.70	96.62	95.76	87.09	100.04	94.95	95.69	96.55	89.28	101.10	122.25	101.10	100.16	94.74	99.68
100	82.95	91.09	95.49	82.15	91.27	94.47	95.41	91.95	82.11	99.37	121.16	99.37	97.98	96.92	100.00
69	86.10	94.63	95.66	85.30	96.60	94.78	95.59	95.00	87.74	100.47	124.14	100.47	99.47	107.38	100.70
70	87.85	91.46	95.51	82.48	91.79	94.50	95.42	92.22	82.85	99.48	125.91	99.48	98.09	101.08	99.96
75	87.00	95.46	95.70	86.05	98.00	94.85	95.63	95.74	88.04	100.73	125.90	100.73	99.85	111.40	101.03
77	76.00	83.40	95.11	75.29	81.65	93.79	95.01	85.63	73.27	96.96	116.19	96.96	93.33	50.99	98.20
80	81.00	95.67	95.71	86.24	98.35	94.87	95.64	95.77	87.61	100.80	125.05	100.80	99.79	102.35	100.30
80	82.00	89.22	95.40	80.49	88.72	94.30	95.31	90.04	79.62	98.78	122.20	98.78	96.90	88.16	99.09
83	80.00	84.65	95.18	76.41	83.08	93.90	95.07	86.39	75.26	97.35	119.44	97.35	95.25	82.78	98.85
84	79.00	89.85	95.43	81.04	89.55	94.36	95.34	91.02	81.78	98.98	114.04	98.98	97.60	91.01	100.07
86	87.00	98.37	95.84	88.65	103.42	95.11	95.78	98.17	90.34	101.64	124.70	101.64	101.01	112.02	101.03
87	81.00	90.06	95.44	81.23	89.83	94.37	95.35	90.99	80.41	99.04	117.53	99.04	97.48	89.62	99.68
96	70.80	93.18	95.59	84.01	94.32	94.65	95.51	93.73	85.24	100.02	109.72	100.02	98.75	86.75	100.17
136	71.00	86.31	95.26	77.89	85.05	94.05	95.16	86.91	76.16	97.87	103.60	97.87	95.05	54.50	97.61
242	76.00	76.13	94.76	68.80	74.06	93.16	94.64	80.42	67.46	94.68	110.77	94.68	93.03	78.02	99.26
243	72.25	77.70	94.84	70.20	75.60	93.29	94.72	80.77	67.80	95.17	105.49	95.17	92.69	61.97	98.17

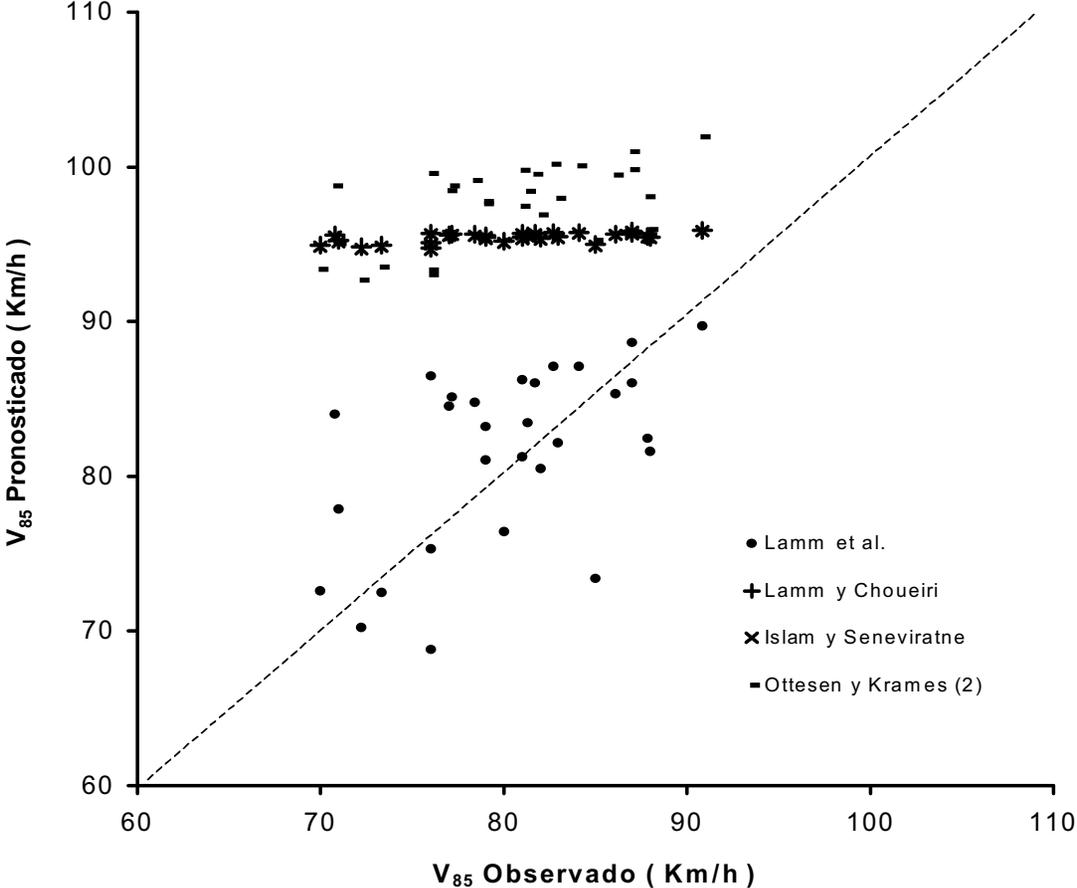
Fuente: *Elaboración propia*

Figura 29 Relación entre V_{85} Observado y V_{85} pronosticado por el modelo de IHSDM para curvas horizontales en pendientes entre 0 y 4%



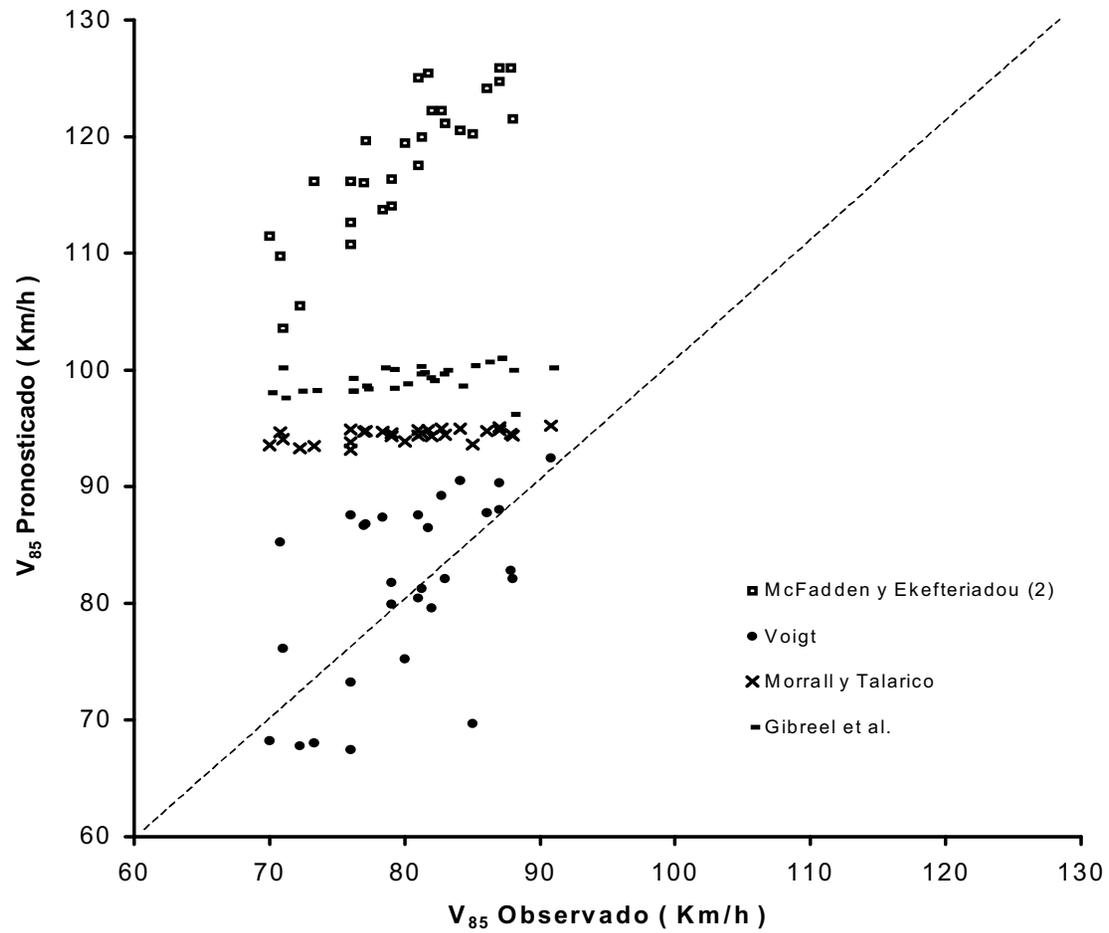
Fuente: *Elaboración propia*

Figura 30 Relación entre V_{85} Observado y V_{85} pronosticado por los modelos de Lamm, Lamm y Choueiri, Islam y Seneviratne, Ottesen y Krames(3) para curvas horizontales en pendientes entre 0 y 4%



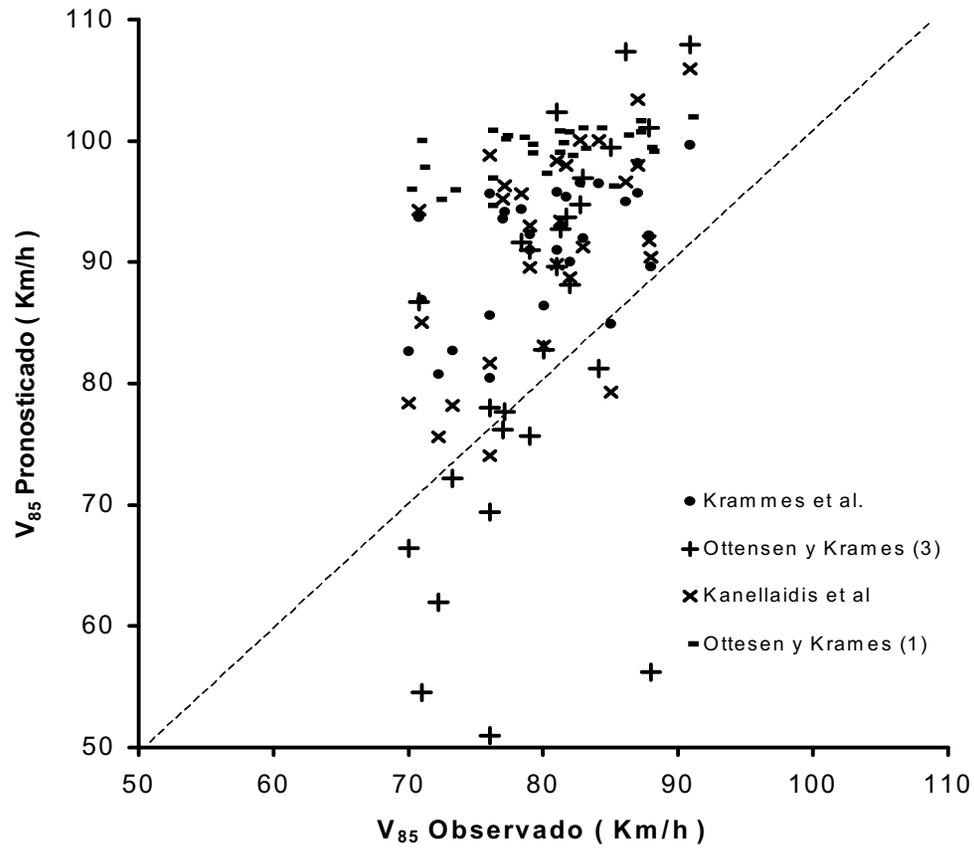
Fuente: *Elaboración propia*

Figura 31 Relación entre V_{85} Observado y V_{85} pronosticado por los modelos de McFadden y Elefteriadou, Voigt, Morrall y Talarico, Gibreel et para curvas horizontales en pendientes entre 0 y 4%



Fuente: *Elaboración propia*

Figura 32 Relación entre V_{85} Observado y V_{85} pronosticado por los modelos de Krammes et., Ottesen y Krames (1)(3), Kanellaidis et al., y Gibreel et. para curvas horizontales en pendientes entre 0 y 4%



Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 16 Evaluación de los modelos de predicción de V_{85} para curvas horizontales en pendientes entre 0 y 4% utilizando MSE, DMA, DMA%, BIAS y CHI cuadrado

ECUACIÓN	MSE (Km/h) ²	DMA (Km/h)	DMA %	BIAS (Km/h)	χ^2 calculado	χ^2 crítico
IHSDM	137.08	10.47	11.40	-7.73	42.86	42.56
Lamm y Choueiri	262.88	15.30	16.04	-12.81	79.95	42.56
Lamm et al.	30.45	4.32	5.33	1.00	10.91	42.56
Kanellaidis et al.	171.12	11.54	12.29	-8.52	51.86	42.56
Morrall y Talarico	230.61	14.25	15.11	-11.76	70.98	42.56
Islam y Seneviratne	260.23	15.22	15.96	-12.72	79.22	42.56
Krammes et al.	148.02	11.09	12.06	-8.59	46.38	42.56
Voigt	43.70	5.26	6.53	0.88	15.79	42.56
McFadden y Elefteriadou	383.17	18.99	19.18	-16.50	112.35	42.56
	1468.87	38.21	32.31	-35.72	359.47	42.56
Ottesen y Krames	383.17	18.99	19.18	-16.50	112.35	42.56
	322.28	17.37	17.84	-14.88	96.09	42.56
	214.25	12.05	14.75	-3.25	78.54	42.56
Gibreel et al.	391.34	19.10	19.26	-16.61	114.55	42.56

Fuente: *Elaboración propia*

Los resultados obtenidos del proceso de evaluación permitieron hacer los siguientes análisis:

1. Las Figuras 29, 30, 31 y 32 muestran que los modelos de Lamm, Voigt e IHSDM tienen el mejor comportamiento en la predicción de V_{85} para utilizarse en Colombia, ya que agruparon sus valores alrededor de la recta. Los demás modelos pronosticaron V_{85} mayores que los observados en campo al agrupar sus valores por encima de la recta.
2. Las medidas estadísticas utilizadas para describir el error en la predicción confirmaron el análisis anterior, estos modelos obtuvieron los errores y diferencias más bajas (ver Tabla 16), por esta razón se seleccionaron preliminarmente los modelos de Lamm y Voigt.

3. La prueba CHI cuadrado determinó que los únicos modelos que predicen V_{85} sin diferencias significativas con las V_{85} observadas en campo son los modelos de Lamm y Voigt ($\chi^2_{\text{calculado}} < \chi^2_{\text{crítico}}$).

En conclusión se determinó que los modelos de Lamm y Voigt predicen las V_{85} similares a las observadas en campo, pues presentan los menores errores en la predicción y no presentan diferencias significativas con un nivel de confianza del 95%. Por esta razón se puede aceptar su uso en Colombia para la predicción de V_{85} en curvas horizontales en pendientes entre 0 y 4%.

7.3.2 Validación de modelos de predicción de V_{85} para curvas horizontales en pendientes entre 4 y 9%

Se utilizó el modelo de predicción 4 de IHSDM (ver Tabla 3) y los modelos planteados por investigadores internacionales que sólo consideran el alineamiento horizontal (ver Tabla 14)

Para la validación del modelo se midieron velocidades con radar en 19 sitios de la carretera Mojarras - Popayán en el departamento del Cauca y se utilizaron las V_{85} del informe de investigación “Efecto de la curvatura en la velocidad en terreno montañoso” elaborado por la Universidad del Quindío y la Universidad del Cauca en la Investigación de capacidad y niveles de servicio (13), donde se estudiaron 9 curvas en el Departamento del Quindío en el sector de la Virgen Negra en la carretera Armenia-Ibagué (ver Tabla 11). Las velocidades consignadas en el informe de investigación se midieron con radar y cumplen con las condiciones del estudio de IHSDM.

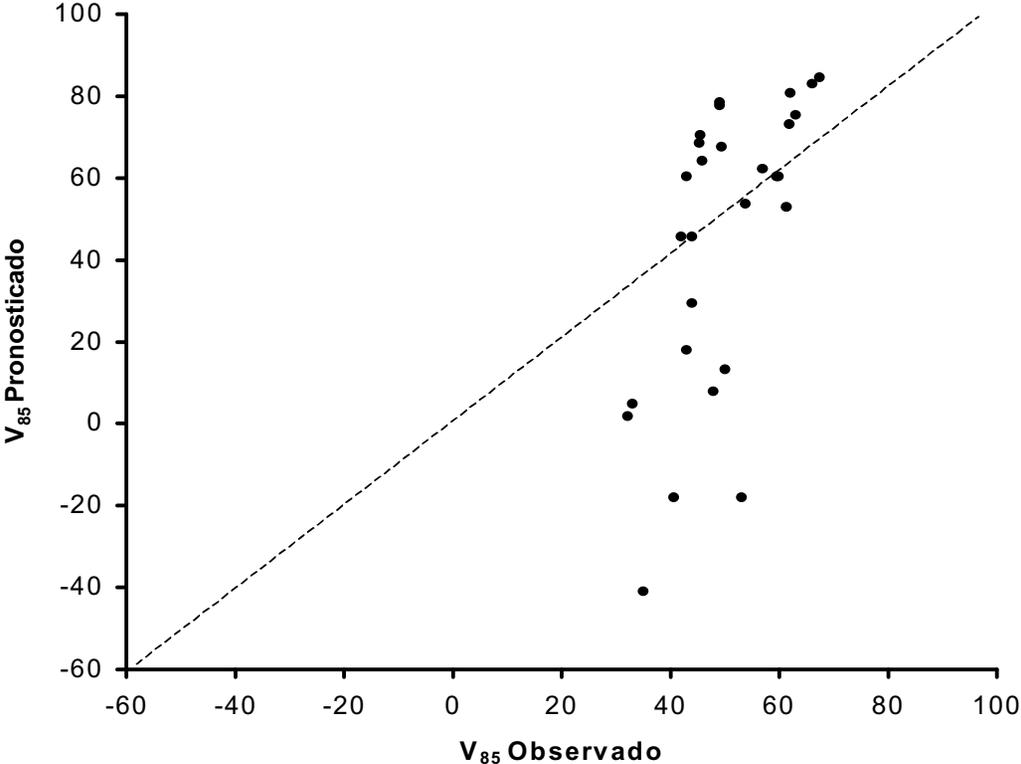
En las Tablas 17 y 18, y Figuras 33, 34, 35 y 36 se muestra el proceso de evaluación para estas condiciones de alineamiento y pendiente.

Tabla 17 V_{85} observado y V_{85} pronosticado utilizando los modelos de predicción para curvas horizontales en pendientes entre 4 y 9%

CURVA	CAMPO	IHSDM	CONSIDERA SOLO EL ALINEAMIENTO HORIZONTAL (TABLA 14)												
	V_{85} (Km/h)	V_{85} (Km/h)	Lamm y Choueiri	Lamm et al.	Kanellaidis et al.	Morrall y Talarico	Islam y Seneviratne	Krammes et al.	Voigt	McFadden y Elefteriadou	Ottesen y Krames		Gibreel et al.		
1	43.00	2.69	93.67	3.29	24.56	91.23	93.48	22.74	-3.57	87.64	68.36	87.64	85.37	21.38	92.41
2	49.00	81.30	93.87	73.42	79.34	91.57	93.69	84.60	77.15	88.92	75.94	88.92	86.68	23.24	99.89
3	49.00	80.34	93.77	72.56	78.31	91.41	93.59	83.68	71.60	88.31	74.23	88.31	85.62	14.28	99.57
4	42.00	38.63	94.55	35.35	45.09	92.78	94.41	50.69	33.28	93.30	69.74	93.30	91.49	37.41	95.46
5	45.85	62.77	94.11	56.88	62.30	92.00	93.95	66.47	50.42	90.49	67.16	90.49	84.94	-23.32	93.82
6	45.30	68.35	94.38	61.86	66.94	92.48	94.24	74.77	61.91	92.24	72.71	92.24	90.79	39.40	99.12
7	43.00	57.79	93.87	52.44	58.41	91.57	93.69	68.16	53.49	88.92	67.02	88.92	88.81	44.41	100.11
8	45.50	70.78	94.50	64.03	69.07	92.69	94.36	77.30	63.61	93.00	73.14	93.00	92.26	50.97	100.15
9	40.60	-44.12	92.52	-38.46	2.69	89.23	92.26	-13.25	-47.07	80.21	59.75	80.21	77.55	-4.39	88.84
10	57.00	60.14	93.98	54.54	60.22	91.78	93.81	67.59	53.88	89.66	84.93	89.66	87.22	33.76	97.45
11	59.45	57.79	93.87	52.44	58.41	91.57	93.69	67.06	53.40	88.92	83.53	88.92	87.71	46.79	98.80
12	59.90	57.79	93.87	52.44	58.41	91.57	93.69	67.40	53.85	88.92	85.37	88.92	88.03	52.68	99.20
13	63.00	77.32	94.82	69.87	75.23	93.26	94.70	81.71	71.72	95.06	90.28	95.06	93.84	65.56	99.86
14	61.40	48.08	94.78	43.78	51.38	93.19	94.65	60.81	46.74	94.78	91.87	94.78	94.29	78.79	99.45
15	32.15	-18.44	93.15	-15.56	14.17	90.33	92.93	11.80	-13.55	84.30	69.55	84.30	84.32	41.90	96.44
16	35.00	-73.91	91.78	-65.03	-9.45	87.97	91.48	-28.09	-61.33	75.43	45.72	75.43	76.39	10.98	94.96
17	50.00	-3.50	93.52	-2.23	21.41	90.96	93.32	22.51	-0.72	86.67	75.35	86.67	86.43	49.41	96.80
18	47.80	-10.49	93.35	-8.46	17.97	90.66	93.14	17.65	-6.52	85.56	70.81	85.56	85.52	44.99	96.80
19	33.00	-14.33	90.27	-11.89	16.12	85.46	89.88	13.31	-11.89	65.69	48.92	65.69	65.11	-28.92	95.02
20	53.70	48.97	93.44	44.58	51.99	90.82	93.23	60.82	46.66	86.13	76.12	86.13	85.29	38.21	98.73
21	49.30	67.19	94.33	60.83	65.95	92.38	94.18	74.34	62.89	91.88	82.50	91.88	90.87	54.44	99.60
22	53.00	-44.12	92.52	-38.46	2.69	89.23	92.26	-11.01	-41.35	80.21	63.46	80.21	78.47	8.87	91.18
23	44.00	17.64	94.04	16.63	32.57	91.87	93.87	35.88	15.81	90.00	74.00	90.00	88.60	41.04	95.34
24	44.00	38.63	94.55	35.35	45.09	92.78	94.41	52.00	35.94	93.30	68.59	93.30	92.04	43.03	96.93
25	67.40	89.07	94.63	80.35	88.52	92.91	94.49	90.97	84.34	93.80	99.53	93.80	92.81	74.18	101.09
26	61.80	74.27	94.67	67.14	72.27	93.00	94.54	77.75	66.01	94.10	96.42	94.10	91.19	45.59	97.49
27	66.00	87.30	94.45	78.77	86.25	92.61	94.31	89.07	79.79	92.69	101.46	92.69	90.15	51.43	100.01
28	62.00	84.16	94.15	75.97	82.51	92.07	93.99	86.28	76.38	90.71	90.76	90.71	87.18	23.39	99.26

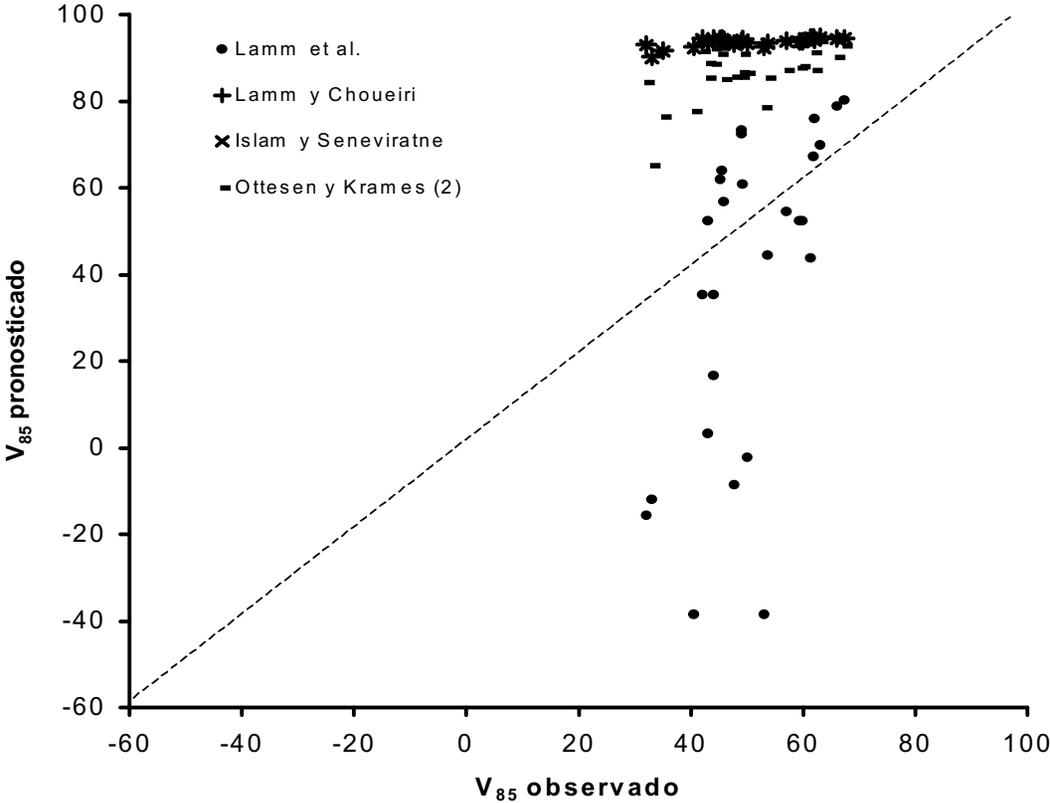
Fuente: *Elaboración propia*

Figura 33 Relación entre V_{85} observado y V_{85} pronosticado por el modelo de IHSDM para curvas horizontales en pendientes entre 4 y 9%



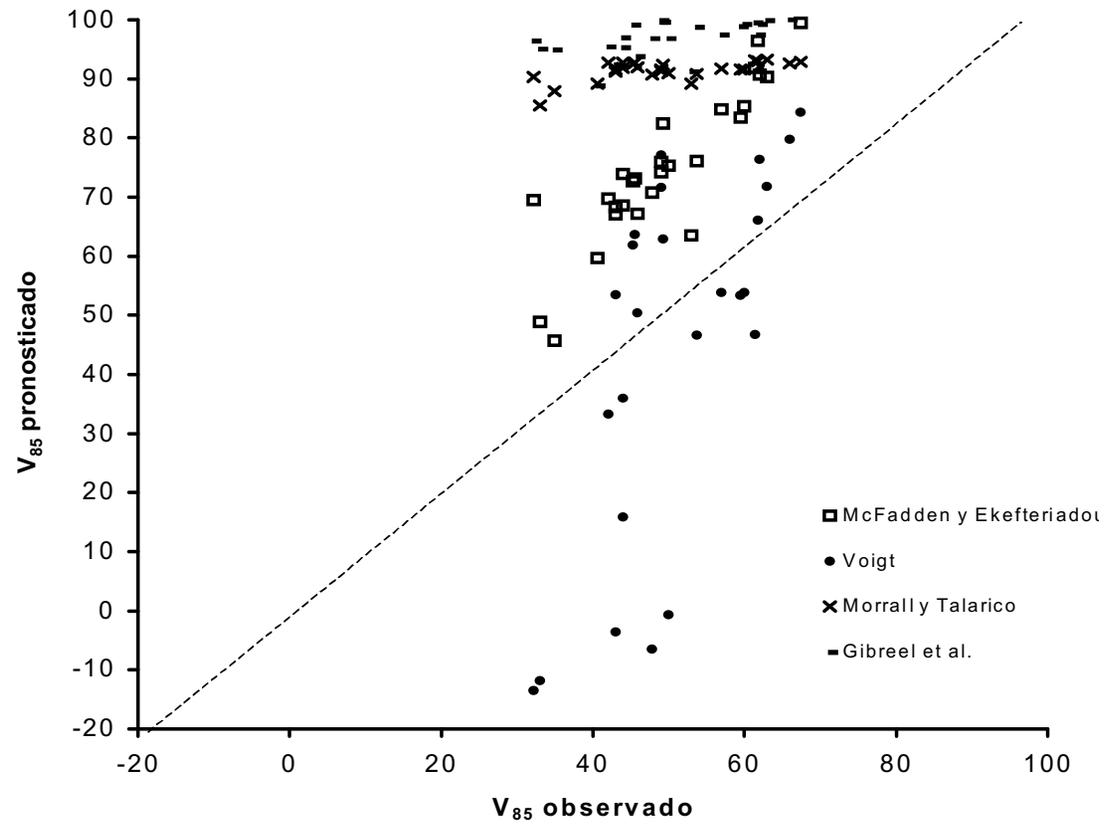
Fuente: *Elaboración propia*

Figura 34 Relación entre V_{85} Observado y V_{85} pronosticado por los modelos de Lamm, Lamm y Choueiri, Islam y Seneviratne, Ottesen y Krames (3) para curvas horizontales en pendientes entre 4 y 9%



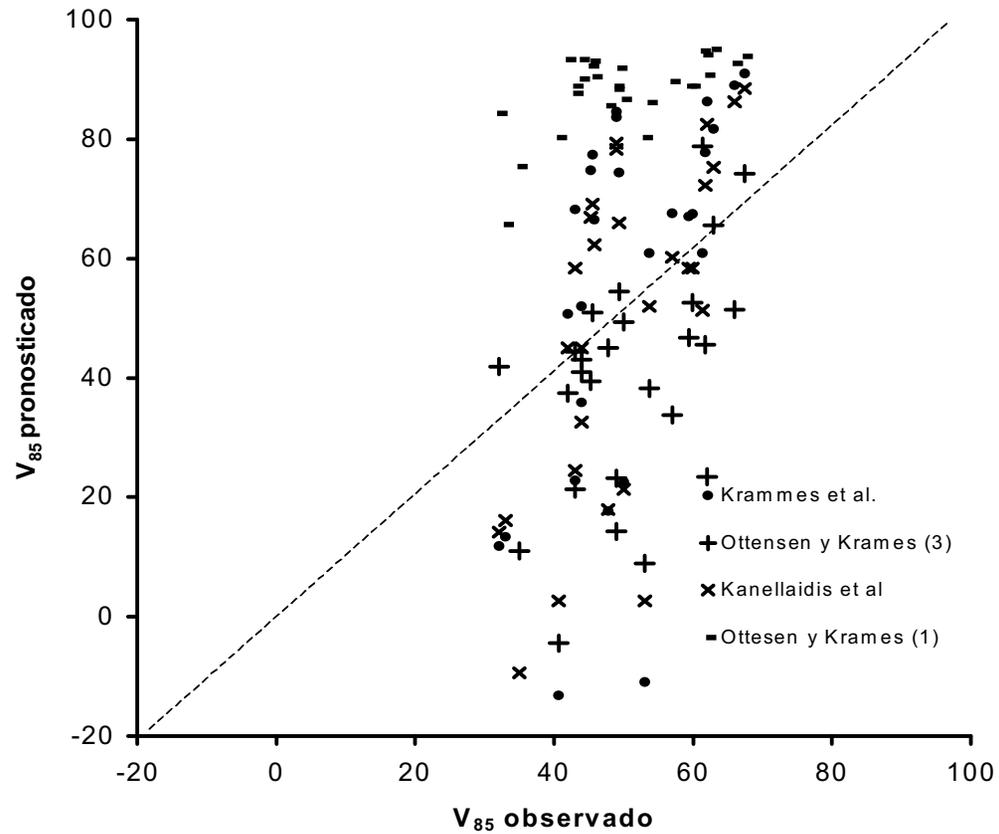
Fuente: *Elaboración propia*

Figura 35 Relación entre V_{85} Observado y V_{85} pronosticado por los modelos de McFadden y Elefteriadou, Voigt, Morrall y Talarico, Gibreel et al para curvas horizontales en pendientes entre 4 y 9%



Fuente: *Elaboración propia*

Figura 36 Relación entre V_{85} observado y V_{85} pronosticado por los modelos de Krammes et al, Ottesen y Krammes (1)(3), Kanellaidis et al. y Gibreel et al para curvas horizontales en pendientes entre 4 y 9%



Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 18 Evaluación de los modelos de predicción de V_{85} para curvas horizontales en pendientes entre 4 y 9% utilizando MSE, DMA, DMA%, BIAS y CHI cuadrado empleando curvas con radio mayor de 50 m

ECUACIÓN	MSE (Km/h) ²	DMA (Km/h)	DMA %	BIAS (Km/h)	χ^2 calculado	χ^2 crítico
IHSDM	318.56	15.12	21.55	-11.90	81.49	30.14
Lamm y Choueiri	1692.92	40.31	42.79	-40.31	341.39	30.14
Lamm et al.	175.68	11.89	20.13	-5.68	53.85	30.14
Kanellaidis et al.	276.45	13.66	19.20	-12.16	71.10	30.14
Morrall y Talarico	1534.32	38.31	41.54	-38.31	316.18	30.14
Islam y Seneviratne	1680.30	40.16	42.69	-40.16	339.41	30.14
Krammes et al.	459.60	18.84	24.86	-18.78	111.54	30.14
Voigt	183.64	11.89	19.57	-6.23	53.55	30.14
McFadden y Elefteriadou	1464.30	37.40	40.96	-37.40	304.48	30.14
	783.45	27.72	34.09	-27.72	180.49	30.14
Ottesen y Krames	1464.30	37.40	40.96	-37.40	304.48	30.14
	1336.27	35.61	39.77	-35.61	283.06	30.14
	294.29	13.26	45.62	10.90	220.44	28.87
Gibreel et al.	2068.37	44.81	45.43	-44.81	398.58	30.14

Fuente: *Elaboración propia*

Los resultados obtenidos del proceso de evaluación permitieron hacer los siguientes análisis:

1. Las Figuras 33, 34, 35 y 36 muestran que el modelo de IHSDM y los modelos planteados por los investigadores internacionales no tienen un buen comportamiento en la predicción de V_{85} ; los modelos de IHSDM, Lamm, Kenellaidis, Krames, Voigt, Ottesen y Krames 3 agruparon sus valores cerca de la recta para V_{85} pronosticada con radios mayores de 50 m. Para radios menores de 30 m arrojaron V_{85} negativos, lo que indicó que se estaba trabajando por fuera del rango de diseño del modelo. Los modelos restantes agruparon sus valores por encima de la recta, lo que indicó predicciones de V_{85} mayores que las observadas.

2. Teniendo en cuenta el análisis anterior se realizó la evaluación de los modelos con radios de curvatura mayores de 50 m. Las medidas estadísticas utilizadas para describir el error en la predicción indicaron que todos los modelos tienen errores superiores al 19% (ver Tabla 18) y la prueba de CHI cuadrado determinó que todos los modelos predicen V_{85} con diferencias significativas con respecto a las V_{85} observadas en campo, ($\chi^2_{\text{calculado}} > \chi^2_{\text{crítico}}$).

En conclusión, se determinó que los modelos de predicción de V_{85} para curvas horizontales en pendientes entre 4 y 9% analizados no se pueden utilizar en Colombia y por lo tanto se plantean más adelante los modelos para la predicción de V_{85} en carreteras colombianas en éstas condiciones de pendiente.

7.3.3 Validación de modelos de predicción de V_{85} para curvas horizontales en pendientes entre -9 y -4%

Se utilizó el modelo de predicción 1 de IHSDM (ver Tabla 3) y los modelos planteados por investigadores internacionales que sólo consideran el alineamiento horizontal (ver Tabla 14).

Para la validación del modelo se midieron velocidades con radar en 19 sitios de la carretera Mojarras - Popayán en el departamento del Cauca y se utilizaron las V_{85} del informe de investigación “Efecto de la curvatura en la velocidad en terreno montañoso” elaborado por la Universidad del Quindío en la Investigación de capacidad y niveles de servicio (13), donde se estudiaron 9 curvas en el Departamento del Quindío en el sector de la Virgen Negra en la carretera Armenia-Ibagué (ver Tabla 11). Las velocidades consignadas en el informe de investigación se midieron con radar y cumplen con las condiciones del estudio de IHSDM.

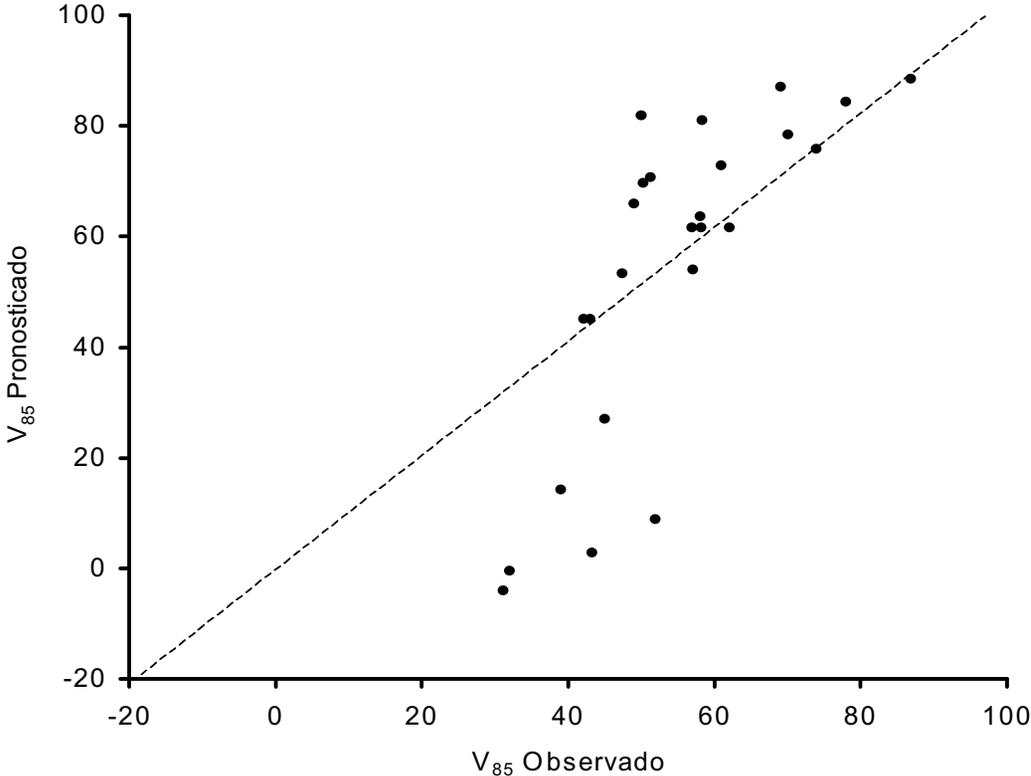
En las Tablas 19 y 20, y Figuras 37, 38, 39 y 40 se presenta el proceso de evaluación para estas condiciones de alineamiento y pendiente.

Tabla 19 V_{85} observado y V_{85} pronosticado utilizando los modelos de predicción para curvas horizontales en pendientes entre -9 y -4%

CURVA	CAMPO	IHSDM	CONSIDERA SOLO EL ALINEAMIENTO HORIZONTAL (TABLA 14)												
	V_{85} (Km/h)	V_{85} (Km/h)	Lamm y Choueiri	Lamm et al.	Kanellaidis et al.	Morrall y Talarico	Islam y Seneviratne	Krammes et al.	Voigt	McFadden y Elefteriadou		Ottesen y Krames			Gibreel et al.
1	39.00	14.18	93.67	3.29	24.56	91.23	93.48	22.74	-3.57	87.64	71.06	87.64	85.37	24.09	92.41
2	50.00	81.86	93.87	73.42	79.34	91.57	93.69	84.60	77.15	88.92	72.48	88.92	86.68	19.78	99.89
3	58.25	81.02	93.77	72.56	78.31	91.41	93.59	83.68	71.60	88.31	83.97	88.31	85.62	24.01	99.57
4	43.00	45.12	94.55	35.35	45.09	92.78	94.41	50.69	33.28	93.30	83.61	93.30	91.49	51.28	95.46
5	49.00	65.90	94.11	56.88	62.30	92.00	93.95	66.47	50.42	90.49	83.93	90.49	84.94	-6.55	93.82
6	51.30	70.70	94.38	61.86	66.94	92.48	94.24	74.77	61.91	92.24	77.17	92.24	90.79	43.86	99.12
7	62.00	61.61	93.87	52.44	58.41	91.57	93.69	68.16	53.49	88.92	87.44	88.92	88.81	64.84	100.11
8	60.90	72.79	94.50	64.03	69.07	92.69	94.36	77.30	63.61	93.00	91.19	93.00	92.26	69.02	100.15
9	41.30	-26.11	92.52	-38.46	2.69	89.23	92.26	-13.25	-47.07	80.21	65.54	80.21	77.55	1.40	88.84
10	58.00	63.64	93.98	54.54	60.22	91.78	93.81	67.59	53.88	89.66	85.84	89.66	87.22	34.66	97.45
11	56.90	61.61	93.87	52.44	58.41	91.57	93.69	67.06	53.40	88.92	83.11	88.92	87.71	46.36	98.80
12	58.15	61.61	93.87	52.44	58.41	91.57	93.69	67.40	53.85	88.92	79.76	88.92	88.03	47.07	99.20
13	70.00	78.43	94.82	69.87	75.23	93.26	94.70	81.71	71.72	95.06	94.88	95.06	93.84	70.17	99.86
14	47.45	53.26	94.78	43.78	51.38	93.19	94.65	60.81	46.74	94.78	84.04	94.78	94.29	70.95	99.45
15	31.15	-4.01	93.15	-15.56	14.17	90.33	92.93	11.80	-13.55	84.30	59.38	84.30	84.32	31.74	96.44
16	37.00	-51.76	91.78	-65.03	-9.45	87.97	91.48	-28.09	-61.33	75.43	47.62	75.43	76.39	12.88	94.96
17	51.85	8.85	93.52	-2.23	21.41	90.96	93.32	22.51	-0.72	86.67	81.05	86.67	86.43	55.11	96.80
18	43.30	2.84	93.35	-8.46	17.97	90.66	93.14	17.65	-6.52	85.56	68.77	85.56	85.52	42.95	96.80
19	32.00	-0.47	90.27	-11.89	16.12	85.46	89.88	13.31	-11.89	65.69	45.41	65.69	65.11	-32.43	95.02
20	57.00	54.02	93.44	44.58	51.99	90.82	93.23	60.82	46.66	86.13	84.00	86.13	85.29	46.10	98.73
21	50.30	69.71	94.33	60.83	65.95	92.38	94.18	74.34	62.89	91.88	80.32	91.88	90.87	52.26	99.60
22	38.15	-26.11	92.52	-38.46	2.69	89.23	92.26	-11.01	-41.35	80.21	63.46	80.21	78.47	8.87	91.18
23	45.00	27.05	94.04	16.63	32.57	91.87	93.87	35.88	15.81	90.00	64.50	90.00	88.60	31.54	95.34
24	42.15	45.12	94.55	35.35	45.09	92.78	94.41	52.00	35.94	93.30	70.63	93.30	92.04	45.08	96.93
25	86.80	88.54	94.63	80.35	88.52	92.91	94.49	90.97	84.34	93.80	118.53	93.80	92.81	93.18	101.09
26	74.00	75.80	94.67	67.14	72.27	93.00	94.54	77.75	66.01	94.10	100.03	94.10	91.19	49.20	97.49
27	69.00	87.02	94.45	78.77	86.25	92.61	94.31	89.07	79.79	92.69	102.41	92.69	90.15	52.38	100.01
28	78.00	84.31	94.15	75.97	82.51	92.07	93.99	86.28	76.38	90.71	95.65	90.71	87.18	28.28	99.26

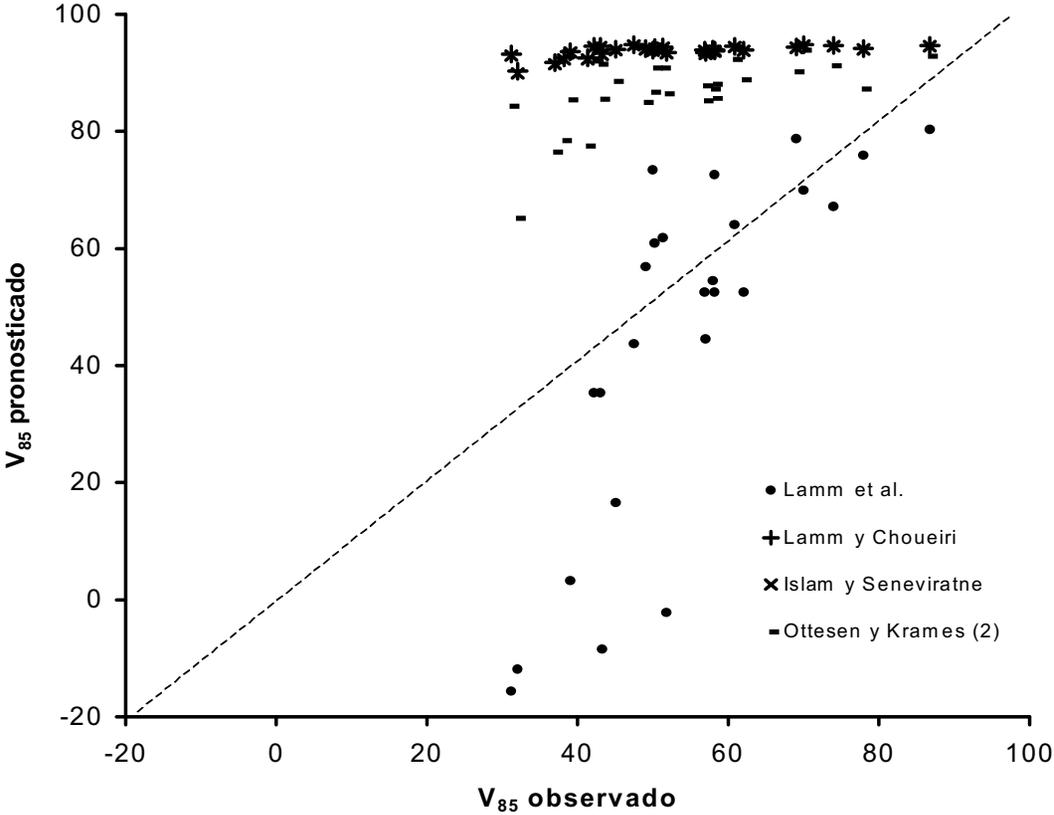
Fuente: *Elaboración propia*

Figura 37 Relación entre V_{85} observado y V_{85} pronosticado por el modelo de IHSDM para curvas horizontales en pendientes entre -9 y -4%



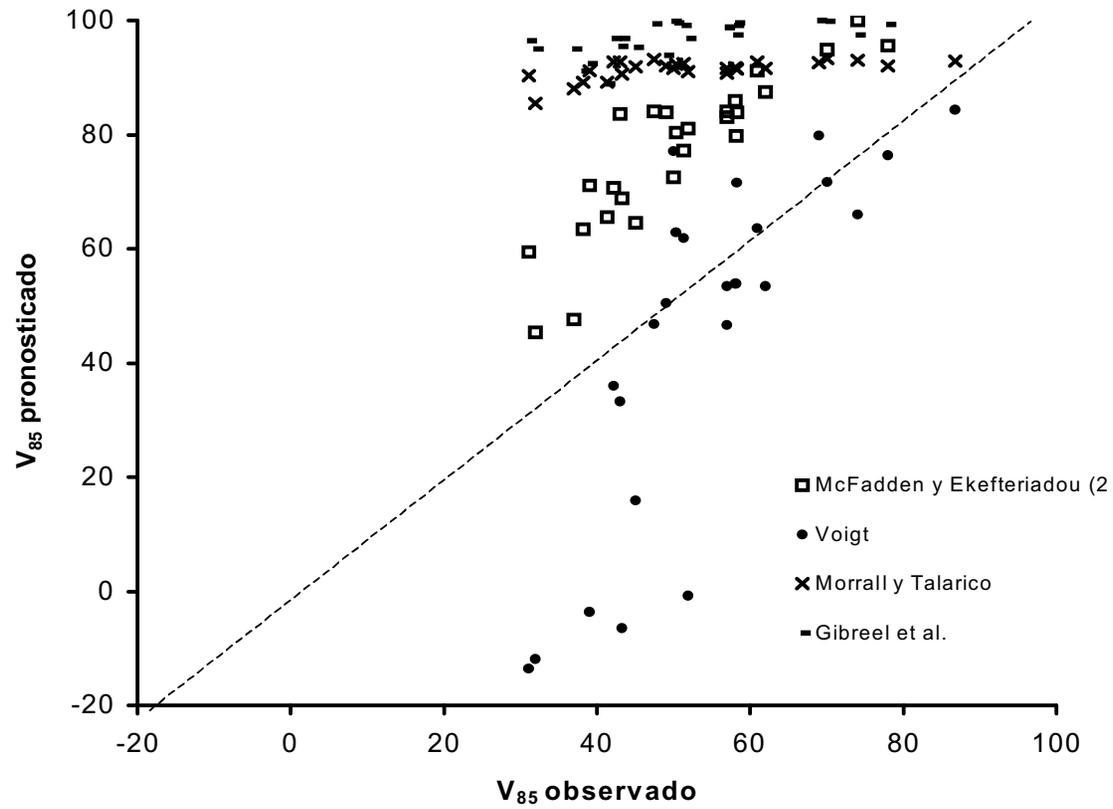
Fuente: *Elaboración propia*

Figura 38 Relación entre V_{85} Observado y V_{85} pronosticado por los modelos de Lamm, Lamm y Choueiri, Islam y Seneviratne, Ottesen y Krames (3) para curvas horizontales en pendientes entre -9 y -4%



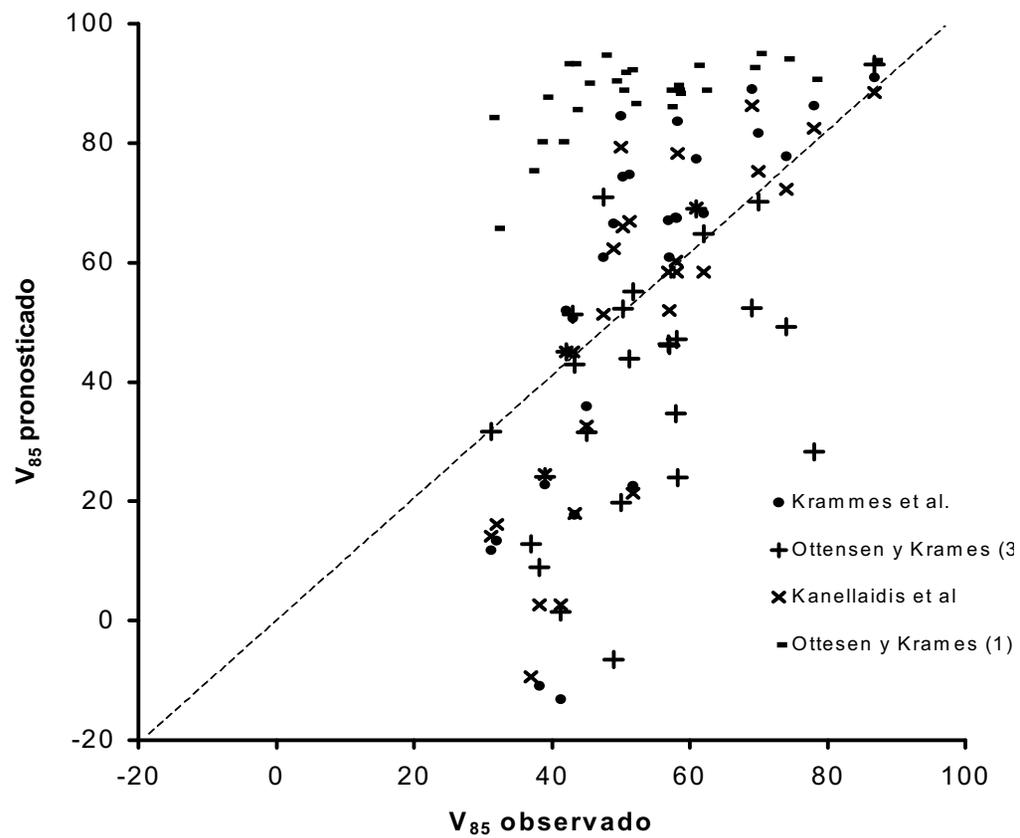
Fuente: *Elaboración propia*

Figura 39 Relación entre V_{85} Observado y V_{85} pronosticado por los modelos de McFadden y Elefteriadou, Voigt, Morrall y Talarico, Gibreel et al para curvas horizontales en pendientes entre -9 y -4%



Fuente: *Elaboración propia*

Figura 40 Relación entre V_{85} Observado y V_{85} pronosticado por los modelos de Krammes et al, Ottesen y Krames (1)(3), Kanellaidis et al y Gibreel et al para curvas horizontales en pendientes entre -9 y -4%



Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 20 Evaluación de los modelos de predicción de V_{85} para curvas horizontales en pendientes entre -9 y -4% utilizando MSE, DMA, DMA%, BIAS y CHI cuadrado empleando curvas con radio mayor de 50 m

ECUACIÓN	MSE (Km/h) ²	DMA (Km/h)	DMA %	BIAS (Km/h)	χ^2 calculado	χ^2 crítico
IHSDM	172.49	9.82	13.58	-9.47	43.14	30.14
Lamm y Choueiri	1372.70	35.18	37.33	-35.18	276.76	30.14
Lamm et al.	87.59	7.83	13.65	-0.55	27.34	30.14
Kanellaidis et al.	127.44	8.11	11.63	-7.02	32.71	30.14
Morrall y Talarico	1234.77	33.17	35.97	-33.17	254.35	30.14
Islam y Seneviratne	1361.70	35.02	37.23	-35.02	275.00	30.14
Krammes et al.	255.47	13.64	18.57	-13.64	63.38	30.14
Voigt	92.02	7.36	12.60	-1.10	27.57	30.14
McFadden y Elefteriadou	1174.30	32.26	35.33	-32.26	243.76	30.14
	826.89	28.25	32.75	-28.25	181.66	30.14
Ottesen y Krames	1174.30	32.26	35.33	-32.26	243.76	30.14
	1066.11	30.47	34.01	-30.47	225.29	30.14
	538.70	17.30	86.20	11.59	235.61	30.14
Gibreel et al.	1693.25	39.67	40.27	-39.67	326.96	30.14

Fuente: *Elaboración propia*

Los resultados obtenidos del proceso de evaluación permitieron hacer los siguientes análisis:

1. Las Figuras 37, 38, 39 y 40 muestran que el modelo de IHSDM y los modelos planteados por los investigadores internacionales no tienen un buen comportamiento en la predicción de V_{85} ; los modelos de IHSDM, Lamm, Kenellaidis, Krames, Voigt, Ottesen y Krames 3 agruparon sus valores cerca de la recta para V_{85} pronosticada con radios mayores de 50 m, radios menores a 30 m pronosticaron V_{85} negativos que son un indicador de la extrapolación, es decir que se está trabajando fuera del rango de diseño del modelo. Los modelos restantes agruparon sus valores por encima de la recta, lo que indicó predicciones de V_{85} mayores que las observadas.

2. Teniendo en cuenta el análisis anterior se realizó la evaluación de los modelos con radios de curvatura mayores de 50 m. Las medidas estadísticas utilizadas para describir el error en la predicción indicaron que los modelos de IHSDM, Lamm, Kenellaidis y Voigt tienen los errores más bajos (entre 11 y 14%).
3. La prueba CHI cuadrado determinó que los únicos modelos que predicen V_{85} sin diferencias significativas con las V_{85} observadas en campo son los modelos de Lamm y Voigt ($\chi^2_{\text{calculado}} < \chi^2_{\text{crítico}}$).

En conclusión se determinó que los modelos de Lamm y Voigt predicen las V_{85} similares a las observadas en campo al no presentan diferencias significativas con un nivel de confianza del 95%. Por esta razón se puede aceptar su uso en Colombia para la predicción de V_{85} en curvas horizontales con radios mayores de 50 m en pendientes entre -9 y -4%.

Teniendo en cuenta que en las carreteras colombianas existen curvas con radio menor de 50 m y que los modelos de Lamm y Voigt tienen ésta limitante, se plantea más adelante un modelo de predicción que considera radios de curvatura hasta 20 m.

7.4 PLANTEAMIENTO DE LOS MODELOS PARA PREDECIR V_{85} EN CARRETERAS COLOMBIANAS

En la etapa anterior se determinó que los modelos de Lamm y Voigt son los únicos modelos que se puede utilizar para predecir V_{85} en Colombia para las condiciones de curvatura horizontal y pendiente consideradas.

Antes de iniciar el desarrollo de los modelos se evaluó estadísticamente si existían diferencias entre las V_{85} obtenidas en campo para las condiciones de pendiente entre 4 y 9 % y -9 y -4% empleando la prueba CHI cuadrado con un nivel de confianza del 95%.

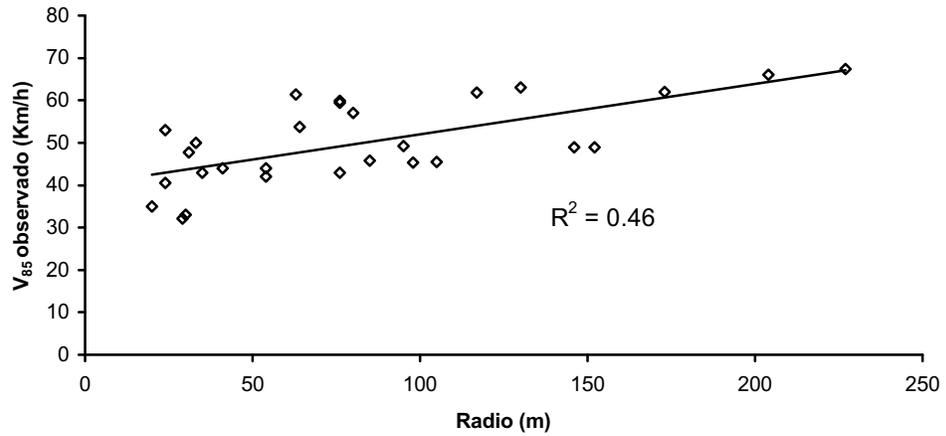
La prueba determinó que no existen diferencias significativas entre las V_{85} para radios de curvatura menores a 100 m ($\chi^2_{\text{calculado}} = 18.31 < \chi^2_{\text{crítico}} = 30.14$) y que para radios de curvatura mayores de 100 m si existen diferencias significativas entre las V_{85} ($\chi^2_{\text{calculado}} = 18.48 > \chi^2_{\text{crítico}} = 15.51$),

Con base en los resultados de la prueba anterior y utilizando la base de datos de V_{85} para curvatura horizontal y pendiente en terreno montañoso obtenidas en las carreteras que se muestran en la Tabla 11, se plantearon los siguientes modelos:

7.4.1 Modelos de predicción de V_{85} para curvas horizontales en pendientes entre 4 y 9%

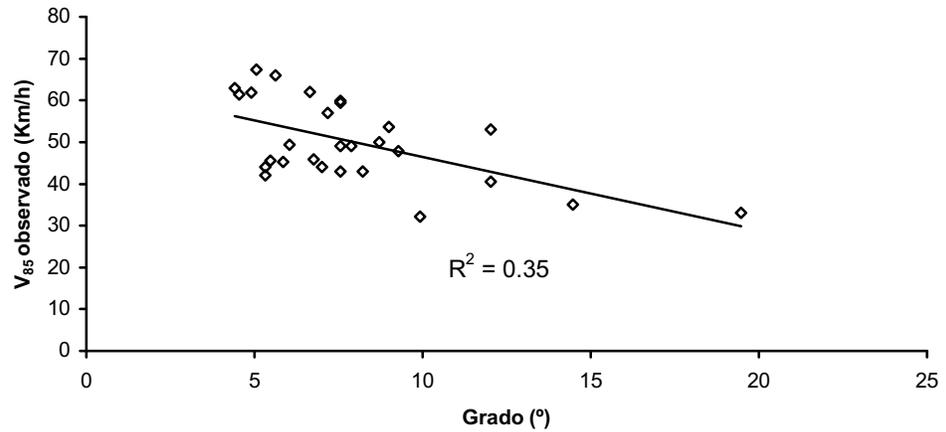
En el planteamiento de los modelos de predicción de V_{85} se consideraron como variables independientes las siguientes variables geométricas y sus transformaciones: radio de curvatura, grado de curvatura, deflexión, longitud de curva, peralte y entretangencia; de estas variables se seleccionaron las que presentan la mayor correlación con la variable dependiente. Las Figuras 41, 42 y 43 muestran las variables seleccionadas y utilizadas en el planteamiento de los modelos.

Figura 41 Correlación entre V_{85} y radio de curvatura para pendientes entre 4 y 9%



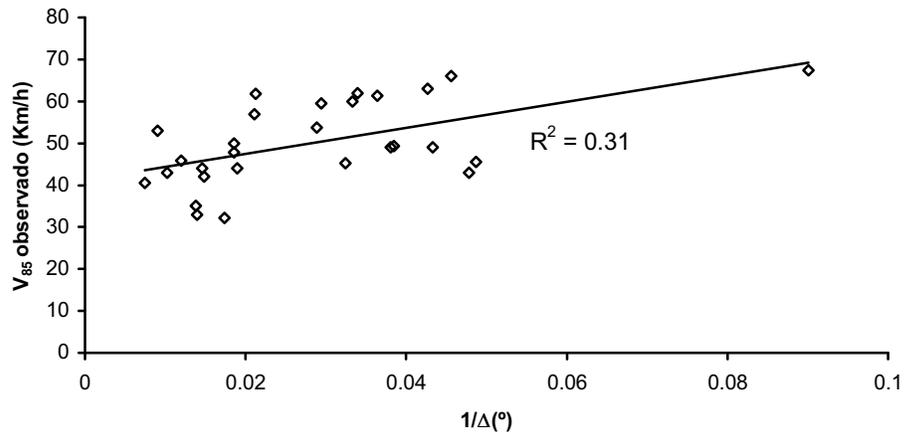
Fuente: *Elaboración propia*

Figura 42 Correlación entre V_{85} y el grado de curvatura para pendientes entre 4 y 9%



Fuente: *Elaboración propia*

Figura 43 Correlación entre V_{85} y el inverso de la deflexión para pendientes entre 4 y 9%



Fuente: *Elaboración propia*

Empleando éstas variables y sus combinaciones se plantearon 10 modelos con estructura de tipo lineal a los que se realiza un análisis de regresión estadístico con un nivel de confianza del 95%.

La selección de la estructura lineal de los modelos obedece a que las mejores relaciones funcionales de las variables son de éste tipo pues presentan las mayores correlaciones y su combinación determinó los mejores modelos de regresión.

La Tabla 21 muestra los modelos planteados para pendientes entre 4 y 9%.

Tabla 21 Modelos planteados para la predicción de V_{85} en curvas horizontales sobre pendientes entre 4 a 9%

MODELO	VARIABLES INDEPENDIENTES	ESTRUCTURA DEL MODELO	REGRESION TIPO
1	$R_n, R_{n-1}, 1/\Delta, G$	$V_{85} = x_0 + x_1 R_n + x_2 R_{n-1} + x_3 1/\Delta + x_4 G$	Lineal Multiple
2	$R_n, R_{n-1}, 1/\Delta$	$V_{85} = x_0 + x_1 R_n + x_2 R_{n-1} + x_3 1/\Delta$	
3	R_n, R_{n-1}, G	$V_{85} = x_0 + x_1 R_n + x_2 R_{n-1} + x_3 G$	
4	$R_n, 1/\Delta, G$	$V_{85} = x_0 + x_1 R_n + x_2 1/\Delta + x_3 G$	
5	R_n, G	$V_{85} = x_0 + x_1 R_n + x_2 G$	
6	$R_n, 1/\Delta$	$V_{85} = x_0 + x_1 R_n + x_2 1/\Delta$	
7	R_n, R_{n-1}	$V_{85} = x_0 + x_1 R_n + x_2 R_{n-1}$	
8	R_n	$V_{85} = x_0 + x_1 R_n$	Lineal Simple
9	$1/\Delta$	$V_{85} = x_0 + x_1 1/\Delta$	
10	G	$V_{85} = x_0 + x_1 G$	

Fuente: *Elaboración propia*

Donde

R_n : radio de la curva de interés

R_{n-1} : radio de la curva anterior

Δ : deflexión de la curva de interés

G : grado de curvatura de la curva de interés

La Tabla 22 muestra un resumen de los análisis de regresión realizados (ver Anexo 1), que permitieron concluir lo siguiente:

- Los modelos 1, 2, 3, y 7 presentaron las mejores ecuaciones de la curva de ajuste entre las V_{85} observadas y las variables geométricas consideradas en cada modelo.

- En los modelos 1, 2 y 3 de algunas de sus variables presentaron errores típicos grandes y una alta probabilidad de introducir error en la predicción, lo que indicó que su empleo tiene poca incidencia en la predicción de V_{85} .
- Los modelos 4, 5, 6, 8, 9 y 10 presentaron los menores coeficientes R^2 y algunas de sus variables tienen una alta probabilidad introducir error en la predicción.
- El modelo 7 se seleccionó para predecir las V_{85} de curvas horizontales sobre pendientes entre 4 y 9% porque tiene la mejor relación funcional entre sus variables, pues presenta una baja probabilidad de error en la predicción para cada una de ellas (ver Tabla 22); El modelo tiene la siguiente expresión:

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

Tabla 22 Resumen de los resultados de la regresión para los modelos planteados en curvas horizontales sobre pendientes entre 4 a 9%

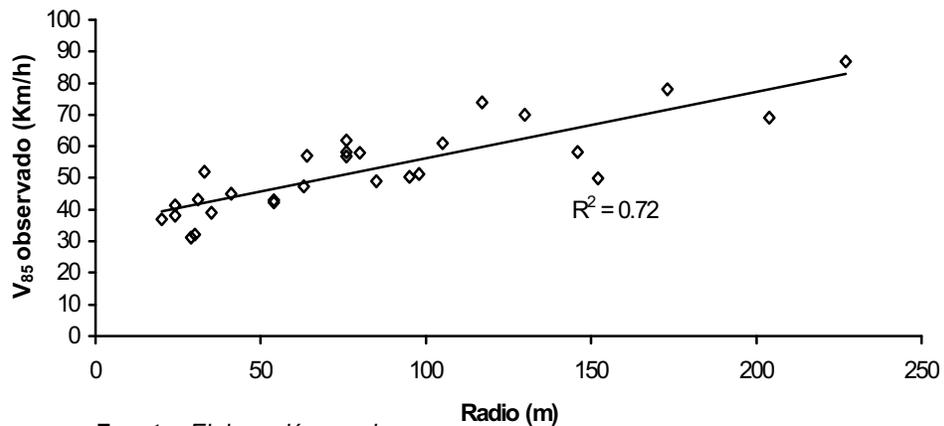
Modelo	R ²	Variable	Coefficientes	Error típico	Probabilidad	Estadístico t	Inferior 95%	Superior 95%
1	0.59	Intercepción	45.23	6.48	0	6.98	31.79	58.67
		X 1	0.08	0.04	0.07	1.91	-0.01	0.17
		X 2	0.04	0.02	0.06	1.95	0	0.08
		X 3	-0.71	0.5	0.17	-1.43	-1.74	0.32
		X 4	1.3	130.06	0.99	0.01	-268.43	271.04
2	0.56	Intercepción	37.01	3.03	0	12.22	30.75	43.27
		X 1	0.1	0.04	0.03	2.31	0.01	0.18
		X 2	0.04	0.02	0.03	2.35	0.01	0.08
		X 3	20.47	132.24	0.88	0.15	-253.08	294.03
3	0.59	Intercepción	45.25	6.13	0	7.38	32.57	57.93
		X 1	0.08	0.03	0.01	2.89	0.02	0.14
		X 2	0.04	0.02	0.06	1.99	0	0.08
		X 3	-0.71	0.48	0.16	-1.47	-1.71	0.29
4	0.53	Intercepción	50.19	5.95	0	8.44	37.92	62.47
		X 1	0.09	0.04	0.05	2.07	0	0.18
		X 2	-0.94	0.5	0.07	-1.9	-1.97	0.08
		X 3	-7.61	133.93	0.96	-0.06	-284.03	268.8
5	0.53	Intercepción	50.11	5.66	0	8.85	38.45	61.78
		X 1	0.09	0.03	0	3.11	0.03	0.15
		X 2	-0.94	0.48	0.06	-1.94	-1.94	0.06
6	0.46	Intercepción	40.07	2.79	0	14.38	34.33	45.81
		X 1	0.12	0.04	0.01	2.63	0.03	0.21
		X 2	12.73	140.32	0.93	0.09	-276.26	301.71
7	0.55	Intercepción	37.18	2.77	0	13.43	31.47	42.89
		X 1	0.1	0.02	0	4.08	0.05	0.15
		X 2	0.04	0.02	0.02	2.4	0.01	0.08
8	0.46	Intercepción	40.16	2.54	0	15.82	34.94	45.38
		X 1	0.12	0.03	0	4.69	0.07	0.17
9	0.31	Intercepción	41.21	3.05	0	13.52	34.95	47.48
		X 1	311.23	91.26	0	3.41	123.64	498.82
10	0.35	Intercepción	63.98	4.03	0	15.89	55.7	72.25
		X 1	-1.75	0.47	0	-3.72	-2.72	-0.79

Fuente: *Elaboración propia*

7.4.2 Modelos de predicción de V_{85} para curvas horizontales en pendientes entre -9 y -4%

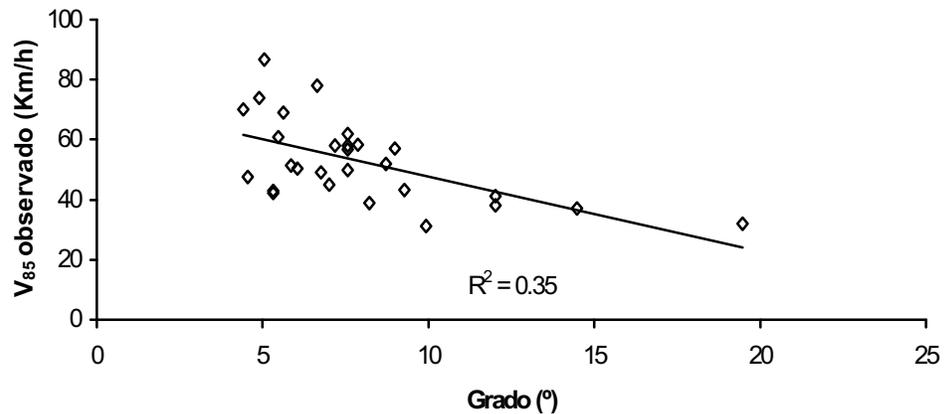
En el planteamiento de los modelos de predicción de V_{85} , al igual que para el caso de pendientes entre 4 y 9%, se consideraron las mismas variables independientes y se seleccionaron las que presentan la mayor correlación con la variable dependiente; las Figuras 44, 45 y 46 muestran las variables utilizadas en el planteamiento de los modelos.

Figura 44 Correlación entre V_{85} y radio de curvatura para pendientes entre -9 y -4%



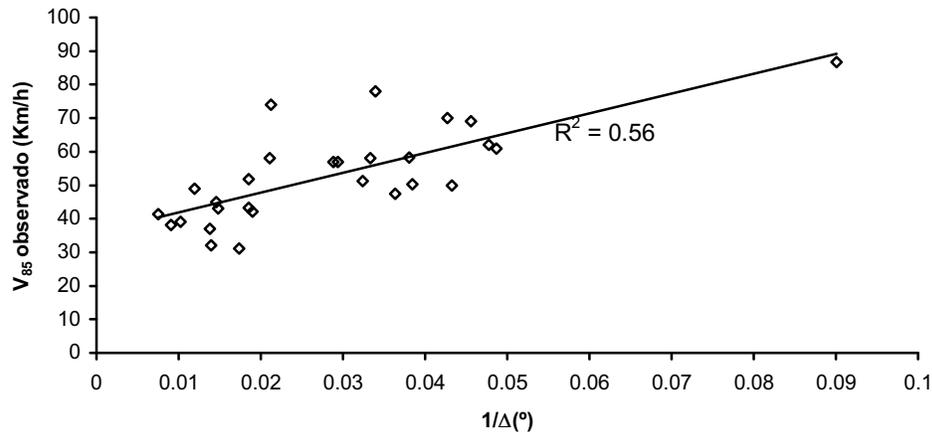
Fuente: *Elaboración propia*

Figura 45 Correlación entre V_{85} y el grado de curvatura para pendientes entre -9 y -4%



Fuente: *Elaboración propia*

Figura 46 Correlación entre V_{85} y el inverso de la deflexión para pendientes entre -9 y -4%



Fuente: *Elaboración propia*

Como se puede observar las correlaciones que presentan las variables geométricas seleccionadas son más altas que las encontradas para pendientes entre 4 y 9%, lo que indicó que en éste tipo de pendientes los conductores tienen un comportamiento más definido para maniobrar sus vehículos.

Empleando éstas variables y sus combinaciones se plantearon 10 modelos con estructura de tipo lineal a los que se realiza un análisis de regresión estadístico con un nivel de confianza del 95%.

La selección de los modelos obedece a que las mejores relaciones funcionales de las variables geométricas son de tipo lineal porque presentan las mayores correlaciones y su combinación determinará los mejores modelos de regresión.

La Tabla 23 muestra los modelos planteados para este tipo de pendiente.

Tabla 23 Modelos planteados para la predicción de V_{85} en curvas horizontales para pendientes entre -9 a -4%

MODELO	VARIABLES INDEPENDIENTES	ESTRUCTURA DEL MODELO	REGRESION TIPO
1	$R_n, R_{n-1}, 1/\Delta, G$	$V_{85} = x_0 + x_1 R_n + x_2 R_{n-1} + x_3 1/\Delta + x_4 G$	Lineal Multiple
2	$R_n, R_{n-1}, 1/\Delta$	$V_{85} = x_0 + x_1 R_n + x_2 R_{n-1} + x_3 1/\Delta$	
3	R_n, R_{n-1}, G	$V_{85} = x_0 + x_1 R_n + x_2 R_{n-1} + x_3 G$	
4	$R_n, 1/\Delta, G$	$V_{85} = x_0 + x_1 R_n + x_2 1/\Delta + x_3 G$	
5	R_n, G	$V_{85} = x_0 + x_1 R_n + x_2 G$	
6	$R_n, 1/\Delta$	$V_{85} = x_0 + x_1 R_n + x_2 1/\Delta$	
7	R_n, R_{n-1}	$V_{85} = x_0 + x_1 R_n + x_2 R_{n-1}$	
8	R_n	$V_{85} = x_0 + x_1 R_n$	Lineal Simple
9	$1/\Delta$	$V_{85} = x_0 + x_1 1/\Delta$	
10	G	$V_{85} = x_0 + x_1 G$	

Fuente: *Elaboración propia*

Donde

R_n : radio de la curva de interés

R_{n-1} : radio de la curva anterior

Δ : deflexión de la curva de interés

G : grado de curvatura de la curva de interés

La Tabla 24 muestra el resumen de los resultados obtenidos en el análisis de regresión.

Tabla 24 Resumen de los resultados de la regresión múltiple para los modelos planteados en curvas horizontales sobre pendientes entre -9 a -4%

Modelo	R2	Variable	Coefficientes	Error típico	Probabilidad	Estadístico t	Inferior 95%	Superior 95%
1	0.79	Intercepción	40.49	5.82	0.00	6.96	28.42	52.56
		X 1	0.08	0.05	0.12	1.62	-0.02	0.19
		X 2	0.06	0.03	0.04	2.16	0.00	0.11
		X 3	245.09	138.64	0.09	1.77	-42.42	532.61
		X 4	-0.90	0.48	0.08	-1.87	-1.91	0.10
2	0.76	Intercepción	31.23	3.19	0.00	9.77	24.62	37.83
		X 1	0.11	0.05	0.04	2.13	0.00	0.22
		X 2	0.05	0.03	0.07	1.91	0.00	0.11
		X 3	252.98	145.86	0.10	1.73	-48.75	554.71
3	0.76	Intercepción	43.36	5.84	0.00	7.43	31.28	55.45
		X 1	0.16	0.03	0.00	4.48	0.08	0.23
		X 2	0.04	0.03	0.13	1.56	-0.01	0.09
		X 3	-0.93	0.51	0.08	-1.84	-1.98	0.12
4	0.75	Intercepción	42.74	6.06	0.00	7.05	30.23	55.26
		X 1	0.15	0.04	0.00	3.36	0.06	0.24
		X 2	132.29	136.56	0.34	0.97	-149.57	414.14
		X 3	-0.78	0.51	0.13	-1.55	-1.83	0.26
5	0.74	Intercepción	44.13	5.88	0.00	7.50	32.01	56.25
		X 1	0.18	0.03	0.00	6.14	0.12	0.24
		X 2	-0.82	0.50	0.11	-1.63	-1.86	0.21
6	0.73	Intercepción	34.33	2.78	0.00	12.36	28.61	40.05
		X 1	0.17	0.04	0.00	3.89	0.08	0.26
		X 2	149.19	139.89	0.30	1.07	-138.92	437.30
7	0.73	Intercepción	33.92	2.91	0.00	11.67	27.92	39.92
		X 1	0.19	0.03	0.00	5.87	0.12	0.25
		X 2	0.04	0.03	0.20	1.33	-0.02	0.09
8	0.72	Intercepción	35.43	2.59	0.00	13.69	30.11	40.75
		X 1	0.21	0.03	0.00	8.08	0.16	0.26
9	0.56	Intercepción	36.02	3.41	0.00	10.56	29.01	43.03
		X 1	590.03	102.07	0.00	5.78	380.22	799.84
10	0.35	Intercepción	72.58	5.63	0.00	12.90	61.01	84.15
		X 1	-2.49	0.66	0.00	-3.78	-3.84	-1.14

Fuente: *Elaboración propia*

La regresión múltiple realizada permitió establecer (ver Anexo 2):

- Los modelos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 presentaron las mejores ecuaciones de la curva de ajuste entre las V_{85} observadas y las variables geométricas consideradas en cada modelo al presentar los coeficientes R^2 más altos, los errores típicos en sus variables son grandes y la probabilidad de introducir errores en la predicción de V_{85} es alta.
- Los modelos 9 y 10 no presentaron buenas ecuaciones en la curva de ajuste al obtener los coeficientes R^2 más bajos.
- Los modelos 7 y 8 presentaron las mejores ecuaciones de ajuste, pues tienen los coeficientes R^2 de 0.73 y 0.72 respectivamente y sus variables tienen baja probabilidad de introducir error en la predicción.
- El modelo 7 presentó las menores diferencias entre las V_{85} pronosticadas y las V_{85} de campo, por lo tanto el modelo 7 se seleccionó para predecir las V_{85} de curvas horizontales en pendientes entre -9 y -4%; La siguiente es la expresión del modelo:

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

Se realizó un análisis posterior para establecer la relación entre las dos ecuaciones planteadas para las pendientes entre 4 y 9% y -9 y -4% empleando una prueba CHI cuadrado y se determinó que las 2 ecuaciones no tienen diferencias significativas únicamente para la predicción de V_{85} en radios menores de 100 m, (pendiente entre 4 y 9% $\chi^2_{\text{calculado}} = 19.52 < \chi^2_{\text{crítico}} = 31.41$) y (pendiente entre -9 y -4% $\chi^2_{\text{calculado}} = 16.57 < \chi^2_{\text{crítico}} = 31.41$).

7.4.3 Determinación de la velocidad deseada

La velocidad deseada es la velocidad a la que los conductores quieren viajar y se establece midiendo la velocidad en el punto medio de rectas largas. El estudio de la FHWA considera rectas con longitudes mayores a 200 m en pendientes longitudinales entre -4 y 4%; se utiliza este rango de pendiente porque en él los vehículos pueden alcanzar y mantener la velocidad deseada. En el proceso de predicción de V_{85} en cada uno de los elementos geométricos, esta velocidad se asume como la máxima velocidad que se puede alcanzar en el alineamiento, a no ser que se determine previamente otro valor mediante mediciones de campo.

Para su estimación en Colombia se utilizó la base de datos de velocidades del estudio de “Trenes Cañeros” (1), en el departamento del Valle (ver Tabla 25).

Tabla 25 Localización de las rectas para determinar la velocidad deseada

RECTA	TRAMO	LOCALIZACION	V_{85} (Km/h)
1	Puerto Tejada - Candelaria	PR25+500	91.5
2	Villa Rica - Jamundí	PR95+800	98
3	Villa Rica - Puerto Tejada	PR5+200	88
4	Puerto Tejada - Candelaria	PR25+500	91.5
5	Palmaseca - Crucero Guajira	PR5+800	103.75
6	Rozo - Cerrito	PR8+800	98
7	Candelaria - Palmira	PR37+500	98.55
8	Amalme - Cerrito	PR37+900	96
9	Cerrito - Guacarí	PR47+900	108
10	Mediacanoa - Buga	PR115+000	88.3
11	La Paila - Zarzal	PR27+000	101
12	Zarzal - Obando	PR43+500	92
13	Vijes - Mediacanoa	PR35+500	100.65
14	Mediacanoa - Riofrío	PR16+500	92.55

Empleando un nivel de confianza del 95% se estimó que la velocidad deseada se encuentra entre 92.85 km/h y 99.69 km/h, y su valor medio corresponde a 96.27 km/h.

7.5 VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN DE ACELERACIONES PLANTEADOS EN EL ESTUDIO DEL IHSDM PARA SU USO EN COLOMBIA

Uno de los objetivos planteados en esta investigación es determinar la conveniencia de la utilización en Colombia de los modelos desarrollados en el estudio de IHSDM. Al igual que en el proceso de validación de los modelos de predicción de V_{85} en el numeral 7.3, se utilizan las mismas herramientas estadísticas para determinar las diferencias entre las aceleraciones pronosticadas por éstos modelos y las observadas en el campo.

En el proceso de validación se desarrollaron las siguientes etapas:

1. Cálculo de las aceleraciones y deceleraciones para cada sitio de estudio utilizando los modelos del IHSDM (ver Tabla 6). Estos modelos surgieron del análisis basado en las tasas máximas de aceleración y deceleración.
2. Cálculo de las aceleraciones y deceleraciones máximas en cada sitio de estudio utilizando las V_{85} de campo obtenidas en los puntos considerados en las Figuras 23 y 24, considerando los rangos de curvatura de los modelos de aceleración de IHSDM.

Las Tablas 26, 27 y 28 muestran las aceleraciones y la localización de los máximos V_{85} obtenidos en campo para las 79 curvas horizontales allí referenciadas.

3. Cálculo del error medio cuadrático (MSE), la diferencia absoluta media (DMA), la diferencia absoluta media en % (DMA%), sesgo (BIAS) y CHI cuadrado para cada uno de los sitios de estudio. Estas estadísticas se usaron para describir la diferencia entre las aceleraciones y deceleraciones máximas pronosticadas por el modelo y las calculadas utilizando V_{85} observadas en el campo mediante la medición con radar. La Tabla 29 muestra los resultados de las pruebas

estadísticas obtenidas para la evaluación del modelo de aceleraciones de IHSDM .

Tabla 26 Cálculo de las aceleraciones máximas de campo y del modelo IHSDM en curvas entre 0 y 4%

CURVA	R (m)	V ₈₅ DE CAMPO (Km/h)						LOCALIZACIÓN DE V ₈₅ MÁXIMOS Y MÍNIMOS						ACELERACIONES Y DECELERACIONES (m/s ²)					Aceleración max campo (m/s ²)	Deceleración max campo (m/s ²)	Aceleración max IHSDM (m/s ²)	Deceleración max IHSDM (m/s ²)	
		P1	P2	P3	PC	PM	PT	P1	P2	P3	PC	PM	PT	P1-P2	P2-P3	P3-PC	PC-PM	PM-PT					
1	435.85	88.0	88.0	87.1	87.2	84.1	85.0	MAX	MAX				MIN		0.00	-0.09	0.01	-0.15	0.04	0.04	-0.15	0.43	0.00
2	331.17	79.0	81.4	80.4	79.4	78.4	80.4		MAX				MIN		0.25	-0.09	-0.09	-0.11	0.21	0.25	-0.11	0.43	-0.21
3	322.13	84.0	84.5	82.5	79.5	77.0	79.0		MAX				MIN		0.05	-0.18	-0.27	-0.15	0.12	0.12	-0.27	0.43	-0.24
4	343.77	88.0	88.0	86.2	84.2	77.2	82.2	MAX	MAX				MIN		0.00	-0.18	-0.19	-0.38	0.27	0.27	-0.38	0.43	-0.18
7	678.10	95.0	97.6	95.0	94.7	90.9	91.9		MAX				MIN		0.32	-0.27	-0.03	-0.23	0.06	0.32	-0.27	0.21	0.00
124	146.36	83.2	84.0	84.0	77.2	70.0	70.0		MAX	MAX			MIN	MIN	0.09	0.00	-0.61	-0.76	0.00	0.09	-0.76	0.54	-1.00
187	381.05	92.8	93.1	91.0	87.0	81.7	86.0		MAX				MIN		0.04	-0.21	-0.39	-0.36	0.29	0.29	-0.39	0.43	-0.10
37	145.39	88.3	88.3	85.0	78.0	73.3	74.0	MAX	MAX				MIN		0.00	-0.32	-0.63	-0.55	0.08	0.08	-0.63	0.54	-1.00
38	291.75	87.9	87.2	85.3	82.3	81.3	82.6	MAX					MIN		-0.08	-0.18	-0.28	-0.10	0.13	0.13	-0.28	0.43	-0.33
39	284.92	85.7	84.7	84.0	83.0	79.0	82.7	MAX					MIN		-0.11	-0.06	-0.09	-0.27	0.24	0.24	-0.27	0.43	-0.36
40	436.08	88.0	89.7	89.1	87.0	82.7	84.7		MAX				MIN		0.19	-0.06	-0.20	-0.29	0.13	0.19	-0.29	0.21	0.00
100	260.43	90.0	88.0	87.0	86.0	83.0	82.0	MAX					MIN		-0.22	-0.10	-0.10	-0.39	-0.13		-0.39	0.43	-0.45
69	350.62	90.0	91.0	90.0	87.1	86.1	89.0		MAX				MIN		0.12	-0.10	-0.28	-0.14	0.42	0.42	-0.28	0.43	-0.16
75	381.98	91.7	92.0	88.0	88.0	87.0	88.0		MAX				MIN		0.04	-0.40	0.00	-0.17	0.17	0.17	-0.40	0.43	-0.09
77	166.91	87.9	86.9	84.0	81.9	76.0	76.0	MAX					MIN	MIN	-0.11	-0.27	-0.20	-0.43	0.00		-0.43	0.54	-1.00
80	390.66	91.6	91.6	87.0	84.9	81.0	84.0	MAX	MAX				MIN		0.00	-0.45	-0.20	-0.38	0.29	0.29	-0.45	0.43	-0.08
80	229.20	92.0	91.0	90.0	89.0	82.0	82.0	MAX					MIN	MIN	-0.12	-0.10	-0.10	-0.74	0.00		-0.74	0.54	-0.61
83	177.23	90.0	90.0	89.0	84.0	80.0	80.0	MAX	MAX				MIN	MIN	0.00	-0.10	-0.48	-0.49	0.00		-0.49	0.54	-0.99
84	238.75	81.3	82.2	82.2	81.0	79.0	79.0		MAX	MAX			MIN	MIN	0.09	0.00	-0.10	-0.28	0.00	0.09	-0.28	0.54	-0.56
86	554.48	89.3	90.3	90.3	88.0	87.0	89.0		MAX	MAX			MIN		0.12	0.00	-0.22	-0.12	0.24	0.24	-0.22	0.21	0.00
87	242.11	85.0	86.5	85.0	82.0	81.0	83.0		MAX				MIN		0.17	-0.14	-0.28	-0.12	0.24	0.24	-0.28	0.54	-0.54
242	124.59	82.0	82.9	81.0	79.0	76.0	76.0		MAX				MIN		0.10	-0.18	-0.18	-0.55	-0.01	0.10	-0.55	0.54	-1.00
243	131.78	77.3	78.3	78.3	77.3	72.3	74.0		MAX	MAX			MIN		0.10	0.00	-0.09	-0.62	0.21	0.21	-0.62	0.54	-1.00

Fuente: *Elaboración propia*

PC: inicio curva circular PM: punto medio curva circular PT: fin curva circular P1: punto 200 m antes del PC P2: punto 130 m antes del PC P3: punto 60 m antes del PC

Tabla 27 Cálculo de las aceleraciones máximas de campo y del modelo IHSDM en curvas entre -9 y -4%

CURVA	R (m)	V ₈₅ DE CAMPO (Km/h)				LOCALIZACIÓN DE V ₈₅ MÁXIMOS Y MÍNIMOS				ACELERACIONES Y DECELERACIONES (m/s ²)			Aceleración max campo (m/s ²)	Deceleración max campo (m/s ²)	Aceleración max IHSDM (m/s ²)	Deceleración max IHSDM (m/s ²)
		PRC	PC	PM	PT	PRC	PC	PM	PT	PRC-PC	PC-PM	PM-PT				
1	35	51.35	45.35	43	40	MAX			MIN	-1.12	-0.27	-0.32		-1.12	0.54	-1.00
2	152	49	48	49	49.4				MIN	-0.10	0.12	0.05	0.12	-0.10	0.54	-1.00
3	146	48	49	49	48.4	MIN	MAX	MAX		0.08	0.00	-0.07	0.08	-0.07	0.54	-1.00
4	54	45	45	42	41	MAX	MAX		MIN	0.00	-0.32	-0.10		-0.32	0.54	-1.00
5	85	46	48	45.85	44.85				MAX	0.17	-0.13	-0.06	0.17	-0.13	0.54	-1.00
6	98	44.3	44	45.3	46.3				MIN	-0.03	0.17	0.13	0.17	-0.03	0.54	-1.00
7	76	39.5	40	43	44.5	MIN			MAX	0.10	0.69	0.37	0.69		0.54	-1.00
8	105	43	44.5	45.5	46.5	MIN			MAX	0.51	0.18	0.19	0.51		0.54	-1.00
9	24	52	46	40.6	34	MAX			MIN	-0.99	-0.65	-0.68		-0.99	0.54	-1.00
10	80	61	58	57	58.45	MAX		MIN		-0.66	-0.13	0.20	0.20	-0.66	0.54	-1.00
11	76	58.45	58.45	59.45	59.9	MIN	MIN		MAX	0.00	0.20	0.09	0.20		0.54	-1.00
12	76	59.9	59.9	59.9	59.45	MAX	MAX	MAX	MIN	0.00	0.00	-0.10		-0.10	0.54	-1.00
13	130	59.9	61	63	63.9	MIN			MAX	0.07	0.36	0.17	0.36		0.54	-1.00
14	63	62.4	60.8	61.4	56.8	MAX			MIN	-0.31	0.19	-1.40	0.19	-1.40	0.54	-1.00
15	29	50	45.15	32.15	33	MAX		MIN		-1.55	-2.67	0.15	0.15	-2.67	0.54	-1.00
16	20	33	33	35	37.5	MIN	MIN		MAX	0.00	0.42	0.56	0.56		0.54	-1.00
17	33	54	50	50	50	MAX	MIN	MIN	MIN	-0.32	0.00	0.00		-0.32	0.54	-1.00
18	31	50	50	47.8	43	MAX	MAX		MIN	0.00	-0.57	-1.16		-1.16	0.54	-1.00
19	30	43	43	33	29	MAX	MAX		MIN	0.00	-1.58	-0.52		-1.58	0.54	-1.00
20	64	52.7	52.7	53.7	54.7	MIN	MIN		MAX	0.00	0.21	0.21	0.21		0.54	-1.00
21	95	54.3	54.3	49.3	53	MAX	MAX	MIN		0.00	-0.93	0.68	0.68	-0.93	0.54	-1.00
22	24	53	52	53	55.15				MIN	-0.51	0.17	0.38	0.38	-0.51	0.54	-1.00
23	41	52	54	44	43				MAX	0.74	-1.54	-0.14	0.74	-1.54	0.54	-1.00
24	54	42	43	44	45	MIN			MAX	0.39	0.13	0.14	0.39		0.54	-1.00
25	227	69	69	67.4	65	MAX	MAX		MIN	0.00	-0.38	-0.56		-0.56	0.54	-0.62
26	117	69.8	63	61.8	72.6			MIN	MAX	-0.44	-0.12	1.17	1.17	-0.44	0.54	-1.00
27	204	73	66	66	64	MAX			MIN	-0.36	0.00	-0.26		-0.36	0.54	-0.77
28	173	64	64	62	63	MAX	MAX	MIN		0.00	-0.22	0.11	0.11	-0.22	0.54	-1.00

Fuente: *Elaboración propia*

PC: inicio curva circular PM: punto medio curva circular PT: fin curva circular PRC: punto medio recta corta precedente al PC

Tabla 28 Cálculo de las aceleraciones máximas de campo y del modelo IHSDM en curvas entre 4 y 9%

CURVA	R (m)	V ₈₅ DE CAMPO (Km/h)				LOCALIZACIÓN DE V ₈₅ MÁXIMOS Y MÍNIMOS				ACELERACIONES Y DECELERACIONES (m/s ²)			Aceleración max campo (m/s ²)	Deceleración max campo (m/s ²)	Aceleración max IHSDM (m/s ²)	Deceleración max IHSDM (m/s ²)
		PRC	PC	PM	PT	PRC	PC	PM	PT	PRC-PC	PC-PM	PM-PT				
1	35	54.2	49	39	38	MAX			MIN	-1.04	-1.14	-0.10		-1.14	0.54	-1.00
2	152	45.35	48.35	50	49.35	MIN		MAX		0.29	0.20	-0.08	0.29	-0.08	0.54	-1.00
3	146	58.25	59.25	58.25	59	MIN	MAX	MIN		0.10	-0.14	0.10	0.10	-0.14	0.54	-1.00
4	54	59.6	53	43	41.6	MAX			MIN	-0.86	-1.17	-0.14		-1.17	0.54	-1.00
5	85	63.65	46.55	49	50	MAX	MIN			-1.73	0.15	0.06	0.15	-1.73	0.54	-1.00
6	98	49	50	51.3	52	MIN			MAX	0.11	0.19	0.11	0.19		0.54	-1.00
7	76	61	61	62	62	MIN	MIN	MAX	MAX	0.00	0.34	0.00	0.34		0.54	-1.00
8	105	62	62	60.9	60	MAX	MAX		MIN	0.00	-0.28	-0.22		-0.28	0.54	-1.00
9	24	58.1	52	41.3	41	MAX			MIN	-1.13	-1.39	-0.03		-1.39	0.54	-1.00
10	80	61.95	58	58	58	MAX	MIN	MIN	MIN	-0.87	0.00	0.00		-0.87	0.54	-1.00
11	76	58	58	56.9	54	MAX	MAX		MIN	0.00	-0.22	-0.55		-0.55	0.54	-1.00
12	76	54	54	58.15	60.9	MIN	MIN		MAX	0.00	0.95	0.63	0.95		0.54	-1.00
13	130	64.75	69.3	70	70.3	MIN			MAX	0.31	0.14	0.06	0.31		0.54	-1.00
14	63	54.15	51.3	47.45	45.15	MAX			MIN	-0.47	-0.98	-0.55		-0.98	0.54	-1.00
15	29	39.3	37	31.15	35	MAX		MIN		-0.59	-1.06	0.68	0.68	-1.06	0.54	-1.00
16	20	35	35	37	43.3	MIN	MIN		MAX	0.00	0.44	1.56	1.56		0.54	-1.00
17	33	60	54	51.85	47.85	MAX			MIN	-0.53	-0.57	-0.99		-0.99	0.54	-1.00
18	31	47.85	47.85	43.3	39.3	MAX	MAX		MIN	0.00	-1.10	-0.88		-1.10	0.54	-1.00
19	30	39.3	39.3	32	29.3	MAX	MAX		MIN	0.00	-1.09	-0.35		-1.09	0.54	-1.00
20	64	61	61	57	53.25	MAX	MAX		MIN	0.00	-0.93	-0.82		-0.93	0.54	-1.00
21	95	52	52	50.3	50.3	MAX	MAX	MIN	MIN	0.00	-0.31	0.00		-0.31	0.54	-1.00
22	24	53	50.3	38.15	41.15	MAX		MIN		-1.35	-1.76	0.39	0.39	-1.76	0.54	-1.00
23	41	42	48	45	39		MAX		MIN	1.89	-0.44	-0.79	1.89	-0.79	0.54	-1.00
24	54	44.15	42.15	42.15	45.3		MIN	MIN	MAX	-0.78	0.00	0.43	0.43	-0.78	0.54	-1.00
25	227	89	89	86.8	79	MAX	MAX		MIN	0.00	-0.68	-2.27		-2.27	0.54	-0.62
26	117	73.6	70	74	73		MIN	MAX		-0.25	0.46	-0.12	0.46	-0.25	0.54	-1.00
27	204	74	70	69	68.15	MAX			MIN	-0.22	-0.14	-0.12		-0.22	0.54	-0.77
28	173	69.15	69.15	78	79.15	MIN	MIN		MAX	0.00	1.13	0.16	1.13		0.54	-1.00

Fuente: *Elaboración propia*

PC: inicio curva circular **PM:** punto medio curva circular **PT:** fin curva circular **PRC:** punto medio recta corta precedente al PC

Tabla 29 Evaluación del modelo de aceleraciones de IHSDM utilizando MSE, DMA, DMA%, SESGO y CHI cuadrado.

ACELERACIÓN (m/s ²)							
Radio (m)	Número curvas	MSE (m/s ²) ²	DMA (m/s ²)	DMA %	BIAS (m/s ²)	χ^2 calculado	χ^2 crítico
R>875	0						
436<R<875	4						
250<R<436	12	0.07	0.24	56.03	-0.24	0.16	21.03
175<R<250	4						
DECELERACIÓN (m/s ²)							
>436 m	3						
175<R<436	21	0.07	0.21	85.25	0.09	0.22	32.67
<175	29	0.38	0.55	54.54	0.46	0.38	42.56

Fuente: *Elaboración propia*

- En la etapa de evaluación estadística se clasificaron las aceleraciones de campo en los rangos de radios de curvatura empleados por IHSDM, considerando únicamente los rangos que contengan un número representativo de curvas. El análisis de los resultados de las pruebas estadísticas mostró que no existen diferencias significativas entre las aceleraciones de campo y las pronosticadas por el modelo IHSDM para los rangos de radios de curvatura evaluados.

El modelo de aceleraciones de IHSDM no considera las aceleraciones para radios de curvatura menores de 175 m, y la ausencia de aceleraciones de campo para los rangos de radios de curvatura establecidos por el modelo hace que no se pueda desarrollar una evaluación completa del mismo, por éstas razones no se recomienda su uso para la predicción de aceleraciones en carreteras colombianas hasta que se evalúe completamente, y se plantea más adelante un modelo de

aceleraciones basado en las características geométricas contempladas en ésta fase del estudio.

7.6 PLANTEAMIENTO DE LOS MODELOS DE ACELERACIÓN PARA USO EN COLOMBIA

En la etapa anterior se determinó que no es recomendable utilizar el modelo de predicción de aceleración de IHSDM en las carreteras colombianas; en esta sección del estudio se plantearon modelos de aceleración usando la base de datos de V_{85} para curvatura horizontal y pendientes entre -9 y 9% obtenidas en las carreteras que se muestran en las Tablas 10 y 11.

Para el planteamiento de los modelos de aceleración se realizaron las siguientes etapas:

1. Se elaboró gráficas de V_{85} en el centro de la curva circular contra el radio de curvatura para poder establecer los rangos de curvatura donde las V_{85} pueden presentar algún comportamiento característico.

Las Figuras 47, 48 y 49 muestran que las V_{85} varían ampliamente para radios de curvatura similares, por tal razón se consideró explorar los perfiles de V_{85} a lo largo de cada sitio de estudio con rangos de radio de curvatura de amplitud entre 50 y 100m obtenido para pendientes entre 0 y 4% rangos de radios de curvatura entre 100 y 200 m, 200 y 300m, 300 y 400m y mayores de 400 m. Para pendientes entre 4 y 9% y -9 y -4% rangos de radios de curvatura entre 0 y 50 m, 50 y 100 m y mayores de 100 m.

Figura 47 Relación entre V_{85} en el centro de la curva y radio para curvas horizontales en pendientes entre 0 y 4%

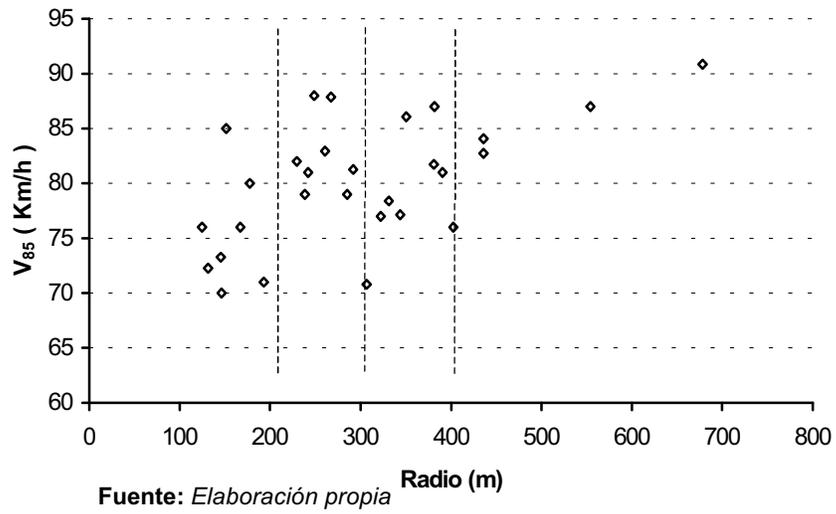


Figura 48 Relación entre V_{85} en el centro de la curva y radio para curvas horizontales en pendientes entre 4 y 9%

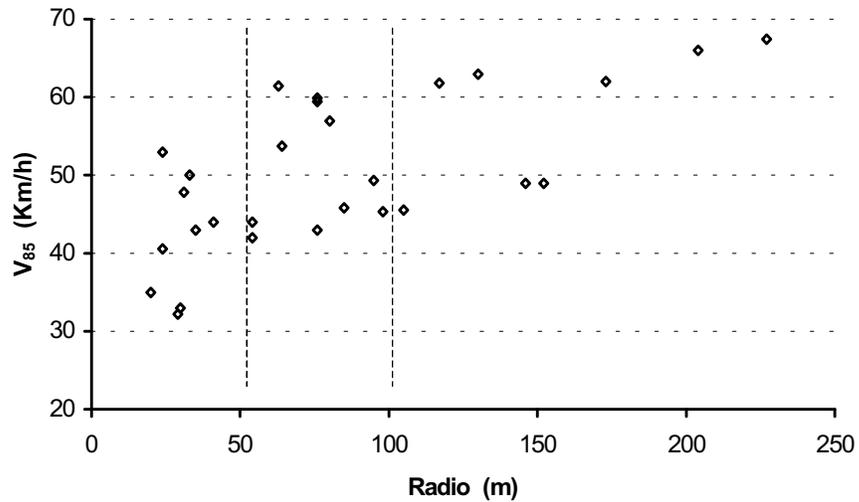
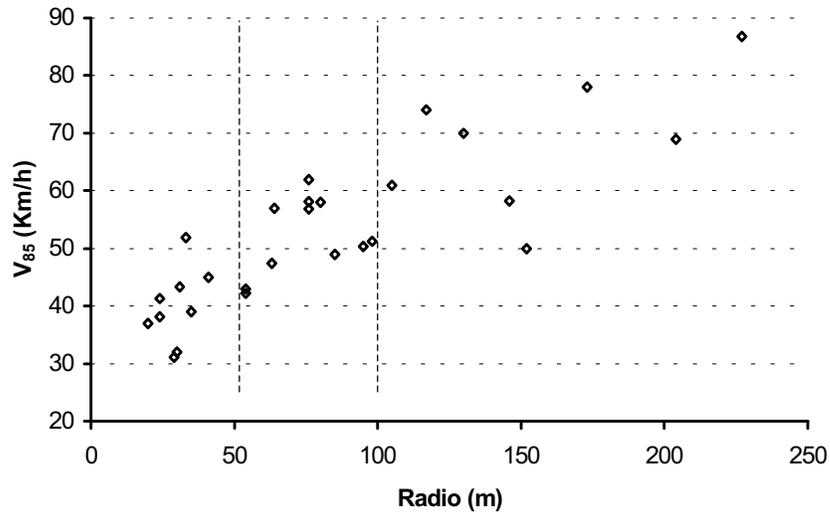


Figura 49 Relación entre V_{85} en el centro de la curva y radio para curvas horizontales en pendientes entre -9 y -4%

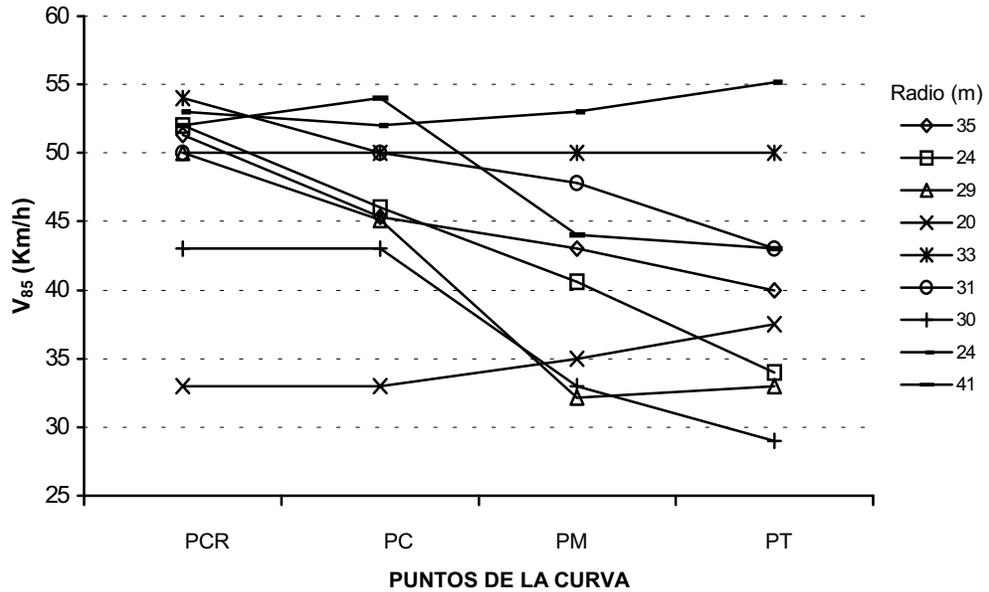


Fuente: *Elaboración propia*

2. Se elaboró los perfiles de velocidad para cada sitio de estudio en los rangos de curvatura establecidos en la etapa anterior, con el fin de determinar el comportamiento de las V_{85} a lo largo de los mismos. Las Figuras 50 a 59 muestran los perfiles de velocidad de V_{85} agrupados por rangos de radio de curvatura para cada tipo de pendiente y en las Tablas 26, 27 y 28 se puede ver la localización de los V_{85} máximos y mínimos.

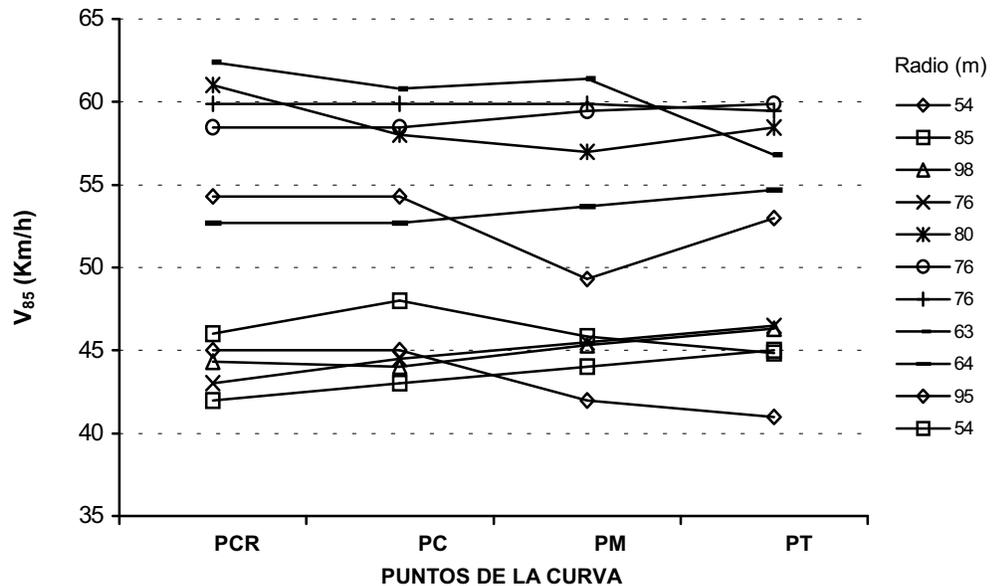
Los perfiles de velocidad se generan empleando las V_{85} de campo obtenidas en los puntos considerados en las figuras 23 y 24.

Figura 50 Perfil de velocidades para curvas horizontales con radio menor de 50 m en pendientes entre 4 y 9%



Fuente: Elaboración propia

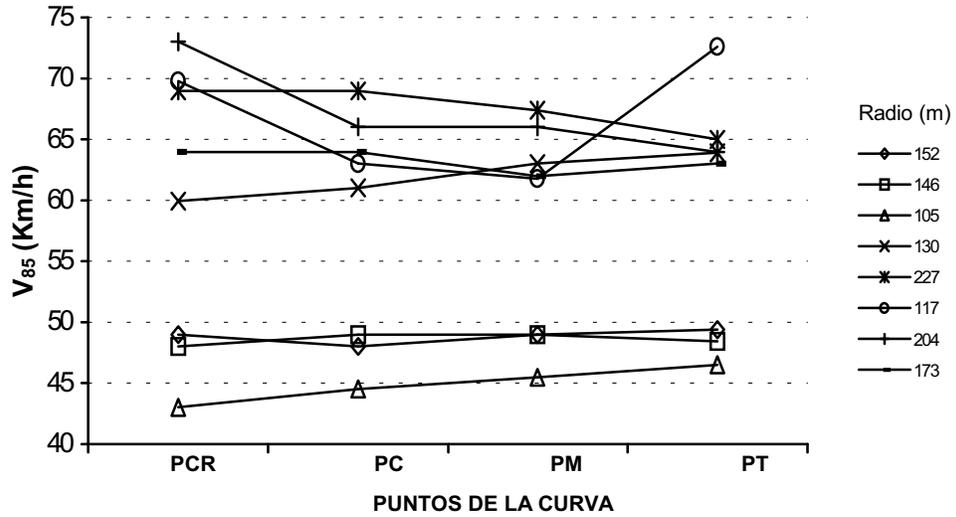
Figura 51 Perfil de velocidades para curvas horizontales con radio entre 50 y 100 m en pendientes entre 4 y 9%



PRC: punto medio recta precedente al PC PC: inicio curva circular PM: punto medio curva circular PT: fin curva circular

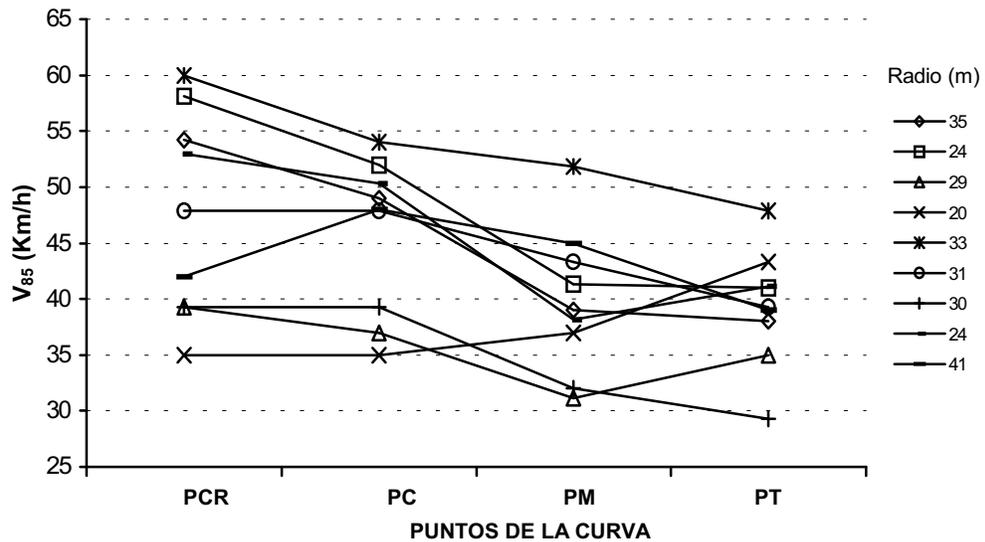
Fuente: Elaboración propia

Figura 52 Perfil de velocidades para curvas horizontales con radio mayor de 100 m en pendientes entre 4 y 9%



Fuente: *Elaboración propia*

Figura 53 Perfil de velocidades para curvas horizontales con radio menor de 50 m en pendientes entre -9 y -4%



PRC: punto medio recta precedente al PC PC: inicio curva circular PM: punto medio curva circular PT: fin curva circular

Fuente: *Elaboración propia*

Figura 56 Perfil de velocidades para curvas horizontales con radio menor 200 m en pendientes entre 0 y 4%

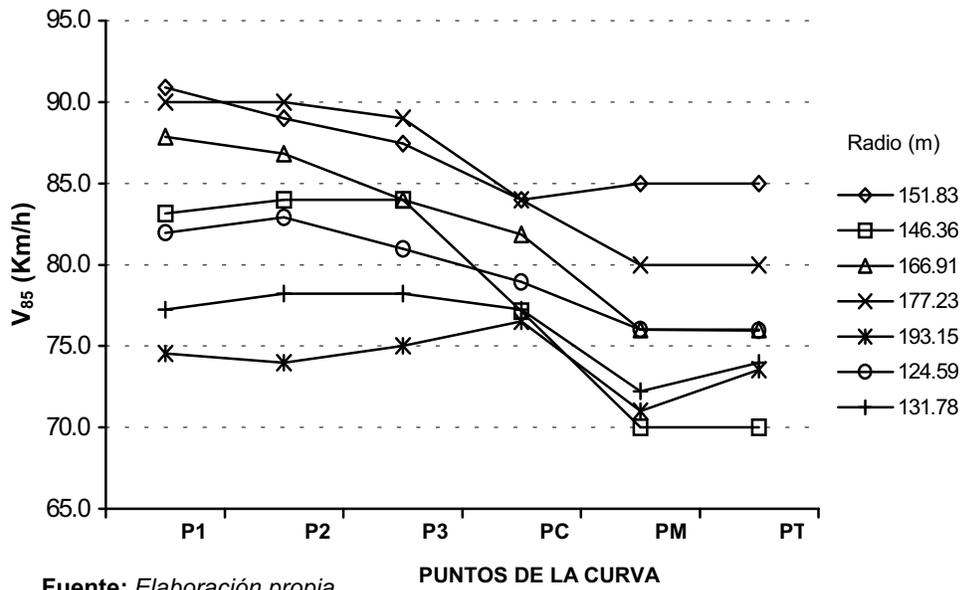


Figura 57 Perfil de velocidades para curvas horizontales con radio entre 200 y 300 m en pendientes entre 0 y 4%

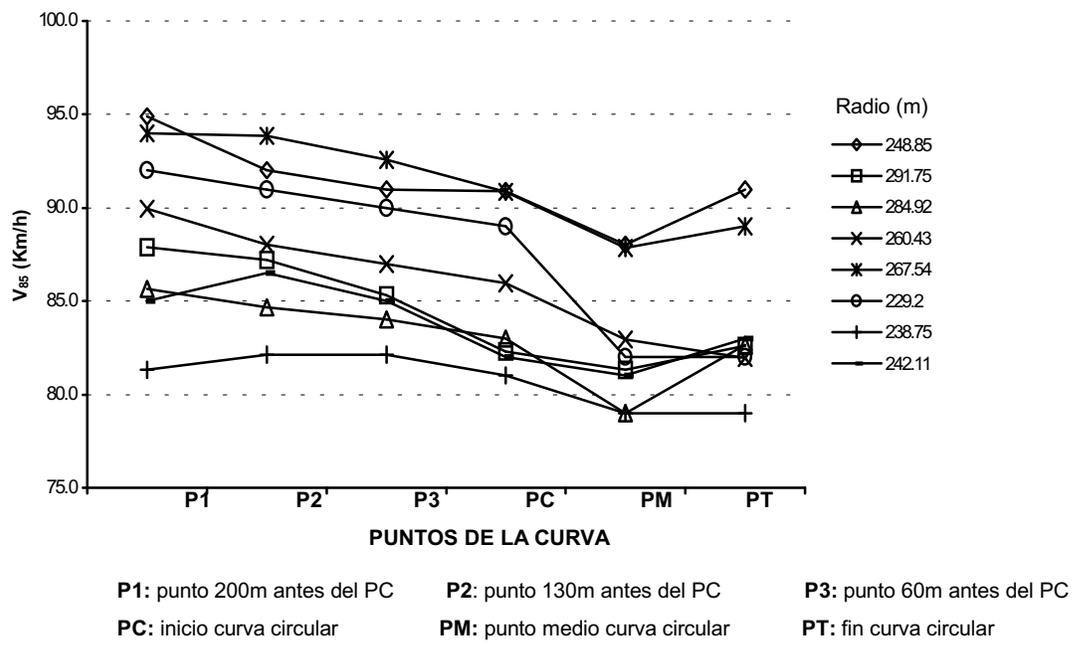
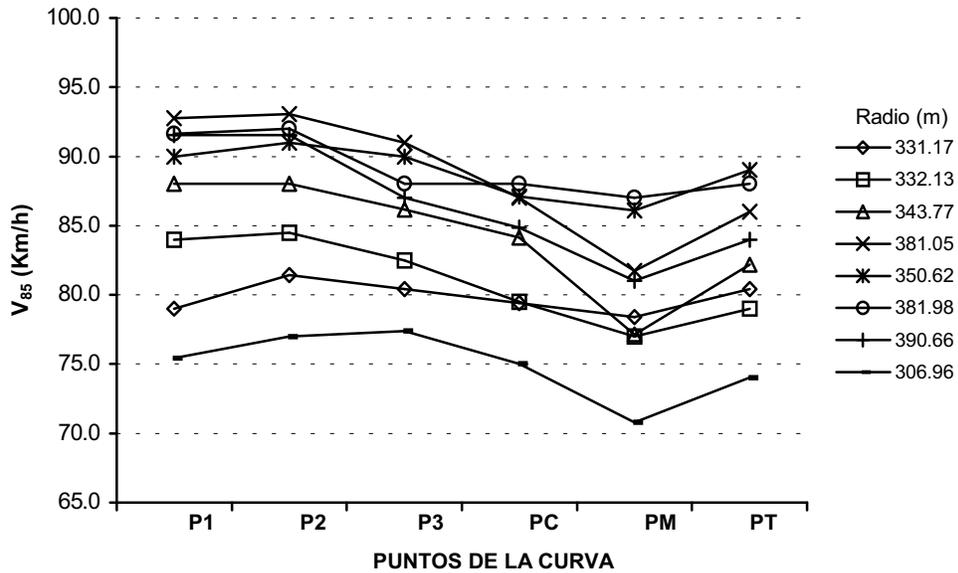
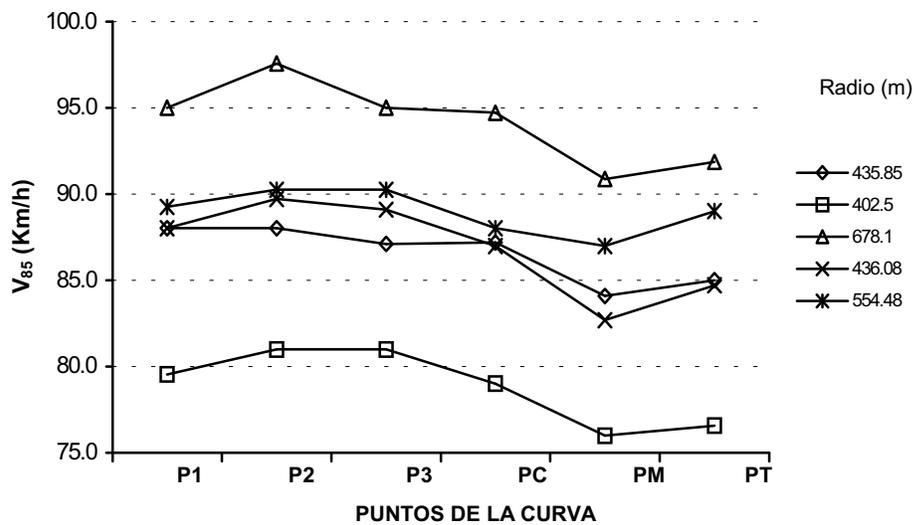


Figura 58 Perfil de velocidades para curvas horizontales con radio entre 300 y 400 m en pendientes entre 0 y 4%



Fuente: *Elaboración propia*

Figura 59 Perfil de velocidades para curvas horizontales con radio mayor a 400 m en pendientes entre 0 y 4%



P1: punto 200m antes del PC **P2:** punto 130m antes del PC **P3:** punto 60m antes del PC
PC: inicio curva circular **PM:** punto medio curva circular **PT:** fin curva circular

Fuente: *Elaboración propia*

El análisis de éstas tablas y gráficas permitió hacer las siguientes observaciones:

1. El punto donde los conductores empiezan a decelerar o acelerar varía a lo largo de la curva.
2. Se evidenció que las reducciones de velocidad son más pequeñas en los radios de curvatura más grandes y viceversa.
3. La localización de los V_{85} máximos y mínimos varió en cada punto de la curva; las Tablas 27 y 28 muestran una amplia fluctuación en los puntos donde se presentan éstos valores para cada curva sobre pendientes entre -9 y -4%, y entre 4 y 9%.
4. En las curvas en pendientes entre 0 y 4% se observó que la mayor reducción de velocidad ocurre cerca o en el punto medio de la curva, la máxima velocidad se presenta en la recta precedente y en algunas curvas los conductores aceleran en la recta precedente (ver Tabla 29).

Con base en los análisis anteriores se planteó el uso de las tasas máximas de aceleración y deceleración en cada curva para generar el modelo de predicción de aceleraciones.

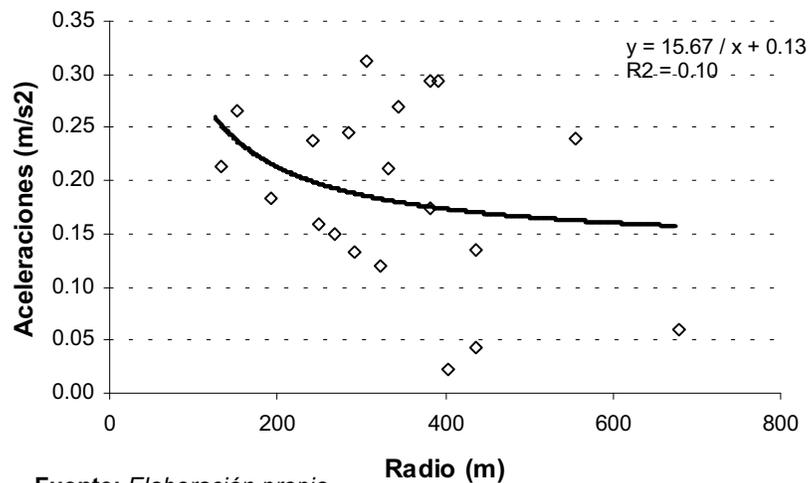
Se consideraron las siguientes alternativas para el desarrollo de estos modelos:

1. Modelos de regresión usando todos los radios de curvatura para cada tipo de pendiente
2. Modelos de regresión usando todos los radios de curvatura para todo tipo de pendiente
3. Tasas de aceleración máximas promedio constantes para cada rango de radio de curvatura.

7.6.1 Modelos de regresión usando todos los radios de curvatura para cada tipo de pendiente

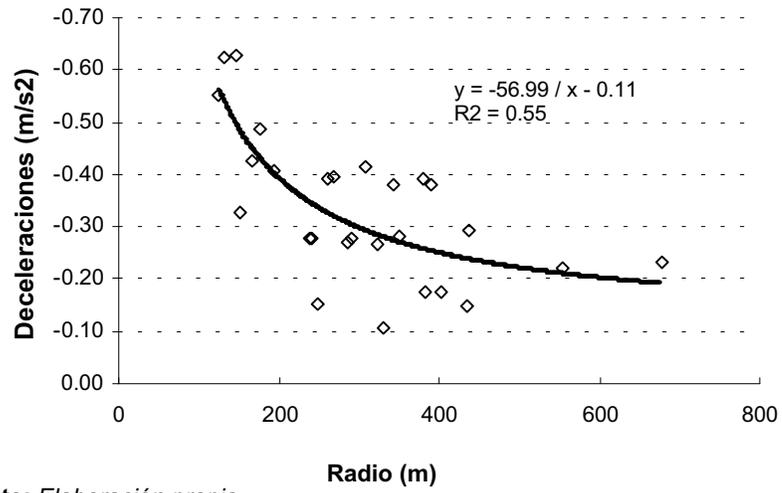
Previamente se determinó que el radio de curvatura es la variable geométrica que presenta la mejor correlación para la predicción de las aceleraciones y deceleraciones y con él como variable independiente se planteó un modelo para cada tipo de pendiente; las Figuras 60 a 65 muestran la mejor regresión encontrada en cada uno de ellos.

Figura 60 Modelo de predicción de aceleración en curvas horizontales sobre pendientes entre 0 y 4%



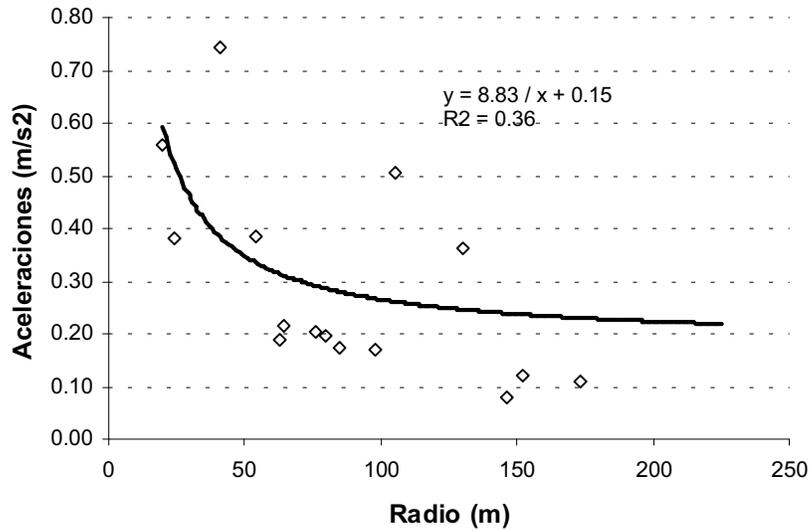
Fuente: *Elaboración propia*

Figura 61 Modelo de predicción de deceleración en curvas horizontales sobre pendientes entre 0 y 4%



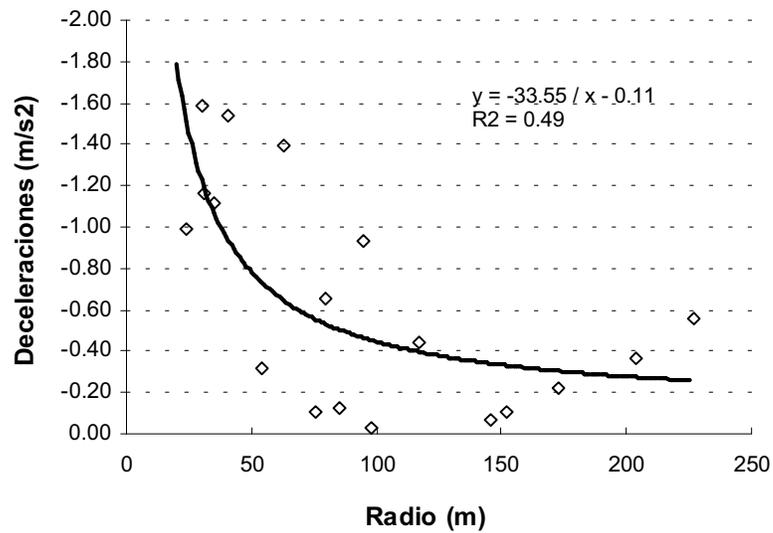
Fuente: *Elaboración propia*

Figura 62 Modelo de predicción de aceleración en curvas horizontales sobre pendientes entre 4 y 9%



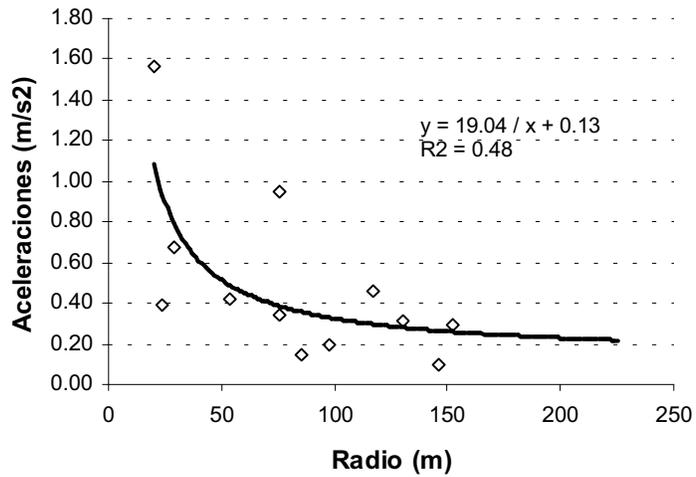
Fuente: *Elaboración propia*

Figura 63 Modelo de predicción de deceleración en curvas horizontales sobre pendientes entre 4 y 9%



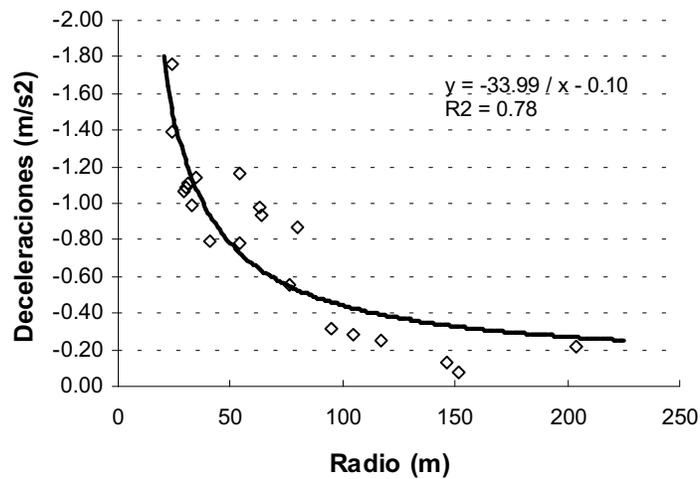
Fuente: *Elaboración propia*

Figura 64 Modelo de predicción de aceleración en curvas horizontales sobre pendientes entre -4 y -9%



Fuente: *Elaboración propia*

Figura 65 Modelo de predicción de deceleración en curvas horizontales sobre pendientes entre -4 y -9%



Fuente: *Elaboración propia*

El análisis de las gráficas permitió establecer las siguientes observaciones:

1. La aceleración y deceleración es inversamente proporcional al radio de curvatura es decir a mayor radio los conductores aceleran y desaceleran en menor cantidad.
2. No se observa una tendencia marcada en las gráficas de aceleraciones para las pendientes entre 0 y 4% y 4 y 9%, por tal razón presentan las correlaciones más bajas. La gran variabilidad en las aceleraciones encontradas en campo muestran que no hay un comportamiento definido por parte de los conductores al maniobrar sus vehículos en las curvas con este tipo de pendientes.

La Tabla 30 resume las regresiones obtenidas por cada modelo.

Tabla 30 Regresiones de los modelos de aceleración y deceleración para cada rango de pendiente

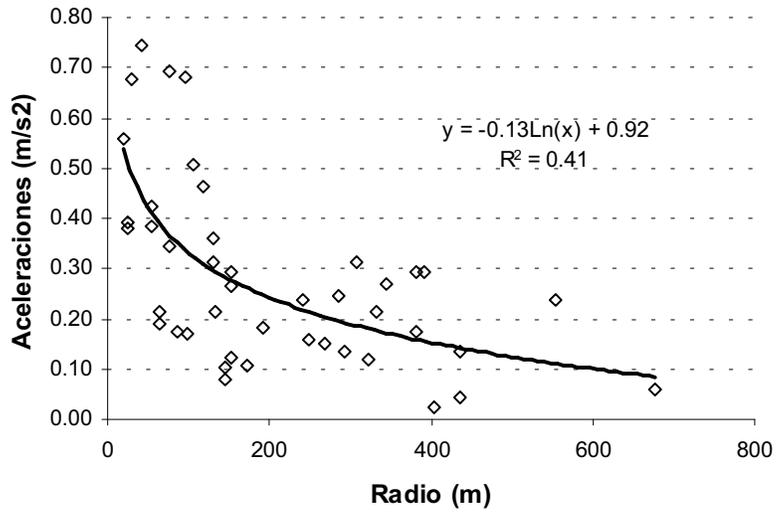
PENDIENTE (%)	MODELO	
	Aceleración (r^2)	Deceleración (r^2)
0 y 4%	0.10	0.55
4 y 9%	0.36	0.49
-4 y -9%	0.48	0.78

Fuente: *Elaboración propia*

7.6.2 Modelos de predicción usando todos los radios de curvatura para todo tipo de pendiente

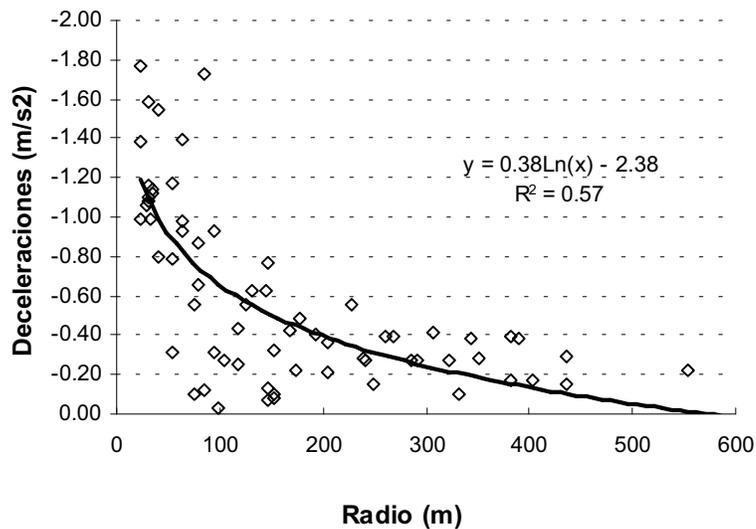
Al igual que en el modelo anterior se utilizó el radio de curvatura como variable independiente, y se planteó un modelo que considera la predicción para todo tipo de pendiente; las Figuras 66 y 67 muestran la mejor regresión encontrada para cada uno de ellos.

Figura 66 Modelo de predicción de aceleración en curvas horizontales en pendientes entre -9 y 9%



Fuente: *Elaboración propia*

Figura 67 Modelo de predicción de deceleración en curvas horizontales en pendientes entre -9 y 9%



Fuente: *Elaboración propia*

El análisis de las gráficas permitió hacer las siguientes observaciones:

1. Se requiere mayor información de aceleraciones en radios de curvatura superiores a 400 m, ya que los modelos desarrollados predicen aceleraciones y deceleraciones casi nulas para los radios entre 400 y 550 m.
2. Mejora la correlación del modelo de aceleraciones, la Figura 66 muestra que presenta un comportamiento más definido observándose que los cambios en la magnitud son inversamente proporcionales al radio de curvatura.

7.6.3 Modelo de tasas de aceleración máxima promedio

En este modelo se utilizaron los radios de curvatura en todo tipo de pendiente y se asume que la aceleración es constante en cada rango de radios considerado. Las Tablas 31 a 36 muestran las aceleraciones máximas en cada curva, y su promedio.

Tabla 31 Tasa media de aceleración en curvas horizontales con radio de curvatura menor de 50 m

CURVA	R (m)	Pendiente (%)	Aceleración max (m/s ²)
15	29	entre -9 y -4	0.68
16	20		1.56
22	24		0.39
23	41		1.89
16	20	entre 4 y 9	0.56
22	24		0.38
23	41		0.74
Promedio			0.89

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 32 Tasa media de aceleración en curvas horizontales con radio de curvatura entre 50 y 100 m

CURVA	R (m)	Pendiente (%)	Aceleración max (m/s ²)
5	85	entre -9 y -4	0.15
6	98		0.19
7	76		0.34
24	54		0.43
5	85	entre 4 y 9	0.17
6	98		0.17
7	76		0.69
10	80		0.20
11	76		0.20
14	63		0.19
20	64		0.21
21	95		0.68
24	54	0.39	
Promedio			0.31

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 33 Tasa media de aceleración en curvas horizontales con radio de curvatura mayor de 100 m

CURVA	R (m)	Pendiente (%)	Aceleración max (m/s ²)
2	152	entre -9 y -4	0.29
3	146		0.10
13	130		0.31
26	117		0.46
2	152	entre 4 y 9	0.12
3	146		0.08
8	105		0.51
13	130		0.36
28	173		0.11
124	146.36	0 y 4%	0.09
37	145.39		0.08
242	124.59		0.10
243	131.78		0.21
38	291.75		0.13
39	284.92		0.24
84	238.75		0.09
87	242.11		0.24
2	331.17		0.25
3	322.13		0.12
4	343.77		0.27
187	381.05		0.29
69	350.62		0.42
75	381.98		0.17
80	390.66		0.29
1	435.85		0.04
7	678.1		0.32
40	436.08	0.19	
86	554.48	0.24	
Promedio			0.22

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 34 Tasa media de deceleración en curvas horizontales con radio de curvatura menor de 50 m

CURVA	R (m)	Pendiente (%)	Aceleración máx. (m/s ²)
1	35	entre -9 y -4	-1.14
9	24		-1.39
15	29		-1.06
17	33		-0.99
18	31		-1.10
19	30		-1.09
22	24		-1.76
23	41		-0.79
1	35	entre 4 y 9	-1.12
9	24		-0.99
17	33		-0.32
18	31		-1.16
19	30		-1.58
22	24		-0.51
Promedio			-1.07

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 35 Tasa media de deceleración en curvas horizontales con radio de curvatura entre 50 y 100 m

CURVA	R (m)	Pendiente (%)	Aceleración máx. (m/s ²)
4	54	entre -9 y -4	-1.17
10	80		-0.87
11	76		-0.55
14	63		-0.98
20	64		-0.93
21	95		-0.31
24	54		-0.78
4	54		Entre 4 y 9
5	85	-0.13	
10	80	-0.66	
14	63	-1.40	
21	95	-0.93	
Promedio			-0.75

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 36 Tasa media de deceleración en curvas horizontales con radio de curvatura mayor de 100 m

CURVA	R (m)	Pendiente (%)	Aceleración máx (m/s ²)
2	152	Entre -9 y -4	-0.08
3	146		-0.14
8	105		-0.28
26	117		-0.25
27	204		-0.22
2	152	Entre 4 y 9	-0.10
3	146		-0.07
25	227		-0.56
26	117		-0.44
27	204		-0.36
28	173	-0.22	
124	146.36	0 y 4%	-0.76
37	145.39		-0.63
77	166.91		-0.43
83	177.23		-0.49
242	124.59		-0.55
243	131.78		-0.62
38	291.75		-0.28
39	284.92		-0.27
100	260.43		-0.39
80	229.2		-0.74
84	238.75		-0.28
87	242.11		-0.28
2	331.17		-0.11
3	322.13		-0.27
4	343.77		-0.38
187	381.05		-0.39
69	350.62		-0.28
75	381.98		-0.40
80	390.66		-0.45
1	435.85		-0.15
7	678.1	-0.27	
40	436.08	-0.29	
86	554.48	-0.22	
Promedio			-0.34

Fuente: *Elaboración propia*

El mejor modelo de predicción se estableció mediante la evaluación estadística utilizando MSE, DMA, DMA% y BIAS entre los modelos y los datos de campo, seleccionando los que presentaron los mejores resultados.

La Tabla 37 presenta los resultados de la evaluación estadística realizada en cada uno de los modelos desarrollados.

Tabla 37 Evaluación estadística de los modelos de predicción de aceleración y deceleración en curvas horizontales desarrollados con V_{85} de campo

PENDIENTE	PREDICCIÓN	Modelo 1				Modelo 2				Modelo 3			
		MSE (m/s ²) ²	DMA (m/s ²)	DMA %	BIAS (m/s ²)	MSE (m/s ²) ²	DMA (m/s ²)	DMA %	BIAS (m/s ²)	MSE (m/s ²) ²	DMA (m/s ²)	DMA %	BIAS (m/s ²)
Entre -9 y -4%	Aceleración	0.20	0.29	57.80	0.10	0.28	0.32	74.81	0.21	0.26	0.42	60.78	-0.09
Entre 4 y 9%		0.04	0.16	58.85	0.05	0.04	0.17	49.65	-0.03	0.22	0.40	61.04	-0.35
Entre 0 y 4%		0.01	0.07	38.95	0.00	0.01	0.07	42.27	0.01	0.01	0.07	32.62	-0.03
Entre -9 y -4%	Deceleración	0.11	0.23	39.57	-0.06	0.11	0.25	35.23	0.01	0.11	0.23	33.50	-0.06
Entre 4 y 9%		0.19	0.35	57.34	0.05	0.18	0.36	49.67	0.13	0.16	0.32	47.27	0.08
Entre 0 y 4%		0.01	0.08	25.16	-0.01	0.02	0.10	46.24	-0.07	0.02	0.12	36.15	-0.01

Modelo 1: Modelos de regresión usando todos los radios de curvatura para cada tipo de pendiente

Modelo 2: Modelos de regresión usando todos los radios de curvatura para todo tipo de pendiente

Modelo 3: Tasas de aceleración máximas promedio constantes para cada rango de radio de curvatura

Fuente: *Elaboración propia*

El análisis de los resultados de las pruebas estadísticas permitió establecer las siguientes conclusiones:

1. Los modelos de regresión que usaron todos los radios de curvatura para cada tipo de pendiente presentaron las MSE, DMA, DMA% y BIAS más bajas, es decir que son los mejores modelos para predecir estas variables.
2. Los rangos de radio de curvatura recomendados para la utilización de los modelos se presenta en Tabla 38.

Tabla 38 Radios de curvatura recomendados para la utilización de los modelos de predicción de aceleración y deceleración

PENDIENTE	RADIO (m)	MODELO
Entre -9 y -4%	Entre 20 y 225	$a = 19.04 / R + 0.13$
Entre 4 y 9%	Entre 20 y 225	$a = 8.83 / R + 0.15$
Entre 0 y 4%	Entre 145 y 550	$a = 15.67 / R + 0.13$
Entre -9 y -4%	Entre 20 y 225	$d = -33.99 / R - 0.10$
Entre 4 y 9%	Entre 20 y 225	$d = -33.55 / R - 0.11$
Entre 0 y 4%	Entre 145 y 550	$d = -56.99 / R - 0.11$

Fuente: *Elaboración propia*

8. EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA

Con el propósito de observar las diferencias en la evaluación de la consistencia utilizando IHSDM y los modelos desarrollados en esta investigación, se evaluó un tramo de la carretera panamericana localizada en el Departamento del Cauca que presenta las siguientes características:

Relieve:	Montañoso
Carretera tipo:	Principal de una calzada
Tramo:	Mojarras - Piedra Sentada
Abscisas del tramo:	K36+011.65 al K39+000
Longitud (m):	3988.35
Velocidad de diseño (km/h):	60
TPD (veh/día):	1500
Ancho de carril (m):	3.65
Ancho de berma (m):	1.00
Radio mínimo (m):	23.24
Inclinación máx. de rasante (%):	9.20

Los datos para este estudio se tomaron de los planos de diseño de la carretera Mojarras - Popayán (ver anexo 4).

En la evaluación de la consistencia se utilizó la siguiente información como datos de entrada:

Abscisa inicial (m):	36011.650
Abscisa final (m):	39000
Trazado en planta:	datos de inicio y fin de tramos rectos, curvas circulares
Trazado en perfil:	inclinaciones de rasante, PIV, curvas verticales
Velocidad de diseño:	60 km/h
Ancho de carril:	3.65 m

Ancho de berma:	1 m
Tipo de vehículo:	13 (Según FHWA es el más popular)
Velocidad deseada:	80 km/h, valor mínimo utilizado por IHSDM
Velocidad al iniciar el tramo:	65 km/h (Tomando la velocidad con base en la curva anterior al tramo)
Velocidad al finalizar el tramo:	44 km/h (Tomando la velocidad con base en la curva siguiente al tramo)

El tramo tiene un total de 38 curvas circulares, el radio mínimo es de 23.24 m en la abscisa 37609.45 y el máximo de 217 m en la abscisa 36222.6. El 84 % de las curvas tiene radio inferior a 100 m.

La inclinación de la rasante está entre 4.9 y 9% y las curvas verticales tienen longitudes entre 40 y 50 m.

8.1 EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA CON IHSDM

Los resultados de la evaluación de la consistencia con IHSDM se presentan en las Figuras 68 y 69; en dichas figuras se puede apreciar lo siguiente (de arriba hacia abajo):

1. En la parte superior aparece la identificación del diseño y el sentido de desplazamiento en que se hace el análisis (puede ser en el sentido de avance del kilometraje o en sentido opuesto).
2. La primera línea (Intersections) representa las intersecciones; si las vías interceptadas por el diseño tienen intensidades de tráfico significativas, se recomienda hacer el análisis entre intersecciones.
3. La segunda línea (Elevation) corresponde al perfil longitudinal del eje de la vía.
4. El tercer elemento representado (K-Value) corresponde a la relación entre la longitud de cada curva vertical y el valor absoluto de la diferencia entre las inclinaciones de rasante en el vértice, calculado por el programa.
5. En la cuarta línea aparecen los radios en planta (Radius), representándose la curvatura horizontal del diseño.
6. Finalmente viene la representación de la velocidad (V_{85} Speed), enmarcada por dos líneas horizontales punteadas; la superior corresponde a la velocidad deseada asumida, y la inferior a la velocidad de diseño.

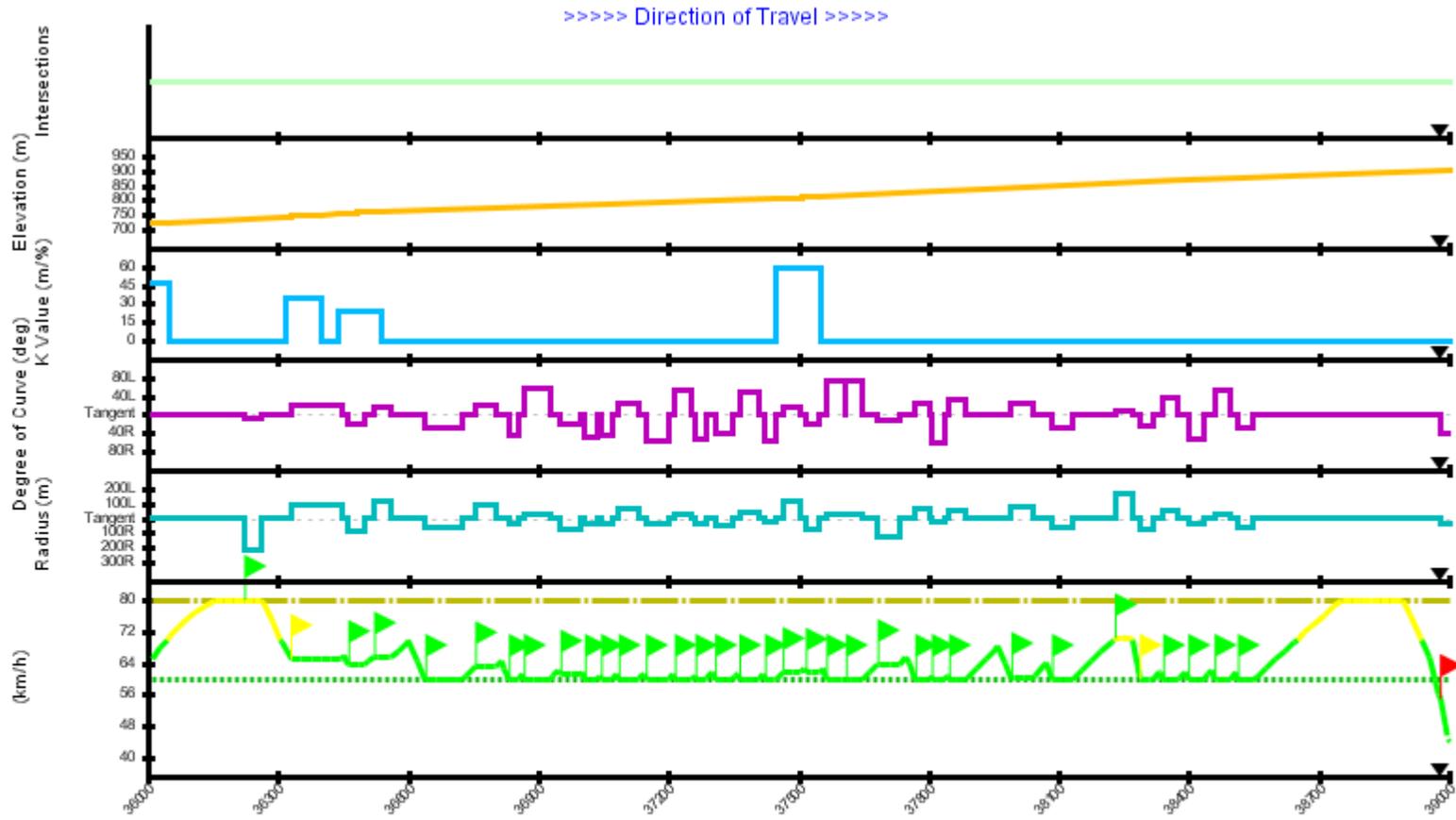
El V_{85} normalmente oscila entre las dos velocidades anteriores; cuando su diferencia con la velocidad de diseño es de 10 km/h o menos, el perfil se representa de color verde. Para diferencias entre 10 y 20 km/h, en color amarillo. Cuando se supera este valor, el perfil toma color rojo.

Las banderas en el perfil de velocidades indican los cambios de velocidad al llegar a una curva; el color varía según las mismas premisas indicadas en el párrafo anterior.

La Figura 68 presenta los resultados de la evaluación en el sentido Mojarras - Piedra Sentada, y permitió hacer las siguientes observaciones:

1. Las banderas colocadas sobre el perfil de velocidades (gran parte de color verde) indican que no hay variación brusca de velocidad, por tanto este aspecto no es crítico y estos sectores del trazado pueden considerarse como consistentes.
2. Aparecen 2 banderas amarillas en el trazado, indicando que en estos puntos se presentan diferencias de velocidad entre 10 y 20 km/h; estos puntos se deben atender para evitar accidentes.
3. La única bandera roja se presenta al finalizar el tramo y se debe a la reducción de velocidad entre la recta de 429 m de longitud y la curva de 42.57 m de radio. Este punto es un generador potencial de accidentes y necesita atención inmediata.
4. Se puede observar que la velocidad mínima es de 60 km/h y cubre gran parte del tramo; esto se debe a que el modelo IHSDM asume una velocidad de 60 km/h en las curvas que tienen radios menores a 75 m.
5. El perfil de velocidades en gran parte es de color verde, lo que indica que el diferencial entre la velocidad de diseño y V_{85} no supera los 10km/h, por tanto el alineamiento se puede considerar como consistente.

Figura 68 Resultados de la evaluación de consistencia del tramo de la carretera 2503-0 con IHSDM



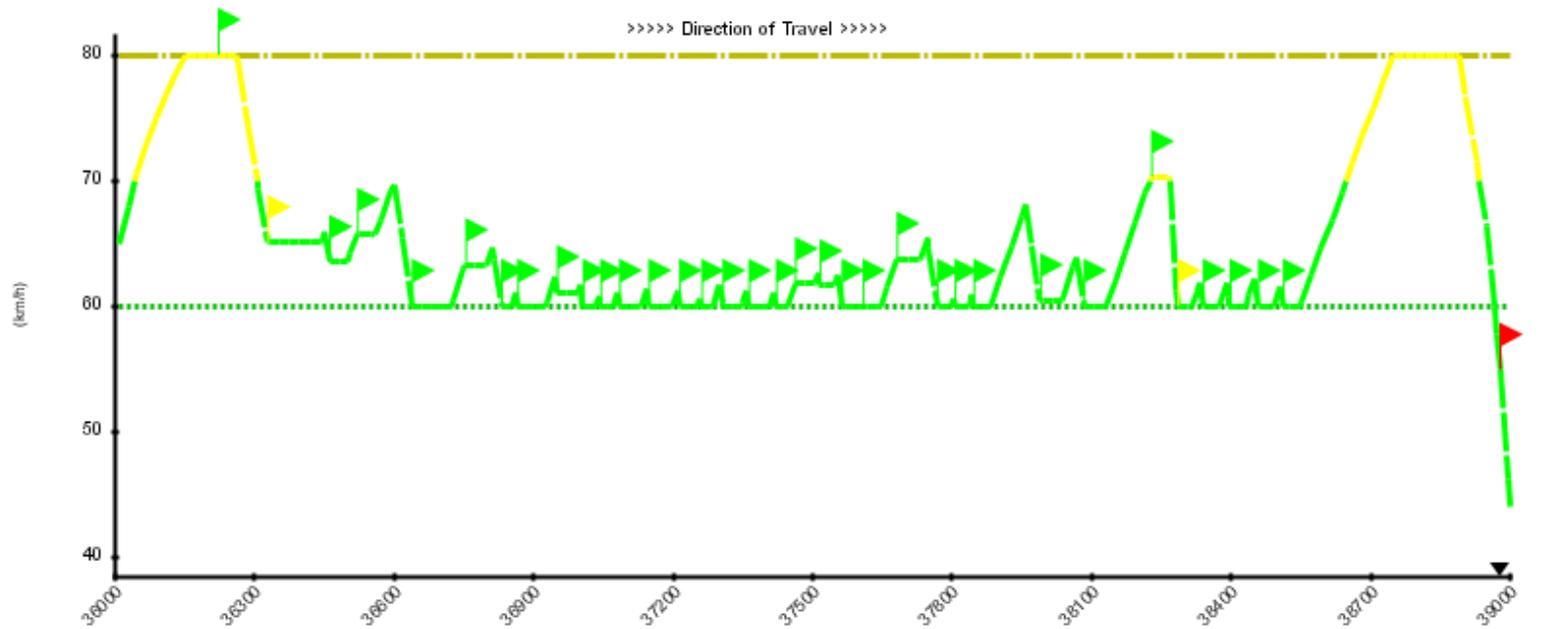
NOTE: Speed profile does NOT account for intersections.

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: *Elaboración propia*

Figura 69 Detalle del perfil de V_{85} generado por IHSDM



NOTE: Speed profile does NOT account for intersections.

Legend

- Desired Speed; km/h
- Design Speed; km/h
- V_{85} Speed; km/h; differential between design and V_{85} speed ≤ 10 km/h
- V_{85} Speed; km/h; differential between design and V_{85} speed > 10 km/h, ≤ 20 km/h
- V_{85} Speed; km/h; differential between design and V_{85} speed > 20 km/h

- ▲ Criterio 2; V_{85} speed differential of adjacent horizontal elements ≤ 10 km/h
- ▲ Criterio 2; V_{85} speed differential of adjacent horizontal elements > 10 km/h, ≤ 20 km/h
- ▲ Criterio 2; V_{85} speed differential of adjacent horizontal elements > 20 km/h

Fuente: *Elaboración propia*

8.2 EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA CON LOS MODELOS DESARROLLADOS EN ESTA INVESTIGACIÓN

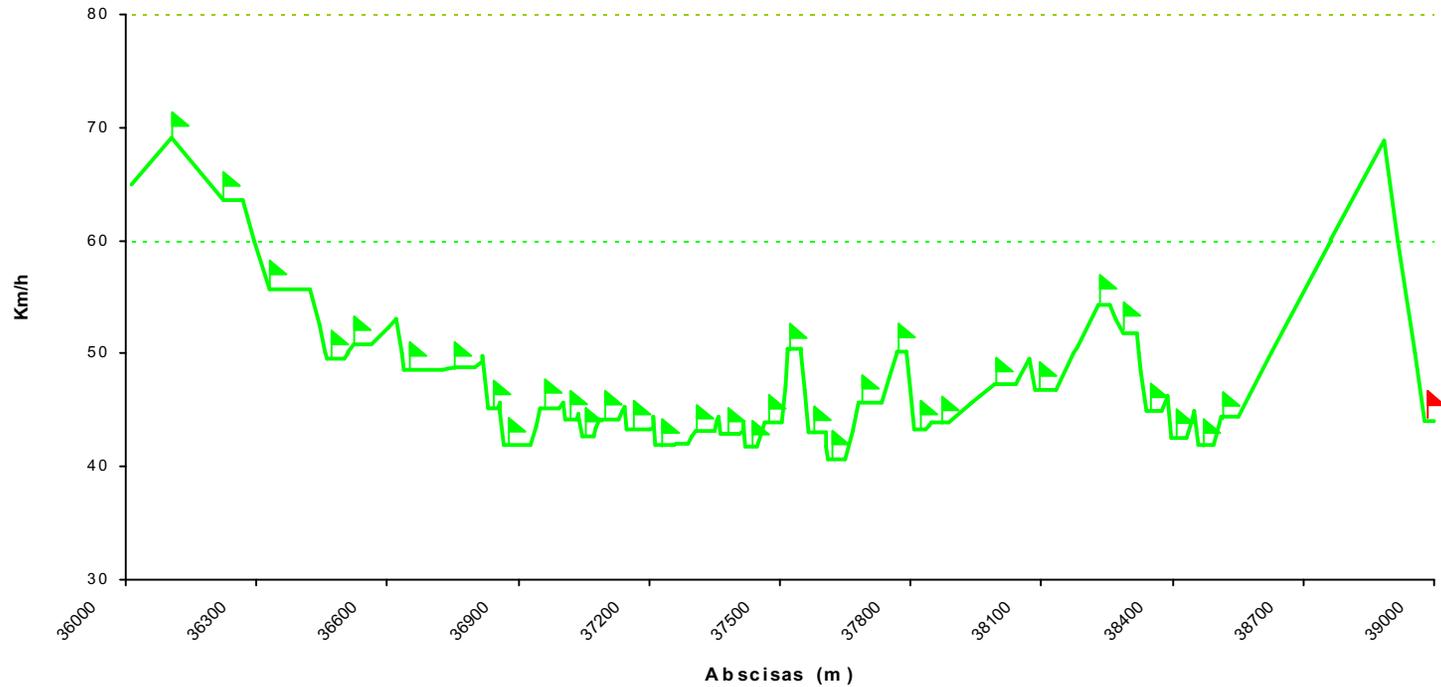
La Figura 70 muestra gráficamente los resultados en el sentido Mojarras - Piedra Sentada, lo que permitió establecer las siguientes conclusiones:

1. Las banderas verdes colocadas sobre el perfil de velocidades indican que no hay variación brusca de velocidad entre elementos consecutivos, por tanto este aspecto no es crítico y el trazado puede considerarse como consistente.
2. Sólo se presenta una bandera roja, y coincide con el punto detectado por IHSDM al final del trazado
3. Se puede observar que en el sector comprendido entre la abscisa 36500 y 38500, la velocidad fluctúa entre 42 y 50 km/h, debido a los radios menores de 75 m que componen el trazado; IHSDM asume para este tramo un valor mínimo de 60 km/h
4. El perfil de velocidades es de color verde, lo que indica que el V_{85} difiere en menos de 10 km/h de la velocidad de diseño, o que los vehículos circulan a velocidades menores a las que rigen los parámetros geométricos de la carretera
5. En el tramo no se alcanza la velocidad deseada en las rectas; en la evaluación con IHSDM se alcanza y mantiene en las rectas localizadas en el K36+011.65 y K38+549.76

El perfil de velocidades generado con las ecuaciones de predicción desarrolladas en esta investigación muestra de una manera gráfica que las diferencias en la evaluación de la consistencia son grandes si se utilizan las ecuaciones de predicción de IHSDM en la evaluación de la consistencia en las carreteras colombianas.

El desarrollo de la evaluación se muestra en el Anexo 3.

Figura 70 Perfil de V_{85} generado por el modelo desarrollado en esta investigación



- Velocidad deseada en km/h
- ⋯ Velocidad de diseño en km/h
- ▲ Velocidad V_{85} ; km/h; diferencial entre la velocidad de diseño y $V_{85} \leq 10$ km/h
- ▲ Velocidad V_{85} ; km/h; diferencial entre la velocidad de diseño y $V_{85} > 10$ km/h , ≤ 20 km/h
- ▲ Velocidad V_{85} ; km/h; diferencial entre la velocidad de diseño y $V_{85} > 20$ km/h
- ▲ Criterio 2; diferencial de velocidad entre el elementos horizontales adyacentes ≤ 10 km/h
- ▲ Criterio 2; diferencial de velocidad entre elementos horizontales adyacentes > 10 km/h , ≤ 20 km/h
- ▲ Criterio 2; diferencial de velocidad entre elementos horizontales adyacentes > 20 km/h

Fuente: *Elaboración propia*

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

A continuación se presenta los resultados obtenidos en la investigación:

Validación de las ecuaciones de predicción de V_{85} del modelo IHSDM

- *Ecuaciones de predicción para curvas horizontales en pendientes entre 0 y 4%:* las V_{85} obtenidas con las ecuaciones de Lamm y Voigt no presentaron diferencias significativas con las V_{85} de campo empleando un nivel de confianza del 95% y su error medio en la predicción fué del 5.33 y 6.53% respectivamente.
- *Ecuaciones de predicción para curvas horizontales en pendientes entre 4 y 9%:* las V_{85} obtenidas con los modelos de IHSDM tienen diferencias significativas con las de campo empleando un nivel de confianza del 95%.
- *Ecuaciones de predicción para curvas horizontales en pendientes entre -9 y -4%:* las V_{85} obtenidas con las ecuaciones de Lamm y Voigt no presentaron diferencias significativas con las V_{85} de campo para radios de curvatura mayores a 50 m empleando un nivel de confianza del 95%.
- La velocidad de operación en curvas con radios mayores de 500 m se acerca a la velocidad en la recta precedente donde la predicción de las V_{85} en este tipo de curvas solo depende del efecto de la pendiente.

Planteamiento de las ecuaciones de predicción de V_{85}

- La variable independiente más significativa para predecir V_{85} en curvas horizontales fué el radio de curvatura y su presentación en las ecuaciones de regresión es "R".

- En pendientes entre 4 y 9% y -9 y -4% la curva precedente influye en la V_{85} de la curva de interés, ésto se debe a que los trazados en éste tipo de pendientes se caracterizan por tener entretangencias pequeñas y curvas sucesivas.
- Se evidenció que en el 50% de las curvas horizontales en pendientes entre 0 y 4% las V_{85} de campo son mayores que la velocidad de diseño, esto puede obedecer a las buenas condiciones de la superficie de la carretera y al estado del tiempo en el momento de registrar la información.
- En promedio los cambios de V_{85} en cada punto de la curva con respecto al V_{85} en la tangente precedente fue la siguiente:

Pendiente 0 y 4%	PC = 0.96 V_{85}	PM= 0.89 V_{85}	PT=0.91 V_{85}
Pendiente 4 y 9%	PC= 0.98 V_{85}	PM= 0.95 V_{85}	PT=0.95 V_{85}
Pendiente -9 y -4%	PC= 0.97 V_{85}	PM=0.93 V_{85}	PT=0.93 V_{85}

- Se determinó que las V_{85} de campo obtenidas en pendientes entre 4 y 9%, y -9 y -4% no tienen diferencias significativas para radios de curvatura menores de 100 m; en radios mayores de 100 m las V_{85} de campo para pendientes entre -9 y -4% son mayores que las V_{85} de campo para pendientes entre 4 y 9%.
- El mejor modelo de predicción de V_{85} para pendientes entre 4 y 9% tiene una correlación R^2 de 0.55 y considera el radio de la curva de interés y el radio de la curva precedente; Su empleo se limita a radios comprendidos entre 20 y 225m (rango empleado para su desarrollo), tiene la siguiente expresión:

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

- El mejor modelo de predicción de V_{85} para pendientes entre -9 y -4% tiene una correlación R^2 de 0.73 y considera el radio de la curva de interés y el radio de la curva precedente; Su empleo se limita a radios comprendidos entre 20 y 225m (rango empleado para su desarrollo), tiene la siguiente expresión:

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

- Se determinó que las 2 ecuaciones anteriores no tienen diferencias significativas en la predicción de V_{85} con radios menores de 100 m; Las ecuaciones de predicción presentaron los siguientes valores:

pendientes entre 4 y 9% : $\chi^2_{\text{calculado}} = 19.52 < \chi^2_{\text{crítico}} = 31.41$

pendientes entre -9 y -4%: $\chi^2_{\text{calculado}} = 16.57 < \chi^2_{\text{crítico}} = 31.41$

- Se determinó que la velocidad deseada se encuentra en el intervalo entre 92.85 y 99.69 km/h empleando el 95% de confianza, y su valor medio corresponde a 96.27 km/h.

Validación de las ecuaciones de predicción de aceleraciones del modelo

IHSDM

- *Ecuaciones de predicción de aceleraciones:* el rango de radios de curvatura comprendido entre 250 y 436 m no presenta diferencias significativas con las aceleraciones de campo empleando un nivel de confianza del 95%. Los demás rangos no se pueden evaluar porque el número de radios disponibles para la evaluación no es representativo.
- *Ecuaciones de predicción de deceleraciones:* el rango de radios de curvatura comprendido entre 175 y 436m, y radios menores de 175m no

presentan diferencias significativas con las aceleraciones de campo empleando un nivel de confianza del 95%. Los demás rangos no se pueden evaluar porque el número de radios disponibles para la evaluación no es representativo.

Planteamiento de las ecuaciones de predicción de aceleraciones del modelo IHSDM

- El punto donde los conductores aceleran o deceleran varía a lo largo de la curva, por esta razón se emplea las tasas máximas de aceleración en el desarrollo de los modelos.
- No se determina un comportamiento bien definido de los conductores cuando maniobran sus vehículos en las curvas horizontales en pendientes entre 0 y 4% y 4 y 9%, ésto se ve reflejado en las correlaciones obtenidas por los mejores modelos de predicción para estas condiciones de pendiente.
- Los modelos propuestos para la predicción de las aceleraciones emplean como variable independiente el radio de curvatura en la forma $1/R$ porque esta variable tiene la mejor relación funcional en la predicción de aceleraciones.
- Las menores diferencias entre las aceleraciones pronosticadas y las aceleraciones campo se obtuvieron con los modelos de predicción que considera cada tipo de pendiente.
- El perfil de velocidades generado con las ecuaciones de predicción desarrolladas en esta investigación muestra de una manera gráfica que las diferencias en la evaluación de la consistencia son grandes si se utilizan las ecuaciones de predicción de IHSDM en la evaluación de la consistencia en las carreteras colombianas.

CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones se desarrollan con base en los resultados de la investigación:

- No es recomendable emplear las ecuaciones de IHSDM y las ecuaciones planteadas por los investigadores internacionales para la predicción de V_{85} en carreteras colombianas porque los valores de predicción presentan diferencias significativas con los encontrados en campo.
- Se puede emplear la ecuación de Lamm para la predicción de V_{85} en curvas horizontales con radios hasta 678 m sobre pendientes entre 0 y 4% en carreteras colombianas, su expresión es la siguiente:

$$V_{85} = 94.398 - 3188.656 / R$$

- La predicción de V_{85} en curvas horizontales con radios de curvatura entre 20 y 225 m sobre pendientes entre 4 y 9% en carreteras colombianas se puede hacer empleando la ecuación planteada en ésta investigación, su expresión es la siguiente:

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

- La predicción de V_{85} en curvas horizontales con radios de curvatura entre 20 y 225 m sobre pendientes entre -9 y -4% en carreteras colombianas se puede hacer empleando la ecuación planteada en ésta investigación, su expresión es la siguiente:

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

- La predicción de aceleraciones se puede realizar empleando los modelos planteados en esta investigación para los rangos de radio de curvatura recomendados, las siguientes son sus expresiones:

PENDIENTE	RADIO (m)	MODELO
Entre -9 y -4%	Entre 20 y 225	$a = 19.04 / R + 0.13$
Entre 4 y 9%	Entre 20 y 225	$a = 8.83 / R + 0.15$
Entre 0 y 4%	Entre 145 y 550	$a = 15.67 / R + 0.13$
Entre -9 y -4%	Entre 20 y 225	$d = -33.99 / R - 0.10$
Entre 4 y 9%	Entre 20 y 225	$d = -33.55 / R - 0.11$
Entre 0 y 4%	Entre 145 y 550	$d = -56.99 / R - 0.11$

- Se determinó el V_{85} para la velocidad deseada en carreteras colombianas se encuentra en el intervalo entre 92.85 y 99.69 km/h, y se puede redondear en 95 km/h.
- Las ecuaciones validadas y desarrolladas en ésta investigación se pueden emplear para generar perfiles de velocidad para evaluar la consistencia del diseño geométrico en carreteras colombianas.
- Las V_{85} de campo registradas en curvas sobre pendientes entre 4 y 9% y -9 y -4% no presentan diferencias significativas en radios menores de 100 m.
- La evaluación de la consistencia del diseño geométrico de carreteras empleando el perfil de velocidades de operación es una herramienta importante que permite detectar los sitios con alto potencial de accidentalidad generados por algunas combinaciones de elementos geométricos que producen grandes reducciones de velocidad. Su aplicación puede hacerse desde la planificación y diseño de proyectos viales, permitiendo evaluar diferentes alternativas, hasta vías ya construidas donde se puede prevenir la accidentalidad mediante la intervención de los sitios detectados en la evaluación.

RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones se plantean con base en los resultados y conclusiones de ésta investigación:

- No se debe emplear los modelos para la predicción de V_{85} y aceleraciones fuera del rango recomendado porque el valor de la predicción puede ser errónea al llevarse el modelo más allá de los valores empleados para su desarrollo.
- Es necesario realizar un estudio para evaluar las V_{85} en rectas empleando diferentes longitudes y pendientes con el propósito de evaluar algunas suposiciones hechas en el modelo de perfil de velocidades.
- Los modelos de aceleración y deceleración desarrollados en esta investigación se pueden emplear únicamente en curvas horizontales, por tal razón es recomendable realizar un estudio para establecer el impacto de la aceleración y deceleración en curvas verticales y combinaciones de curva vertical y horizontal.
- Se debe realizar un estudio para validar o desarrollar las ecuaciones de predicción para curvas horizontales en pendiente entre 0 y -4%, curvas verticales y la combinación de curvas verticales y horizontales con el propósito de complementar las ecuaciones desarrolladas en esta fase de la investigación.
- Es necesario registrar V_{85} en radios de curvatura hasta 1000 con el propósito de complementar las ecuaciones desarrolladas y no tener limitantes en su empleo.

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

A continuación se presenta los resultados obtenidos en la investigación:

Validación de las ecuaciones de predicción de V_{85} del modelo IHSDM

- *Ecuaciones de predicción para curvas horizontales en pendientes entre 0 y 4%:* Las V_{85} obtenidas con las ecuaciones de Lamm y Voigt no presentaron diferencias significativas con las V_{85} de campo empleando un nivel de confianza del 95% y su error medio en la predicción fue del 5.33 y 6.53% respectivamente.
- *Ecuaciones de predicción para curvas horizontales en pendientes entre 4 y 9%:* Las V_{85} obtenidas con los modelos de IHSDM tienen diferencias significativas con las de campo empleando un nivel de confianza del 95%.
- *Ecuaciones de predicción para curvas horizontales en pendientes entre -9 y -4%:* Las V_{85} obtenidas con las ecuaciones de Lamm y Voigt no presentaron diferencias significativas con las V_{85} de campo para radios de curvatura mayores a 50 m, empleando un nivel de confianza del 95% y un error medio en la predicción de 13.65 y 12.60% respectivamente.
- La velocidad de operación en curvas con radios mayores amplios (>500 m) se acerca a la velocidad en la recta precedente y la predicción de las V_{85} en este tipo de curvas solo depende del efecto de la pendiente.

Planteamiento de las ecuaciones de predicción de V_{85}

- La variable independiente más significativa para predecir V_{85} en curvas horizontales fue el radio de curvatura y su presentación en las ecuaciones de regresión es "R".
- En pendientes entre 4 y 9% y -9 y -4% la curva precedente influye en la V_{85} de la curva de interés, esto se debe a que los trazados en éste tipo

de pendientes se caracterizan por tener entretangencias pequeñas y curvas sucesivas.

- Se evidenció que en el 50% de las curvas horizontales en pendientes entre 0 y 4% que las V_{85} de campo son mayores que la velocidad de diseño, esto puede obedecer a las buenas condiciones de la superficie de la carretera y al estado del tiempo en el momento de registrar la información.
- En promedio los cambios de V_{85} en cada punto de la curva con respecto al V_{85} en la tangente precedente fue la siguiente:

Pendiente 0 y 4%	PC = 0.96 V_{85}	PM= 0.89 V_{85}	PT=0.91 V_{85}
Pendiente 4 y 9%	PC= 0.98 V_{85}	PM= 0.95 V_{85}	PT=0.95 V_{85}
Pendiente -9 y -4%	PC= 0.97 V_{85}	PM=0.93 V_{85}	PT=0.93 V_{85}

- Se determinó que las V_{85} de campo obtenidas en pendientes entre 4 y 9%, y -9 y -4% no tienen diferencias significativas para radios de curvatura menores de 100 m; en radios mayores de 100 m las V_{85} de campo para pendientes entre -9 y -4% son mayores que las V_{85} de campo para pendientes entre 4 y 9%.
- El mejor modelo de predicción de V_{85} para pendientes entre 4 y 9% tiene una correlación R^2 de 0.55 y considera el radio de la curva de interés y el radio de la curva precedente; Su empleo se limita a radios comprendidos entre 20 y 225m (rango empleado para su desarrollo), tiene la siguiente expresión:

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

- El mejor modelo de predicción de V_{85} para pendientes entre -9 y -4% tiene una correlación R^2 de 0.73 y considera el radio de la curva de interés y el radio de la curva precedente; Su empleo se limita a radios comprendidos entre 20 y 225m (rango empleado para su desarrollo), tiene la siguiente expresión:

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

- Se determinó que las 2 ecuaciones anteriores no tienen diferencias significativas en la predicción de V_{85} con radios menores de 100 m; La ecuación de predicción en pendientes entre 4 y 9% presentó los siguientes resultados al comparar las V_{85} pronosticadas por el modelo con las V_{85} de campo para pendientes entre -9 y -4% ($\chi^2_{\text{calculado}} = 19.52 < \chi^2_{\text{crítico}} = 31.41$), y la ecuación de predicción para pendientes entre -9 y -4% presentó los siguientes resultados al comparar las V_{85} pronosticadas por el modelo con las V_{85} de campo para pendientes entre 4 y 9% ($\chi^2_{\text{calculado}} = 16.57 < \chi^2_{\text{crítico}} = 31.41$).
- Se determinó que la velocidad deseada se encuentra en el intervalo entre 92.85 y 99.69 km/h empleando el 95% de confianza, y su valor medio corresponde a 96.27 km/h.

Validación de las ecuaciones de predicción de aceleraciones del modelo IHSDM

- *Ecuaciones de predicción de aceleraciones:* el rango de radios de curvatura comprendido entre 250 y 436 m no presenta diferencias significativas con las aceleraciones de campo empleando un nivel de confianza del 95%. Los demás rangos no se pueden evaluar porque el número de radios disponibles para la evaluación no es representativo.
- *Ecuaciones de predicción de deceleraciones:* el rango de radios de curvatura comprendido entre 175 y 436m, y radios menores de 175m no presentan diferencias significativas con las aceleraciones de campo empleando un nivel de confianza del 95%. Los demás rangos no se pueden evaluar porque el numero de radios disponibles para la evaluación no es representativo.

Planteamiento de las ecuaciones de predicción de aceleraciones del modelo IHSDM

- El punto donde los conductores aceleran o deceleran varía a lo largo de la curva, por esta razón se emplean las tasas máximas de aceleración en el desarrollo de los modelos.
- No se determina un comportamiento bien definido de los conductores cuando maniobran sus vehículos en las curvas horizontales en pendientes entre 0 y 4% y 4 y 9%, esto se ve reflejado en las correlaciones obtenidas por los modelos de predicción para estas condiciones de pendiente.
- Los modelos propuestos para la predicción de las aceleraciones emplean como variable independiente el radio de curvatura en la forma $1/R$ porque esta variable tiene la mejor relación funcional en la predicción de aceleraciones.
- Las menores diferencias entre las aceleraciones pronosticadas y las aceleraciones campo se obtuvieron con los modelos de predicción que considera cada tipo de pendiente.
- El perfil de velocidades generado con las ecuaciones de predicción desarrolladas en esta investigación muestra de una manera gráfica que las diferencias en la evaluación de la consistencia son grandes si se utilizan las ecuaciones de predicción de IHSDM en la evaluación de la consistencia en las carreteras colombianas.
- Para radios de curvatura menores de 50 m el programa IHSDM asume una V_{85} de 60 Km/h.
- Algunas de las razones por las que se presentan diferencias entre las V_{85} obtenidas mediante las ecuaciones de IHSDM y las registradas en las carreteras colombianas pueden ser las siguientes:
 1. Cultura en el manejo de los vehículos
 2. Condiciones Topográficas
 3. Condiciones del entorno a lo largo de la carretera

4. Condiciones de señalización
5. Variación en los límites de velocidad, entre otras.

CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones se desarrollan con base en los resultados de la investigación:

- No es recomendable emplear las ecuaciones de IHSDM y las ecuaciones planteadas por los investigadores internacionales para la predicción de V_{85} en carreteras colombianas porque los valores de predicción presentan diferencias significativas con los encontrados en campo.
- Se puede emplear la ecuación de Lamm para la predicción de V_{85} en curvas horizontales con radios hasta 678 m sobre pendientes entre 0 y 4% en carreteras colombianas, su expresión es la siguiente:

$$V_{85} = 94.398 - 3188.656 / R$$

- La predicción de V_{85} en curvas horizontales con radios de curvatura entre 20 y 225 m sobre pendientes entre 4 y 9% en carreteras colombianas se puede hacer empleando la ecuación planteada en ésta investigación, su expresión es la siguiente:

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

- La predicción de V_{85} en curvas horizontales con radios de curvatura entre 20 y 225 m sobre pendientes entre -9 y -4% en carreteras colombianas se puede hacer empleando la ecuación planteada en ésta investigación, su expresión es la siguiente:

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

- La predicción de aceleraciones se puede realizar empleando los modelos planteados en esta investigación para los rangos de radio de curvatura recomendados, las siguientes son sus expresiones:

PENDIENTE	RADIO (m)	MODELO
Entre -9 y -4%	Entre 20 y 225	$a = 19.04 / R + 0.13$
Entre 4 y 9%	Entre 20 y 225	$a = 8.83 / R + 0.15$
Entre 0 y 4%	Entre 145 y 550	$a = 15.67 / R + 0.13$
Entre -9 y -4%	Entre 20 y 225	$d = -33.99 / R - 0.10$
Entre 4 y 9%	Entre 20 y 225	$d = -33.55 / R - 0.11$
Entre 0 y 4%	Entre 145 y 550	$d = -56.99 / R - 0.11$

- Se determinó el V_{85} para la velocidad deseada en carreteras colombianas se encuentra en el intervalo entre 92.85 y 99.69 km/h, y se puede redondear en 95 km/h.
- Las ecuaciones validadas y desarrolladas en ésta investigación se pueden emplear para generar perfiles de velocidad para evaluar la consistencia del diseño geométrico en carreteras colombianas.
- Las V_{85} de campo registradas en curvas sobre pendientes entre 4 y 9% y -9 y -4% no presentan diferencias significativas en radios menores de 100 m.
- La evaluación de la consistencia del diseño geométrico de carreteras empleando el perfil de velocidades de operación es una herramienta importante que permite detectar los sitios con alto potencial de accidentalidad generados por algunas combinaciones de elementos geométricos que producen grandes reducciones de velocidad. Su aplicación puede hacerse desde la planificación y diseño de proyectos viales, permitiendo evaluar diferentes alternativas, hasta vías ya construidas donde se puede prevenir la accidentalidad mediante la intervención de los sitios señalados en la evaluación.

RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones se plantean con base en los resultados y conclusiones de ésta investigación:

- No se debe emplear los modelos para la predicción de V_{85} y aceleraciones fuera del rango recomendado porque el valor de la predicción puede ser errónea al llevarse el modelo más allá de los valores empleados para su desarrollo.
- Es necesario realizar un estudio para evaluar las V_{85} en rectas empleando diferentes longitudes y pendientes con el propósito de evaluar algunas suposiciones hechas en el modelo de perfil de velocidades.
- Los modelos de aceleración y deceleración desarrollados en esta investigación se pueden emplear únicamente en curvas horizontales, por tal razón es recomendable realizar un estudio para establecer el impacto de la aceleración y deceleración en curvas verticales y combinaciones de curva vertical y horizontal.
- Se debe realizar un estudio para validar o desarrollar las ecuaciones de predicción para curvas horizontales en pendiente entre 0 y -4% , curvas verticales y la combinación de curvas verticales y horizontales con el propósito de complementar las ecuaciones desarrolladas en esta fase de la investigación.
- Es necesario registrar V_{85} en radios de curvatura hasta 1000 con el propósito de complementar las ecuaciones desarrolladas y no tener limitantes en su empleo.

BIBLIOGRAFÍA

1. UNIVERSIDAD DEL CAUCA. (2004). *Informe Final convenio INVIAS 315-2004 "Trenes Cañeros"*. Colombia.
2. FORENSIS DATOS PARA LA VIDA. (2003). *Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses; Fondo de Prevención Vial*. Santa fe de Bogotá. Colombia.
3. SÁNCHEZ, J.; CASTRO, M. (2003). *Procedimientos de evaluación de la consistencia del trazado de las carreteras: IHSDM*. España. Revista Rutas No 96.
4. A POLICY ON GEOMETRIC DESIGN OF HIGHWAYS AND STREETS. (2001). *American Association of State Highway and Transportation Officials*. USA.
5. GEOMETRIC DESIGN LABORATORY. (2001) *IHSDM Engineer's Manual*. Federal Highway Administration, Washington, D.C.
6. GEOMETRIC DESIGN LABORATORY. (2001) *User's Manual*. Federal Highway Administration, Washington, D.C.
7. FITZPATRICK, K.; ELEFTERIADOU, L.; HARWOOD, D.; M. COLLINS, J.; MCFADDEN, J.; ANDERSON, I.; KRAMMES, R.; IRIZARRY, N.; PARMA, K.; BAUER, K. AND PASSETTI, K. (2000). *Speed Prediction For Two-Lane Rural Highways*, USA: Federal Highway Administration, Report No. FHWA-99-171.
8. FITZPATRICK, K.; WOOLDRIDGE M.; TSIMHONI O.; M. COLLINS, J.; GREEN, P.; BAUER K.; PARMA, K.; KOPPA, R.; HARWOOD, D.; ANDERSON, I.; KRAMMES, R. AND POGGIOLI, B. (2000). *Alternative Design Consistency Rating Methods for Two-Lane Rural Highways*. USA: Federal Highway Administration, Report No. FHWA-99-172.

9. HARWOOD, D.; COUNCIL, F.; HAUER, F.; HUGHES, W. AND VOGT, A. (2000). *Prediction Of The Expected Safety Performance Of Rural Two-Lane Highways*, USA: Federal Highway Administration, Report No. FHWA RD-99-207.
10. MANUAL DE DISEÑO GEOMÉTRICO PARA CARRETERAS. (2000). *Ministerio del Transporte; Instituto Nacional de Vías*. Santa fe de Bogotá. Colombia.
11. TECHBRIEF, (1999). *Evaluation of Design Consistency Methods for Two-Lane Rural Highways*. USA.
12. CAL & MAYOR. (1998) *Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte*. Colombia.
13. UNIVERSIDAD DEL CAUCA. (1996) *Investigación sobre capacidad, niveles de servicio y mejoras de carreteras de dos carriles: Efecto de la curvatura en la velocidad (Terreno montañoso)*. Colombia.
14. PRIETO, G. (1994), *Efecto de la curvatura en la velocidad de los vehículos*. Colombia.