

INFLUENCIA DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS EN LA VELOCIDAD DE LOS VEHÍCULOS EN CARRETERA DOS CARRILES DE MONTAÑA. CASO DE ESTUDIO EN PAMPLONA - COLOMBIA

Edgar Pérez ¹, Emilio G. Moreno ², Angela Quintero ^{3*}

¹ Universidad de Pamplona, Colombia

² Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga, Colombia

³ Universidad de los Andes, Venezuela

*Autor para
correspondencia:
angelaqp76@gmail.com

RESUMEN

Se proponen modelos de velocidad media operativa y velocidad límite obtenidos en tramos rectos y curvos de una carretera dos carriles en Pamplona-Colombia. La velocidad es captada con radar y los parámetros geométricos son medidos con instrumentos topográficos de precisión. Destaca un trazado con elevada pendiente longitudinal, calzada estrecha e importante sinuosidad. Se analiza el comportamiento de la velocidad frente a variables tales como: radio de curva, longitud de recta anterior y posterior, visibilidad en la curva, ángulo de deflexión, pendiente anterior y posterior, y la tasa de cambio de curvatura. Aplicando regresión múltiple paso a paso y criterios de información se alcanzan modelos de predicción que luego son comparados con la velocidad media obtenida usando la metodología del *Manual de Capacidad Colombiano*, y con la velocidad límite generada por el *Interactive Highway Safety Design Model*. Los resultados determinan que los modelos propuestos son de conveniente uso para evaluación de la consistencia de velocidad en carreteras que están dentro de los parámetros geométricos o dominio especificado.

Palabras clave carretera dos carriles, geometría, velocidad media, velocidad límite, modelos.

ABSTRACT

The work proposes models that predict the average speed and limit speed according to geometric parameters on a two-lane road in Pamplona-Colombia. The data captured with radar over an alignment with high slope and narrow lane allow analyzing velocity using variables such as radius, super-elevation, straight before and after curve, visibility, deflection angle, longitudinal slope, and grades-per-kilometer index. Stepwise regression allows prediction models compared with the Colombian Capacity Manual and the Interactive Highway Safety Design Model. The results showed that the use of these models is convenient if geometric parameters are inside of specified dominion.

Keywords two-lane highway, road geometry, average velocity, limit velocity, models.

1. INTRODUCCIÓN

El parámetro más usado históricamente para caracterizar el desempeño y evaluar la seguridad de circulación del tránsito es la velocidad, ya que este parámetro tiene implicación directa en la

evaluación del desempeño de la infraestructura según un nivel de servicio y por accidentalidad, ambos aspectos influenciados muchas veces por un diseño geométrico deficiente, lo que en consecuencia motiva a revisar qué variables geométricas del trazado son más influyentes. La orografía colombiana, constituida esencialmente por cordilleras de gran amplitud y longitud, da lugar a carreteras dos carriles de difícil trazado, que experimentan baja velocidad, inapropiado nivel de servicio, elevado tiempo de viaje y accidentes. Aspectos que implican una geometría y condición ideal para realizar el estudio a profundidad de variables geométricas en un rango amplio. Estas carreteras fueron diseñadas siguiendo especificaciones geométricas antiguas, y quizá hoy día, no son compatibles con la tecnología de los vehículos modernos ni con las nuevas exigencias de servicio tales como: mayor rendimiento, confort y seguridad.

En consecuencia, el estudio se centra en proponer modelos de velocidad que involucren las variables geométricas más influyentes, que puedan predecir el comportamiento en carreteras de montaña en la situación de trazado descrita y en los umbrales de parámetros definidos en campo. Estos modelos podrían ser usados en estudios de la velocidad media operativa y velocidad límite; en un caso, para lograr diseños más funcionales en carreteras nuevas que se proyecten, y en el otro, para la evaluación de la consistencia de velocidad que permita medir el confort y delimitar los tramos o puntos críticos de accidentes. Los modelos se tratan de validar mediante la comparación de los resultados con otros modelos ampliamente usados tanto en la evaluación de capacidad como en la revisión de la consistencia de velocidad.

Los dos subtramos analizados, representan una variación de velocidad y geometría, disposición de radios pequeños en forma consecutiva, alta pendiente longitudinal, baja visibilidad e insuficientes rectas entre curvas que impiden el adelantamiento. La longitud del tramo general analizado es de 8 km, donde se realiza una exhaustiva caracterización geométrica mediante levantamiento topográfico para extraer cualquier parámetro. La medición de la velocidad operativa es ejecutada con radar en la sección media de cada elemento curva y recta, considerando una muestra de datos representativa en cada sentido de circulación. La velocidad media es ajustada mediante calibración previa del radar, luego es procesada para determinar la velocidad media operativa y la velocidad límite o percentil 85. Los registros de velocidad son organizados para cada elemento (curva y recta) asociando los parámetros geométricos del propio elemento y considerando la localización del resto de elementos en torno a la curva o recta analizada, con el fin de obtener modelos de predicción mediante regresión múltiple.

El artículo consta de cinco secciones y un apéndice; introducción, revisión bibliográfica, método, resultados y conclusiones. La revisión bibliográfica muestra el análisis de modelos internacionales obtenidos para la velocidad en recta y en curva, donde destacan distintas relaciones y parámetros geométricos. El método contiene la caracterización del tramo bajo estudio para definir el alcance de los modelos, se describe la captación de datos geométricos y de velocidad, la calibración de la velocidad con radar y el procesamiento de datos. Los resultados deducen los modelos, el análisis, discusión y validez de estos. El apéndice muestra los datos organizados para el ajuste de regresión y datos de ingreso al software *IHSDM* en la evaluación de consistencia de la velocidad.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Algunos modelos matemáticos y evaluación de parámetros más significativos en la predicción de la velocidad se han obtenido a nivel internacional; Lamm y Choueiri (1987) y Andueza (2000) formulan modelos que se basan en variables como el ancho de carril, radio de curva anterior y longitud de recta precedente a la curva analizada. Los autores parten de un análisis separado para alcanzar modelos tanto en curva como en recta asumiendo velocidad constante que demuestran un mayor ajuste en la curva. Otra investigación de Islam y Seneviratne (1994) basados en la teoría contraria de suponer velocidad inconstante a lo largo de la curva, establecen en consecuencia tres modelos; al inicio, en punto medio y al final de la curva. Nie y Hassan (2007) analizan el comportamiento para distinto percentil de velocidad 50, 85 y 95%. Bonneson y Pratt (2009) consideran los vehículos pesados en modelos de velocidad media y percentil 85, con distribución balanceada de livianos y pesados. Fitzpatrick et al. (2000) y Polus et al. (2000), observaron como variable más crítica la longitud de la recta, y determinan que otras variables tienen cierta influencia, entre ellas, la curva antes y después de la recta, el ancho de carretera y las pendientes.

Jessen et al. (2001) obtuvieron modelos para recta relacionando otras velocidades, no solo para el percentil 85, incluyen los percentiles 50 y 90%. Crisman et al. (2005) parten de la hipótesis que las variables más influyentes en la velocidad de operación en recta son su longitud y la velocidad en curva precedente, deducen, que si se conocen estos elementos geométricos se puede determinar el comportamiento de la velocidad en el tramo. Según Pérez et al. (2011) la mayoría de los modelos se han desarrollado para estimar la velocidad en curva considerando que la velocidad de operación es constante a lo largo de la misma, tomándose el punto medio como sección idónea de registro. Aun cuando se ha demostrado que esto es incierto, según la estadística, esta diferencia no resulta relevante en los estudios de tránsito. Estimando esta última consideración, la metodología se centra en una captación de datos más simple que permita la mayor cobertura de los distintos subtramos en el tiempo disponible. La incorporación de un nuevo estudio que considere otros parámetros de influencia a los ya conocidos y los casos específicos puede ser importante, según se ve, las distintas predicciones y parámetros estimados pueden variar, lo que motiva la exploración de nuevas variables en tramos forzados en montaña que resulta ideal para la predicción de velocidades que son útiles en el mejoramiento del diseño y evaluación de la consistencia de la velocidad que garantice seguridad en carreteras de este tipo. Según estudios de Sánchez (2011) y Chiquitó (2014) algunos modelos para estimación de la velocidad de operación son expresiones sencillas y con alto grado de correlación. Caicedo (2018) usa técnicas estadísticas y aplica los criterios de Lamm, como métodos fundamentados en la velocidad límite.

3. MÉTODO

El tramo general de carretera objeto de estudio cruza la ciudad de Pamplona, una ciudad de tamaño pequeño, que se encuentra enclavada en la Cordillera Andina de Colombia. El asentamiento o trama urbana de ciudad ha ido expandiéndose lentamente y logra particionar el tramo en dos subtramos de características geométricas similares; ambos subtramos están delimitados principalmente por su longitud y son identificados como los subtramos Cúcuta-Pamplona y Pamplona-Bucaramanga de acuerdo con las poblaciones que conecta. Los subtramos analizados son mostrados en la Figura 1, donde se evidencia una situación de trazado difícil de carretera dos carriles insertada en terreno

montañoso con multiplicidad de curvas y rectas de corta longitud, un diseño que, en principio, fue concebido para adaptarse suficientemente a las curvas de nivel por razones de economía.



Figura 1 Tramo general Cúcuta-Pamplona-Bucaramanga

3.1 Caracterización del tramo general

Para entender con facilidad cuál es el ámbito de aplicación de los resultados alcanzados, es necesario describir el tipo de carretera objeto de estudio; el subtramo Cúcuta-Pamplona tiene aproximadamente 4 km de longitud donde el sentido ascendente se muestra como el más crítico, representa un trazado constituido por 13 curvas y 22 rectas en su conjunto. La gran sinuosidad del alineamiento provocado por la poca longitud de recta entre curvas hace que las maniobras de adelantamiento sean casi nulas, o bien, se den de manera forzada e inclusive dentro de la curva. Se determina la presencia de ángulos de deflexión con valores altos y variables lo que define un alto grado de curvatura que lógicamente representa una mayor adaptabilidad de la carretera a la curva de nivel.

En consecuencia, el recorrido experimenta elevada carencia de zonas para adelantamiento y pocos tramos con visibilidad suficiente para realizar maniobras en forma segura, lo que genera colas indeseables generalmente por presencia de vehículos lentos. En general, se observa que la demora no solo obedece a una alta densidad vehicular y presencia de camiones, sino a un alineamiento muy restrictivo con curvas consecutivas sin sobrancho suficiente, aspectos que, sumados a la carencia de rectas, dificultan una circulación libre y mejor desempeño.

El subtramo Pamplona-Bucaramanga tiene una longitud de 5 km, de los cuales, por analogía al subtramo anterior, se consideran 4 km. Consta de una muestra representativa de 13 curvas y 26 rectas, presenta una situación levemente superior por su mayor número de rectas. En ambos subtramos, se define un trazado forzado de ancho de calzada insuficiente y carencia de sobrancho en curvas, un aspecto que ejerce mayor control de la velocidad. Aunque las rectas en algunos sectores de la carretera puedan tener más longitud, persiste una alta deficiencia de zonas de

adelantamiento por poca visibilidad. Aunado a esto, se tiene generalmente una transición del peralte deficiente por la cercanía de las curvas o insuficiente longitud de recta intermedia.

3.2 Captación de los parámetros geométricos (dominio)

Una vez seleccionado el sitio idóneo de estudio, siguiendo los criterios esenciales de análisis de tramos forzados de carretera en montaña, donde se prevén condiciones de alta sinuosidad y gran estrechez de calzada en curvas, se realiza un levantamiento topográfico del alineamiento horizontal y vertical, para lo cual se emplea Estación total *Stonex RI Plus*, un equipamiento de medición que permite hasta 5 s de precisión angular y cálculo de la distancia hasta 300 m en modo directo y 3000 m utilizando prisma simple.

A través del levantamiento topográfico se obtienen los parámetros geométricos a analizar y que describen el trazado de la carretera con suficiente exactitud, variables que luego serán asociadas a los datos de velocidad obtenidos con radar, una medición programada en secciones medias de cada elemento (curva y recta). Dentro de los parámetros considerados se encuentran: pendiente longitudinal, radio de curva, ángulo de deflexión, ancho de carril, longitud de recta, distancia de visibilidad en curva, peralte y tasa de cambio de curvatura (CCR, de sus siglas en inglés), considerado este último como el parámetro que mide el grado de sinuosidad del segmento que contiene a la curva o recta analizada. La CCR resulta de la sumatoria de los ángulos de deflexión dividido entre una distancia patrón de 1 km para estandarizar su cálculo. Los valores del radio de curva encontrados en el subtramo Cúcuta-Pamplona están entre los 26 y 350 m; y en el subtramo Pamplona-Bucaramanga van desde los 19 hasta los 475 m.

La Tabla 1 muestra el rango de variabilidad de cada parámetro geométrico medido, considerado este, el dominio bajo el cual, se pueden aplicar los resultados. Todas las variables se extraen de la información suministrada por el levantamiento topográfico de precisión aplicado en ambos subtramos.

Tabla 1 Parámetros geométricos obtenidos en ambos subtramos de carretera

Parámetro	Rango de variabilidad
Pendiente longitudinal, i (%)	2,6 – 7,9
Radio de curva, R_c (m)	19 – 475
Ángulo de deflexión, Δ (°)	2,6 – 121
Ancho de carril, a (m)	3,40 – 3,65
Longitud de recta, L (m)	1* – 287
Distancia de visibilidad medida, D_v (m)	20 – 100
Peralte, e (%)	1,6 – 12,8
Tasa de cambio de curvatura, CCR (°/km)	296 – 1422

* distancia mínima de recta entre curvas, asumida para facilitar el análisis donde no hay sub-tangente.

Es importante resaltar que la variable peralte, que corresponde al elemento curva, fue descartada por tener poca significación en el ajuste de regresión. La Figura 2 muestra el esquema de trazado en planta donde se describe la localización de los elementos geométricos que componen cada caso propuesto en torno a la curva o a la recta analizada, lo que permitirá una mejor interpretación posterior de los resultados y explicación detallada del método seguido en la consecución de cada

modelo de predicción explorado. En el caso del análisis de la velocidad en curva son considerados: radio anterior R_t , longitud anterior a la anterior L_t , radio anterior R_a , longitud anterior L_a y radio de la curva analizada R_c ; Y para el caso de análisis de velocidad en la recta se estiman: longitud anterior L_a , radio anterior R_a , longitud de recta analizada L , radio posterior R_p y longitud posterior L_p . Véase ambos casos de análisis con más detalle en la Figura 2.

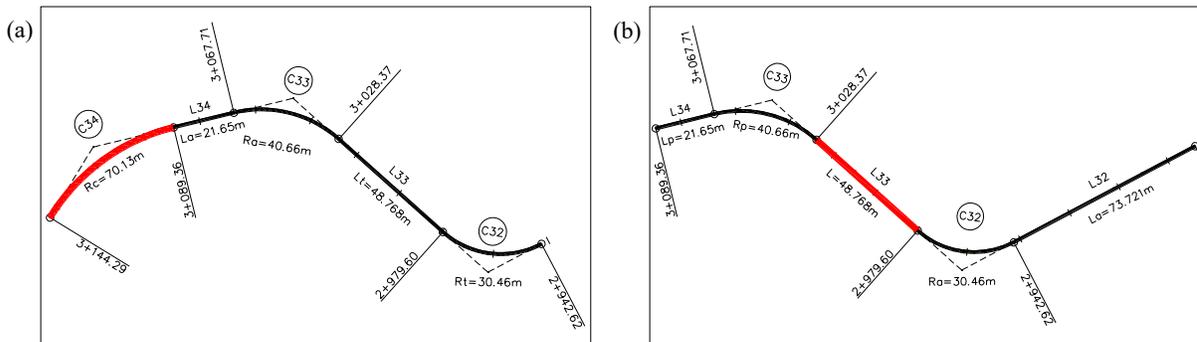


Figura 2 Casos de análisis del trazado: (a) en curva, (b) en recta

3.3 Muestreo de los datos de velocidad

En general, la cantidad de registros mínimos de los datos de velocidad pueden ser obtenidos según la Ecuación 1, esta constituye una expresión ampliamente aceptada para definir el tamaño de muestra representativa y es utilizada en diversos estudios de tránsito.

$$n = [(k \times s)/e]^2 \quad (1)$$

La toma de datos se llevó a cabo en 2017, en periodo aproximado de 3 meses (agosto, septiembre y noviembre) durante el día para abarcar los segmentos estudiados. Los volúmenes de tránsito en promedio de horas de máxima demanda fueron de 417 veh/h en el subtramo Cúcuta-Pamplona y 291 veh/h en Pamplona-Bucaramanga. Reyes y Cárdenas (2018) detallan los procesos estadísticos previos para tener aforos de velocidad representativos y la muestra supera la muestra mínima recomendada de 30 observaciones (Chiquitó y Aroldo, 2014).

Dentro de los parámetros considerados para el cálculo del tamaño de muestra n , se propone un estadístico emanado de la distribución normal $k = 1,96$ que considera un nivel de confianza del 95%, generalmente usado. La desviación estándar como valor empírico en el caso de velocidades puntuales para cualquier tipo de carretera y tránsito es estimado $s = 8$ km/h, y un error $e = 1,6$ km/h puede ser admitido. Estos parámetros estadísticos sustituidos en la Ecuación 1 permiten determinar el tamaño mínimo de muestra que se requiere, en este caso, el muestreo resultó de 96 registros. Sin embargo, un valor superior de 100 registros de velocidad fue utilizado como valor mínimo de muestra en las secciones de aforo programadas para los datos de velocidad.

3.4 Calibración previa del radar y ajuste de la velocidad medida

La metodología seguida para captación de la velocidad media considera la segmentación planteada en la Figura 2, tanto para el elemento curva y recta analizada, y haciendo uso del radar para una captación más expedita y masiva. Los datos de velocidad obtenidos con radar deben ser comparados con datos reales para evitar posibles errores sistemáticos en distintos sitios de prueba, y provienen como ya se dijo, de medidas realizadas en las secciones medias de cada elemento geométrico (dígase curva o recta). En consecuencia, estas velocidades captadas con radar, como método más generalizado, deben ser ajustadas mediante correlación alcanzada o calibración previa (muestreo en distintos sitios) derivada de la comparación de datos de radar versus velocidades captadas en simultáneo aplicando la técnica de medición *tiempo-distancia*, un procedimiento que implica la fijación de una distancia base (entre 30 y 50 m) dependiendo de la velocidad de aproximación, y el uso de cronómetros para la medición del tiempo entre marcas que se realizan sobre el borde de carretera (Reyes y Cárdenas, 2018). Este proceso de calibración previa permite obtener una ecuación producto de mediciones realizadas en cinco sitios diferentes a lo largo de la carretera. Véase la tabla 2.

Tabla 2 Ecuaciones de calibración en distintos lugares de medición

Ecuación de calibración	Velocidad radar (X_i)	Elemento	Aumento	Aumento promedio
$V_1 = 0,705 + 1,048 X_1$	47,9	Recta	6%	8%
$V_2 = 7,63 + 0,883 X_2$	47,4			
$V_3 = 10 + 0,827 X_3$	47,2			
$V_4 = 5,23 + 1,027 X_4$	51,4	Curva	10%	
$V_5 = 7,50 + 0,894 X_5$	47,8			

* La prueba se realiza con velocidad media operativa en los segmentos de medición de 47 km/h

Según los resultados de la calibración se comprueba que la velocidad captada con radar V_{radar} resulta inferior a la obtenida con la técnica *tiempo-distancia*. La Ecuación 2 muestra los resultados sintetizados en una sola expresión para la estandarización del ajuste, donde la velocidad media ajustada V_{m-aj} , es concebida como promedio de las ecuaciones de calibración anteriores, un valor de velocidad más propicio para ser usado en los ajustes de regresión.

$$V_{m-aj} = 6,23 + 0,936 \times V_{radar} \quad (2)$$

Por otro parte, se realizan mediciones específicas adicionales de velocidad a la entrada de curva para estimación de la distancia de parada D_p , como más idóneo. El planteamiento en campo para la correcta captación de datos supone una toma de datos muy discreta para evitar que los conductores alteren su conducción e induzcan sesgo. Los datos se extraen exclusivamente de vehículos sin impedimentos adelante que incidan en su avance siguiendo lo especificado en las tomas de datos con radar y para evitar sobremanera el efecto de vehículos pesados.

3.5 Procesamiento y organización de los datos

Según lo explicado, los datos de velocidad media V_m utilizados se corresponderán a los valores de velocidad ajustada mediante la Ecuación 2. Estos valores de velocidad obtenidos luego son procesados estadísticamente para obtener la velocidad límite o percentil 85 denotada como V_{85} , en

cada elemento geométrico analizado. Las frecuencias absolutas, relativas, observadas y acumuladas son procesadas en hoja de cálculo para la determinación de la velocidad media y límite.

Para obtener los modelos de velocidad propuestos es necesario organizar los registros de las velocidades medias y percentil 85 junto a los parámetros geométricos asociados. El apéndice A detalla los resultados de este arreglo de datos que es usado en el ajuste de regresión paso a paso detallado más adelante. Los modelos de velocidad resultantes son contrastados con otros modelos ampliamente difundidos intentando demostrar una validación recíproca; un primer modelo a comparar corresponde a la velocidad media en subida obtenida aplicando el método del *Instituto Nacional de Vías en Colombia (INVIAS)*, un método de amplia difusión y uso en Colombia para evaluar capacidad, y la velocidad límite obtenida mediante el *Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM)* producido por la *AASHTO* y *Federal Highway World Administration (FHWA)*, modelo que define los perfiles de velocidad límite a lo largo del tramo carretero estimando su alineamiento horizontal y vertical. Véase las Tablas A.3 y A.4 en el apéndice, respectivamente.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos tras la aplicación de regresión múltiple paso a paso determinan los parámetros más significativos que contribuyen a la predicción de la velocidad media y velocidad límite. Asimismo, el método puede evaluar y descartar aquellos parámetros que no son significativos en los modelos de predicción en cada caso propuesto. Los parámetros que resultaron significativos pueden ser igualmente vistos en las tablas respectivas del Apéndice A.

4.1 Modelos de velocidad media y velocidad límite en curva

A manera de ejemplo, un resultado del ajuste de regresión paso a paso aplicado a los datos de velocidad media en curva se resume en la Tabla 3. Un proceso que es similar y es replicado al resto de casos de análisis para la obtención de los modelos de predicción de la velocidad media y velocidad límite previstos. El análisis estadístico es realizado con el software SPSS, evaluación que al inicio se plantea con once variables geométricas (véase la tabla A.1). No obstante, solo tres de esas variables resultan significativas, entre ellas: inverso del radio de curva $1/R_c$, distancia de visibilidad de parada calculada D_p y distancia de visibilidad medida en campo D_v .

El mejor modelo según el valor del Criterio de información de Akaike (AIC) ratifica el resultado del ajuste de regresión paso a paso inicial, criterio basado en el error cuadrado medio residual (MSE) con penalización que crece al aumentar el número de coeficientes. El modelo resulta aquel con error residual pequeño y el menor número de coeficientes posible, es decir, el de mínimo criterio de información. Igualmente, se aprecia el resultado del criterio de Hannan-Quinn (HQC) y bayesiano de Schwarz (SBIC). Así, el modelo de velocidad media en curva que representa el mejor ajuste se muestra en la Ecuación 3.

$$V_m = 39,97 - \frac{243,27}{R_c} + 0,076 \cdot D_p + 0,044 \cdot D_v \quad (3)$$

Tabla 3 Ajuste de regresión paso a paso para el modelo de velocidad media en curva y modelo con mejor criterio de información

Modelo	Variable ingresada	Variable eliminada	Método			
1	1/R _c	ninguna	Avanzar (Criterio: probabilidad F para entrar ≤ 0.05)			
2	D _p		Avanzar (Criterio: probabilidad F para entrar ≤ 0.05)			
3	D _v		Avanzar (Criterio: probabilidad F para entrar ≤ 0.05)			
Modelo	R	R ²	R ² ajustado	Error de estimación	Estadístico de cambio	
					en R ²	en F
1	0,82 ^a	0,67	0,67	2,904	0,67	96,32
2	0,85 ^b	0,73	0,72	2,679	0,06	9,23
3	0,87 ^c	0,75	0,75	2,583	0,03	4,48
MSE	Coeficientes		AIC	HQC	SBIC	Variables incluidas
6,29676	4		2,003	2,062	2,158	1/R _c ; D _p , D _v
6,20286	5		2,029	2,102	2,222	1/R _c ; Δ; D _v ; v

(a) un predictor: Constante y 1/R_c; (b) dos predictores: Constante, 1/R_c y D_p; (c) tres predictores: Constante, 1/R_c, D_p y D_v.

Análogamente, se realiza el análisis estadístico para obtener la velocidad límite V_{85} , el modelo obtenido sugiere como variables significativas en este caso al inverso del radio de curva $1/R_c$ y la relación v entre distancia de visibilidad y distancia de parada en cada curva. La distancia de visibilidad medida D_v y distancia de parada calculada D_p , visto su efecto aisladamente muestran menos aporte a la predicción según la Ecuación 4.

$$V_{85} = 56,88 - \frac{295,64}{R_c} - 16,61 \cdot v + 0,295 \cdot D_v - 0,075 \cdot D_p \quad (4)$$

4.2 Modelos de velocidad media y velocidad límite en recta

En el caso del elemento recta las variables más significativas se corresponden con la longitud de recta L ; longitud anterior a la recta L_a ; inverso del radio anterior a la recta $1/R_a$; longitud posterior a la recta L_p ; inverso del radio posterior a la recta $1/R_p$; y pendiente longitudinal anterior i_{ant} , véase este arreglo de los datos en la Tabla A.2 del apéndice. La velocidad media y velocidad límite en la recta, puede determinarse según las Ecuaciones 5 y 6, respectivamente.

$$V_m = 46,2 + 27,7 \cdot L + 6,2 \cdot L_a - \frac{106,95}{R_a} - 2,15 \cdot L_p - \frac{92,6}{R_p} - 0,125 \cdot i_{ant} \quad (5)$$

$$V_{85} = 51,4 + 39,7 \cdot L + 10,24 \cdot L_a - \frac{126,6}{R_a} - 1,66 \cdot L_p - \frac{102,8}{R_p} - 0,112 \cdot i_{ant} \quad (6)$$

4.3 Discusión y validez de los modelos

En la Tabla 4 se muestran los modelos alcanzados con sus respectivos niveles de predicción representados en R^2 . Asimismo, el coeficiente de correlación Pearson que mide la fuerza y dirección de asociación de dos variables cuantitativas aleatorias con distribución bivariada conjunta donde se busca comprobar que cada una por sí sola presenta distribución normal univariada. Los estadísticos de Pearson indican una asociación directa positiva; tanto para Pearson y Spearman los valores entre 0,6 y 0,8 determinan una buena correlación de la velocidad media en curva y velocidad límite en recta (ecuaciones 3 y 6), y correlación muy buena en el caso de velocidad límite en curva (ecuación 4) con valor entre 0,8 y 1, comparativamente.

Estos estadísticos permiten evaluar la buena proximidad de la velocidad media predicha y la velocidad media por el método *INVIAS*, al igual que, la velocidad límite predicha y la generada por el modelo *IHSDM*. Se observa que la correlación es significativa con nivel de 0,01 (bilateral) para los casos contrastados, usando una muestra de 33 registros de velocidad media en curva, y de 52 y 48 registros de velocidad límite en curva y recta, respectivamente. En cuanto al modelo de velocidad en recta (Ecuación 5), este no pudo ser contrastado, dado que no existe un modelo para rectas por el método *INVIAS* que pueda ser usado para este fin.

Tabla 4 Resumen de modelos de velocidad, nivel de predicción y estadísticos de validación

Modelo	R^2	Variables significativas	Comparación	Pearson	Rho Spearman
V_m en curva	0,75	$1/R_c, D_p, D_v$	<i>INVIAS</i> vs Ec.3	0,71	0,60
V_{85} en curva	0,78	$1/R_c, v, D_v, D_p$	<i>IHSDM</i> vs Ec.4	0,79	0,83
V_m en recta *	0,54	$L, L_a, 1/R_a, L_p, 1/R_p, i_{ant}$	No comparada	-----	-----
V_{85} en recta	0,62	$L, L_a, 1/R_a, L_p, 1/R_p, i_{ant}$	<i>IHSDM</i> vs Ec.6	0,72	0,76

(*) la velocidad media es analizada sólo para el caso de la curva considerando la metodología del *INVIAS*

Las Figuras 3 y 4 muestran los resultados comparativos de la velocidad media obtenida por el método *INVIAS* y velocidad media predicha por los modelos, velocidades que son evaluadas en ambos subtramos y suponen variables dependientes distintas. Los valores de velocidad predichos en curva resultan inferiores a los obtenidos con el método *INVIAS*, la tendencia es muy similar.

En cuanto al contraste de los modelos para el caso de la velocidad límite V_{85} , el perfil de velocidad generado por el software *IHSDM* proviene de los datos geométricos del trazado tanto horizontal como vertical. El perfil de velocidad de los modelos es dibujado aplicando las Ecuaciones 4 y 6 que supone el uso de las variables dependientes indicadas, respectivamente. Resultan más próximos ambos perfiles, si comparamos con el caso anterior de velocidad media.

La tendencia es análogamente similar a lo largo de cada subtramo de carretera. Se observa que la velocidad límite se aleja más en el caso de la recta y se aproxima más en las curvas. La variabilidad obedece a una secuencia de curvas y rectas estudiadas consecutivamente, donde el radio y variables geométricas más significativas son determinantes. Véase las Figuras 5 y 6.

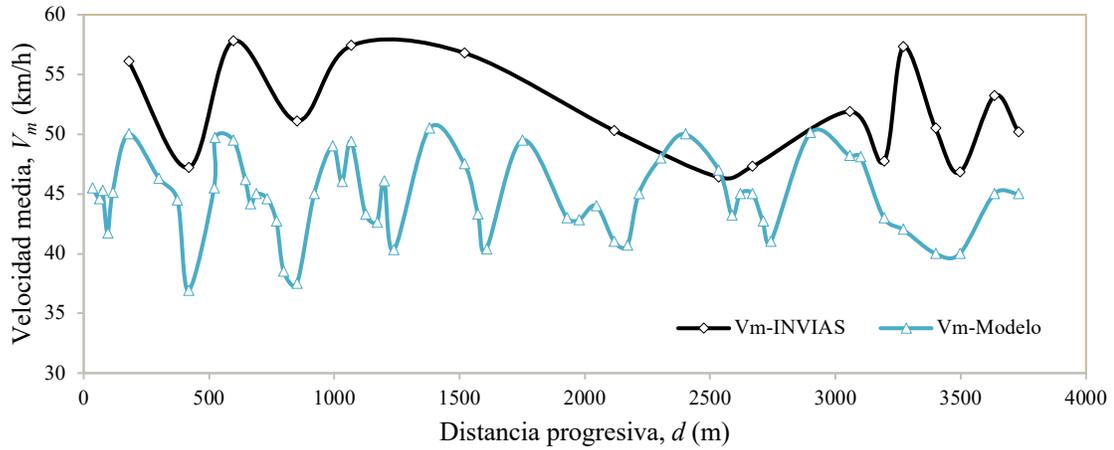


Figura 3 Comparación de la velocidad media en subida obtenida por el método *INVIAS* y velocidad aplicando el modelo de predicción en curva. Subtramo Cúcuta-Pamplona

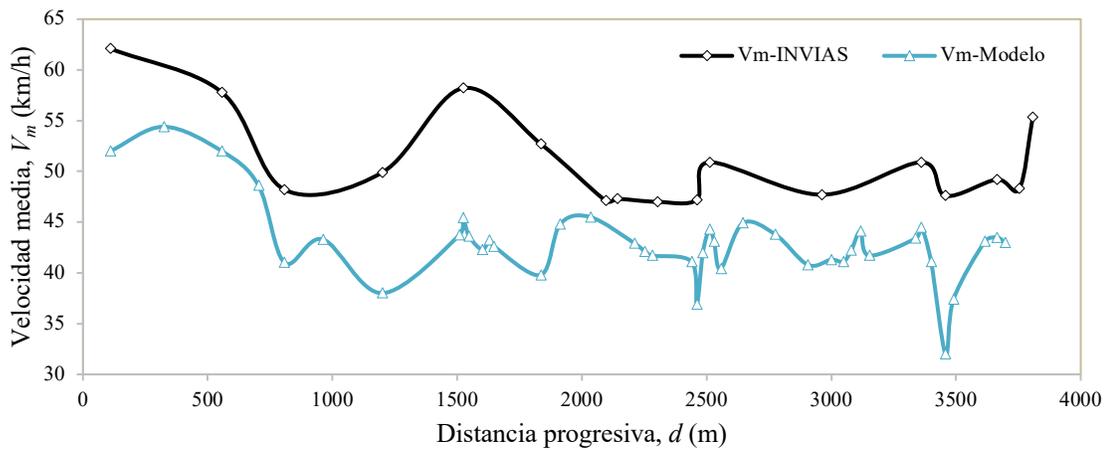


Figura 4 Comparación de la velocidad media en subida obtenida por el método *INVIAS* y velocidad aplicando el modelo de predicción en curva. Subtramo Pamplona-Bucaramanga

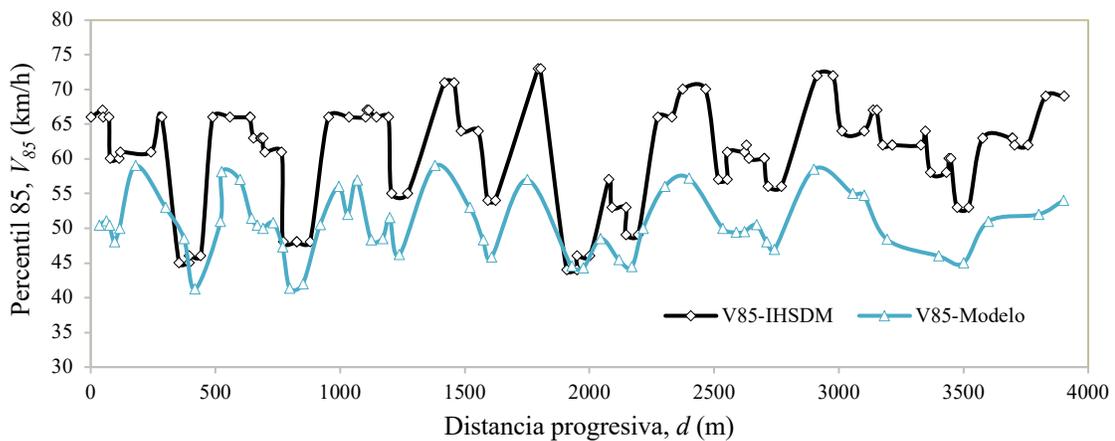


Figura 5 Perfil de velocidad límite según modelo *IHSDM* y velocidad aplicando modelos de predicción tanto en curva como en recta. Subtramo Cúcuta-Pamplona

El aspecto secuencial curva-recta en los perfiles de velocidad límite difiere del caso anterior, ya que la metodología del *INVIAS* solo supone la evaluación de la velocidad media en curva que es estudiada en el sentido en ascenso y considerando el radio más crítico como velocidad media del segmento de carretera analizado. Los valores de velocidad límite V_{85} por el *IHSDM* en cada punto analizado en segmento recto resultan por encima de los valores predichos por el modelo (Ecuación 6), lo que hace pensar que el *IHSDM* sobreestima la velocidad límite en el caso de rectas, y genera mayor cambio de velocidad entre el pase rectas a curvas, aun incorporado el efecto de la pendiente. En los segmentos en curva ocurre lo contrario, la velocidad límite *IHSDM* se ajusta mucho a la velocidad predicha, quizá el trazo en curva junto a la pendiente elevada ejerza mayor control de la velocidad y más convergencia.

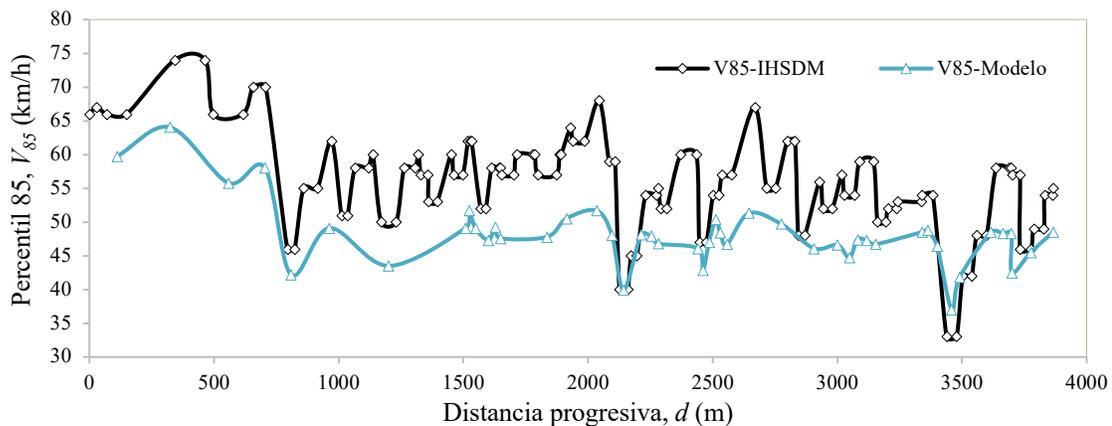


Figura 6 Perfil de velocidad límite según modelo *IHSDM* y velocidad aplicando modelos de predicción tanto en curva como en recta. Subtramo Pamplona-Bucaramanga

En consecuencia, los modelos de predicción encontrados resultan más adecuados para su aplicación en la evaluación integral de segmentos combinados (curva-recta), ya que representan perfiles más suaves sin cambios notables de velocidad entre recta y curva que se encuentran dentro del rango aceptable según el criterio II desarrollado por Lamm et al. (1999) basado en la comparación de velocidad entre elementos sucesivos curva-recta (Lamm et al., 2007). El resultado sobre este aspecto se muestra en la Figura 7.

Los modelos permiten una apropiada evaluación de la consistencia de velocidad y determinación de puntos críticos con mayor precisión en condiciones extremas cercanas al límite de los 20kph, umbral a partir del cual, la AASHTO soportada en el método de Lamm considera el trazado con pobre consistencia de velocidad. En suma, el uso de los modelos podría ser más eficiente al evitar actuaciones de mejoras innecesarias sobre la seguridad en carreteras de montaña y pone en evidencia tales recomendaciones, una situación inclusive más clara, cuando se evalúa el cambio de velocidad admisible (entre 10 y 20 kph) y los segmentos de carretera considerados con buena consistencia (entre 0 y 10 km).

Como perspectiva de investigaciones futuras y apoyados en los resultados, se sugiere seguir profundizando el estudio de ambos modelos (para recta y curva), quizá haciendo más énfasis en el caso de la recta donde existe mayor limitación de uso. El efecto de la composición del tránsito es

un elemento que fue descartado desde el inicio, y probablemente el omitir esa variable incida en la predicción en recta. En el caso de los segmentos en curva, aunque resultaron modelos de predicción con mayor poder explicativo, su limitación de uso puede quizá centrarse en el uso de variables complejas de medir en campo e impresiones al no disponer de un método de captación preciso. Esto puede particularmente representar un aspecto clave en la medición de la distancia de visibilidad, por ejemplo.

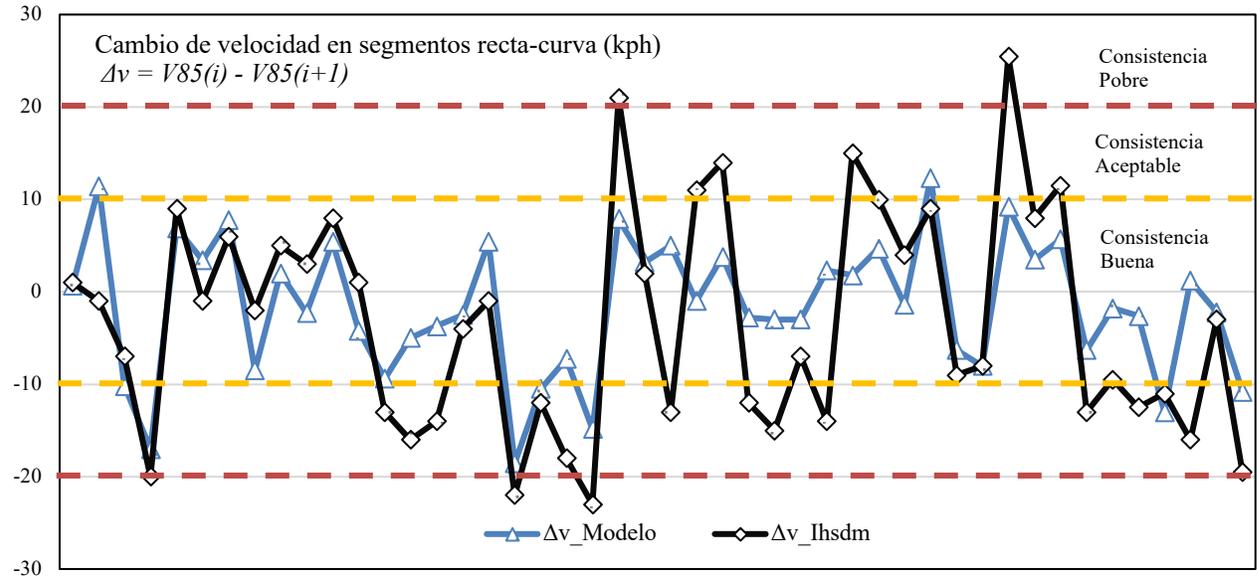


Figura 7 Cambios de velocidad aplicando los modelos propuestos e *IHSDM* donde se perciben los umbrales de consistencia de la velocidad

5. CONCLUSIONES

Del estudio sobre modelos matemáticos que describen el comportamiento de la velocidad media y velocidad límite (percentil 85) tanto en curva como en recta, en tramos de trazado sinuoso de calzada estrecha, se deducen las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Se determinan las variables geométricas de mayor influencia en la velocidad media y límite tanto para el elemento curva como recta; los análisis de modelos en curva determinan al radio como variable más generalizada y las distancias de parada y visibilidad en curva contribuyen para una mejor predicción. En el caso de la recta, la longitud de la recta analizada resulta muy significativa, al igual que las longitudes anterior y posterior que son adyacentes a las curvas que la contienen. El radio anterior y posterior también son influyentes y la pendiente longitudinal en un menor grado;
- El rango de velocidad experimentado en todo el tramo está entre los 30 y 75 km/h, valores propios de este tipo de alineamiento forzado que obliga a tomar en cuenta la recomendación *AASHTO* sobre el cambio de velocidad en el estudio de consistencia. Los radios varían desde valores muy pequeños hasta valores moderados con menos presencia de estos últimos (entre 19 y 475 m). La presencia de distancia recta entre curvas es muy precaria, varía entre 0 (un

valor que se estimó en 1 para facilitar el cálculo del inverso de la distancia recta) y los 287 m, incorporando los pocos casos de existencia;

- La velocidad media obtenida con los modelos y su similar usando el método del INVIAS presentan gran similitud, con la salvedad que los valores predichos por los modelos son menores generalmente a los obtenidos con la metodología del *INVIAS*.
- El análisis del cambio de velocidad en segmentos combinados recta-curva consecutivos demuestra que los modelos encontrados son más precisos que el *IHSDM* para definir la consistencia de velocidad en segmentos sobre todo considerados aceptables y pobres. Un aspecto que se explora para las situaciones en que se superan los umbrales de 10 y 20 km/h, respectivamente. En consecuencia, los modelos de predicción son capaces de mejorar la estimación y evitar una evaluación de la consistencia menos precisa, que represente costos innecesarios por aplicación de mejoras de seguridad en este tipo de carreteras;
- La velocidad límite V_{85} predicha por los modelos en curva y recta, tienen similar tendencia al ser contrastada con el perfil de velocidades *IHSDM*. La velocidad límite generada por el *IHSDM* es sobreestimada en los segmentos rectos, los valores se mantienen por encima de la predicción de los modelos hallados. En cambio, la velocidad en curva se ajusta mucho más comparativamente. Se presume que el *IHSDM*, a pesar de ser un software basado en el estudio de alineamientos en diferentes lugares del mundo, no se ajusta bien a trazados rectos de carreteras en montaña similares a la estudiada. Considerando los resultados en ambos subtramos, y valores tanto en tramos rectos como curvos, la diferencia promedio de velocidad límite es de 8 km/h, redondeando;
- Los modelos de velocidad media y límite muestran mejor correlación en la curva (de 0,75 y 0,78, respectivamente). Según investigaciones realizadas en EEUU y Europa, el radio de curva es la variable más generalizada lo que luce consistente. En este caso, se añaden más variables significativas que se estiman mediante la relación entre distancia de visibilidad y distancia de parada en la curva. En el tramo recto, los modelos tienen más bajo nivel predictivo (de 0,54 y 0,62, respectivamente) y dependen de más variables que en el caso de la curva, variables inclusive no vistas en otros modelos consultados. Esto lleva a pensar sobre la más difícil generalización de los modelos en recta, lo que sugiere un estudio más exhaustivo;
- El ajuste de regresión paso a paso descartó variables que parecían idóneas y que resultaron no significativas en los segmentos curvos, entre ellas se encuentran: ancho de carril, peralte, ángulo de deflexión Δ , longitud anterior a la anterior L_t , radio anterior al anterior R_t y tasa de cambio de curvatura (CCR) siguiendo los casos de análisis planteados y ubicación de los elementos del trazado circundantes a la curva o recta analizada;
- Se demuestra que los modelos propuestos son más precisos para determinar la velocidad límite en curvas y rectas en carretera dos carriles de montaña que el modelo *IHSDM* y serán útiles para el análisis de consistencia de velocidad si los parámetros geométricos están comprendidos en los rangos indicados (dominio donde los modelos son válidos);

- La validación recíproca alcanzada por los modelos propuestos al contrastar los resultados del *INVIAS* y *IHSDM*, proporcionan robustez a los resultados. Los estadísticos de Pearson y Spearman determinan buena correlación en la velocidad media en curva y velocidad límite en recta (ecuaciones 3 y 6), y una correlación muy buena en el caso de la velocidad límite en curva (ecuación 4), con valores de los estadísticos comprendidos entre 0,8 y 1;
- Como perspectiva se sugiere profundizar el estudio del modelo de velocidad en recta para distintos trazados ya que se prevé limitación en el uso de los modelos. Puede que la omisión de variables aun no estudiadas determine una mejor predicción, como puede ser la composición del tránsito en recta. En el caso de la curva, aunque los modelos resultaron con mayor poder explicativo, la limitación quizá se centra en obtener la distancia de visibilidad en curva con precisión, ya que puede ser compleja de medir en campo. En suma, revisar una nueva medición de datos en días distintos y comparar para verificar similitudes o cambio en las velocidades puede ser una propuesta interesante como trabajo ulterior.

REFERENCIAS

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2004) *A Police on Geometric Design of Highway and Streets*. 7^o Edición. The Green Book. Washington, D.C.

Andueza, P. (2000) Mathematical models of vehicular speed on mountain roads. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 1701, 104-110.

Bonneson, J. y Pratt, M. (2009) Model for predicting speed along horizontal curves on two-lane highway. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2092, 19-27.

Caicedo, L., (2018) Estudio de la consistencia en el trazado del tramo de la carretera de la red vial 45A07 ubicado entre el PR68 y el PR78 mediante el análisis de velocidad de operación. Tesis de maestría. Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga. Colombia.

Chiquitó, F. y Aroldo, E. (2014) Análisis de consistencia del trazo en caminos de montaña, en la República de Guatemala. Tesis de maestría. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

Crisman, B., Marchionna, A., Perco, P. y Roberti, R. (2005) Operating speed prediction model for two-lane rural roads. 3rd International Symposium on Highway Geometric Design, June 29-July 1, 2005, Chicago Illinois, EE.UU.

Fitzpatrick K., Elefteriadou, L. Harwood, D.W., Collins, J.M., McFadden, J., Anderson, I.B., Krammes, R.A., Irizarry, N., Parma, K.D., Bauer, K.M., y Passetti, K. (2000) Speed prediction for two-lane rural highway. Federal Highway Administration, EE.UU.

Instituto Nacional de Vías, Universidad del Cauca (1996) *Manual de Capacidad y Niveles de Servicio para Carreteras de Dos Carriles*, Segunda versión, Instituto Nacional de Vías. Popayán.

Islam, M. y Seneviratne, P. (1994) Evaluation of design consistency of two-lane highway. *ITE J.*, 64 (2), 28-31.

Jessen, D., Schurr, K., McCoy, P., Pesti, G. y Huft, R. (2001) Operating speed prediction on crest vertical curves of rural two-lane highway in Nebraska. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 1751, 67-75.

Lamm, R., Beck, A., Ruscher, T., Mailaender, T., Cafiso, S. y Lacava, G. (2007) How to make two-lane rural roads safer. Scientific background and guide for practical application. WIT Press. Great Britain.

Lamm, R. y Choueiri, E. (1987) Recommendations for evaluating horizontal design consistency based on investigations in the State of New York. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 1122, 68-78.

Lamm, R., Psarianos, B. y Mailaender, T. (1999) Highway design and traffic safety engineering handbook. Nueva York, NY Estados Unidos: McGraw-Hill.

Nie, B., y Hassan, Y. (2007) Modeling driver speed behavior on horizontal curves of different road classifications. 86th Annual Meeting Transportation Research Board. 21-25 enero 2007. Washington, D.C., EE. UU.

Pérez, Z.A., Camacho, F.J. y García, G.A. (2011) La velocidad de operación y su aplicación en el análisis de la consistencia de carreteras para la mejora de la seguridad vial, Cuaderno Tecnológico de la PTC. 1era Edición, Plataforma Tecnológica Española de la Carretera. Madrid.

Polus, A., Fitzpatrick, K., y Fambro, D. (2000) Predicting operation speeds on tangent sections of two-lane rural highways. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 34, 575-585.

Reyes, S.R. y Cárdenas, G.J. (2018) Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y Aplicaciones. 9na. Edición. Alfaomega, Ciudad de México.

Sánchez, J. (2011) Metodología para la evaluación de consistencia del trazado en carreteras interurbanas de dos carriles. Madrid.

APENDICE A

La Tabla A.1, presenta los registros de velocidad en curvas ordenados según su progresiva; se consideran las variables: radio de curva R_c , longitud de recta anterior L_a , radio anterior R_a , longitud anterior a la anterior L_t , radio anterior al anterior R_t y pendiente de recta anterior i_{ant} .

Tabla A.1. Parámetros para determinación de los modelos de velocidad media y límite en curva

V_m kph	V_{85} kph	$1/R_c$ m	L_a Km	$1/R_a$ m	L_t Km	$1/R_t$ m	Δ °	i_{ant} %	D_p m	D_v m	v D_v/D_p	CCR °/km
33,1	36,8	0,053	0,055	0,008	0,005	0,011	120,99	7,1	54,472	18,0	0,330	854,32
42,6	47,5	0,033	0,012	0,016	0,057	0,026	53,07	7,1	57,093	15,0	0,263	802,60
42,3	47,0	0,025	0,049	0,027	0,074	0,032	55,45	7,1	53,284	50,0	0,938	770,00
40,9	46,9	0,020	0,014	0,006	0,027	0,033	49,90	7,1	54,792	25,0	0,456	807,99
41,7	47,3	0,016	0,036	0,018	0,014	0,043	41,07	7,1	55,933	40,0	0,715	968,48
41,8	45,6	0,014	0,022	0,025	0,049	0,027	44,87	7,1	52,963	80,0	1,510	842,32
43,4	50,1	0,012	0,024	0,027	0,041	0,005	21,96	6,3	57,908	40,0	0,691	450,81
40,1	46,5	0,011	0,040	0,022	0,020	0,036	33,36	6,8	51,328	53,0	1,033	827,14
40,1	46,7	0,008	0,005	0,011	0,007	0,027	18,44	7,1	50,710	60,0	1,183	735,16
41,8	46,9	0,006	0,027	0,033	0,012	0,016	7,88	7,1	53,284	40,0	0,751	787,53
47,1	51,1	0,005	0,022	0,020	0,066	0,026	2,56	6,7	59,194	50,0	0,845	565,33
30,1	35,9	0,053	0,026	0,036	0,020	0,022	120,99	-7,1	40,647	18,0	0,443	1518,25
38,5	44,6	0,033	0,027	0,006	0,014	0,020	53,07	-7,1	75,413	15,0	0,199	808,15
44,0	48,4	0,025	0,022	0,014	0,017	0,029	55,45	-7,1	70,349	50,0	0,711	932,77
40,7	45,6	0,020	0,139	0,023	0,048	0,013	49,90	-7,1	84,334	25,0	0,296	389,86
41,4	46,7	0,016	0,017	0,026	0,057	0,016	41,07	-7,1	66,197	40,0	0,604	662,58
46,7	52,0	0,014	0,017	0,029	0,010	0,027	44,87	-7,1	67,413	80,0	1,187	1023,29
43,3	51,1	0,012	0,008	0,020	0,013	0,006	21,96	-6,3	68,066	40,0	0,588	614,91
43,4	47,8	0,011	0,017	0,020	0,012	0,008	33,36	-6,8	67,507	53,0	0,785	1215,33
44,9	49,6	0,008	0,055	0,053	0,026	0,036	18,44	-7,1	75,962	60,0	0,790	1065,52
45,2	51,1	0,006	0,014	0,020	0,139	0,023	7,88	-7,1	61,900	40,0	0,646	395,15
45,5	51,7	0,005	0,041	0,027	0,024	0,012	2,56	-6,7	75,564	50,0	0,662	451,76
44,2	50,5	0,002	0,348	0,006	0,178	0,035	9,47	3,8	87,642	50,0	0,571	146,93
35,1	37,8	0,038	0,287	0,024	0,037	0,010	89,65	-6,2	102,354	40,0	0,391	362,93
38,4	43,1	0,032	0,001	0,032	0,006	0,015	100,37	-2,6	52,806	55,0	1,042	1421,82
37,6	42,0	0,025	0,089	0,035	0,001	0,038	78,54	-3,4	75,917	20,0	0,263	1138,62
47,7	54,6	0,019	0,186	0,007	0,079	0,032	39,75	-6,3	111,936	50,0	0,447	373,93
45,0	50,0	0,016	0,017	0,014	0,001	0,019	53,96	-7,9	82,081	50,0	0,609	1167,26
49,0	55,9	0,013	0,073	0,011	0,242	0,021	29,27	-5,7	54,843	50,0	0,912	296,39
51,2	57,5	0,011	0,242	0,021	0,016	0,016	53,91	-5,7	100,335	60,0	0,598	373,39
49,6	56,3	0,010	0,215	0,023	0,013	0,016	37,73	-6,1	96,721	50,0	0,517	400,21
50,6	57,7	0,007	0,079	0,032	0,001	0,025	23,40	-6,3	79,685	80,0	1,004	794,81
47,7	55,3	0,005	0,001	0,003	0,074	0,032	20,31	-5,6	85,578	80,0	0,935	489,97
46,7	55,3	0,004	0,005	0,015	0,005	0,007	29,17	-6,3	86,084	100,0	1,162	358,78
51,8	59,4	0,003	0,074	0,032	0,001	0,032	13,18	-5,6	71,881	100,0	1,391	806,81
49,1	55,8	0,001	0,001	0,003	0,048	0,035	4,36	-4,7	70,233	100,0	1,424	455,93
35,0	38,3	0,038	0,001	0,035	0,089	0,025	89,65	6,2	40,735	40,0	0,982	1138,76
36,3	39,2	0,032	0,074	0,003	0,001	0,005	100,37	2,6	65,255	55,0	0,843	482,76
37,6	42,7	0,025	0,001	0,032	0,079	0,007	78,54	3,4	48,471	20,0	0,413	794,78
45,5	51,4	0,019	0,001	0,014	0,017	0,016	39,75	6,3	62,802	50,0	0,796	822,21
41,6	48,0	0,016	0,016	0,021	0,242	0,011	53,96	7,9	57,255	50,0	0,873	386,41
44,5	51,3	0,013	0,001	0,006	0,038	0,018	29,27	5,7	63,514	50,0	0,787	521,49
48,6	55,8	0,011	0,073	0,013	0,001	0,006	53,91	5,7	75,856	60,0	0,791	383,21
46,1	53,7	0,010	0,037	0,024	0,287	0,038	37,73	6,1	67,394	50,0	0,742	362,86

V_m kph	V_{85} kph	$1/R_c$ m	L_a Km	$1/R_a$ m	L_t Km	$1/R_t$ m	Δ °	i_{ant} %	D_p m	D_v m	v D_v/D_p	CCR °/km
50,8	58,3	0,007	0,186	0,019	0,001	0,014	23,40	6,3	68,374	80,0	1,170	342,96
49,4	56,9	0,005	0,044	0,016	0,013	0,023	20,31	5,6	74,011	80,0	1,081	618,61
45,1	51,6	0,004	0,112	0,036	0,001	0,035	29,17	6,3	63,258	100,0	1,581	638,58
49,1	57,0	0,003	0,001	0,005	0,044	0,016	13,18	5,6	63,628	100,0	1,572	315,00
49,5	58,2	0,001	0,017	0,012	0,019	0,015	4,36	4,7	77,814	100,0	1,285	383,69

La Tabla A.2 muestra los registros de velocidad en rectas, considerando variables como: longitud de recta L , longitud de recta anterior L_a , radio anterior R_a , longitud de recta posterior L_p , radio posterior R_p , y pendiente de recta anterior i_{ant} .

Tabla A.2. Parámetros para la determinación de los modelos de velocidad media y límite en recta

V_m kph	V_{85} kph	L km	L_a Km	$1/R_a$ m	L_p km	$1/R_p$ m	i_{ant} %
41,8	46,9	0,0554	0,0046	0,007635	0,0256	0,052854	7,1
35,8	38,9	0,0256	0,0554	0,052854	0,0201	0,035727	7,1
44,0	48,6	0,0120	0,0567	0,016300	0,0269	0,033190	7,1
46,3	46,3	0,0269	0,0120	0,033190	0,0144	0,006145	7,1
41,7	46,3	0,0488	0,0737	0,032830	0,0217	0,024594	7,1
42,2	46,1	0,0217	0,0488	0,024594	0,0169	0,014259	7,1
40,9	47,3	0,0144	0,0269	0,006145	0,1393	0,020040	7,1
44,8	50,5	0,1393	0,0144	0,020040	0,0477	0,023015	7,1
42,5	48,0	0,0357	0,0143	0,018305	0,0168	0,016361	7,1
41,6	47,3	0,0168	0,0357	0,016361	0,0567	0,026281	7,1
42,2	46,1	0,0217	0,0488	0,024594	0,0169	0,014259	7,1
42,8	46,4	0,0169	0,0217	0,014259	0,0098	0,029138	7,1
43,4	48,8	0,0238	0,0414	0,026969	0,0083	0,012438	6,3
43,6	49,7	0,0083	0,0238	0,012438	0,0130	0,020329	6,3
39,3	45,2	0,0395	0,0201	0,022287	0,0121	0,010910	6,8
40,7	47,6	0,0170	0,0395	0,010910	0,0014	0,020202	6,8
34,9	38,7	0,0122	0,0014	0,035386	0,0043	0,008245	6,8
35,5	39,3	0,0043	0,0122	0,008245	0,0024	0,023485	6,8
39,7	44,9	0,0046	0,0067	0,011493	0,0554	0,007635	7,1
41,8	46,9	0,0554	0,0046	0,007635	0,0256	0,052854	7,1
41,2	46,3	0,0269	0,0120	0,033190	0,0144	0,006145	7,1
40,9	47,3	0,0144	0,0269	0,006145	0,1393	0,020040	7,1
45,8	49,6	0,0216	0,0663	0,020125	0,0414	0,005000	6,7
47,7	51,5	0,0414	0,0216	0,005000	0,0238	0,026969	6,5
47,8	56,5	0,3476	0,0705	0,002104	0,1779	0,006298	5,5
51,2	60,9	0,2870	0,0372	0,023663	0,0010	0,037821	-6,5
46,2	51,8	0,0740	0,0010	0,032154	0,0010	0,002823	-2,6
45,6	51,3	0,0889	0,0010	0,034518	0,0010	0,024777	-6,3
54,4	65,3	0,1862	0,7870	0,007139	0,0010	0,019272	-6,3
46,8	52,6	0,0170	0,0010	0,014198	0,0156	0,015625	-7,9
45,1	50,6	0,0156	0,0169	0,015625	0,2422	0,020644	-7,4
53,4	60,0	0,0734	0,2422	0,010557	0,0010	0,013063	-5,7
52,1	59,4	0,2420	0,0156	0,020644	0,0734	0,010557	-7,4
52,6	59,2	0,2152	0,1190	0,022738	0,0372	0,009606	-6,1
47,1	52,8	0,0787	0,0010	0,031666	0,1862	0,007139	-6,3
47,9	55,6	0,0010	0,0740	0,002823	0,0442	0,005263	-5,6
46,6	50,7	0,1120	0,0047	0,004080	0,0010	0,036062	-6,3
43,8	50,0	0,0173	0,0010	0,000981	0,0194	0,011937	-4,7
45,4	50,9	0,0554	0,0256	0,052854	0,0046	0,007635	-7,1
31,2	34,3	0,0256	0,0201	0,035727	0,0554	0,052854	-7,1
38,6	44,7	0,0120	0,0269	0,033190	0,0567	0,016300	-7,1
45,4	50,8	0,0269	0,0144	0,006145	0,0120	0,033190	-7,1
44,8	49,0	0,0488	0,0217	0,024594	0,0737	0,032830	-7,1
45,1	48,8	0,0217	0,0169	0,014259	0,0217	0,024594	-7,1

V_m kph	V_{85} kph	L km	L_a Km	$1/R_a$ m	L_p km	$1/R_p$ m	i_{ant} %
41,0	45,4	0,0144	0,1393	0,020040	0,0269	0,006145	-7,1
47,4	54,0	0,1393	0,0477	0,023015	0,0144	0,020040	-7,1
41,7	47,6	0,0357	0,0168	0,016361	0,0143	0,018305	-7,1
42,5	47,0	0,0168	0,0567	0,026281	0,0357	0,016361	-7,1
45,1	48,8	0,0217	0,0169	0,014259	0,0488	0,024594	-7,1
44,4	48,0	0,0169	0,0098	0,029138	0,0217	0,014259	-6,3
45,0	50,6	0,0238	0,0083	0,012438	0,0414	0,026969	-6,3
42,9	48,0	0,0083	0,0130	0,020329	0,0238	0,012438	-6,8
41,6	48,1	0,0395	0,0130	0,010910	0,0201	0,022287	-6,8
43,7	47,8	0,0130	0,0170	0,020202	0,0395	0,010910	-6,8
42,6	46,5	0,0122	0,0043	0,008245	0,0014	0,035386	-6,8
40,5	45,0	0,0043	0,0024	0,023485	0,0122	0,008245	-7,1
44,2	49,9	0,0046	0,0554	0,007635	0,0067	0,011493	-7,1
45,5	51,3	0,0554	0,0256	0,052854	0,0046	0,007635	-7,1
45,4	50,8	0,0269	0,0144	0,006145	0,0120	0,033190	-7,1
41,0	45,4	0,0144	0,1393	0,020040	0,0269	0,006145	-6,7
46,6	50,6	0,0216	0,0414	0,005000	0,0663	0,020125	-6,5
46,4	52,8	0,0414	0,0238	0,026969	0,0216	0,005000	-3,8
51,7	57,3	0,3476	0,1779	0,006298	0,0705	0,002104	-4
43,5	55,2	0,2870	0,0010	0,037821	0,0372	0,023663	6,5
45,8	51,1	0,0740	0,0010	0,002823	0,0010	0,032154	2,6
43,0	48,7	0,0889	0,0010	0,024777	0,0010	0,034518	6,3
47,2	54,3	0,1862	0,0010	0,019272	0,0787	0,007139	6,3
42,8	48,5	0,0170	0,0156	0,015625	0,0010	0,014198	7,9
42,5	48,7	0,0156	0,2422	0,020644	0,0170	0,015625	7,4
51,0	57,8	0,0734	0,0010	0,013063	0,2422	0,010557	5,7
56,8	66,7	0,2420	0,0734	0,010557	0,0156	0,020644	7,4
47,3	54,5	0,2152	0,0372	0,009606	0,0129	0,022738	6,1
46,8	55,7	0,0787	0,1862	0,007139	0,0010	0,031666	6,3
46,5	51,6	0,0010	0,0442	0,005263	0,0740	0,002823	5,6
44,8	51,6	0,1120	0,0010	0,036062	0,0047	0,004080	6,3
49,4	57,0	0,0173	0,0194	0,011937	0,0010	0,000981	4,7

Las Tablas A.3 y A.4 resumen parámetros del alineamiento horizontal y vertical del subtramo Pamplona- Bucaramanga. Insumos para la generación del perfil de velocidad límite V_{85} con el software *IHSDM*.

Tabla A.3. Elementos ingresados al *IHSDM*. Alineamiento horizontal Pamplona-Bucaramanga.

Tipo	Progresiva Inicial (m)	Progresiva Final (m)	R _c (m)	Sentido de Curva H	Deflexión (°)
Tangente	0	70.519	--	--	--
curva 1	70.519	149.099	475.27	Derecha	9.47
Tangente	149.099	496.653			
curva 2	496.653	615.993	158.77	Izquierda	43.07
Tangente	615.993	793.908			
curva 3	793.908	822.658	28.42	Izquierda	57.97
Tangente	822.658	859.187			
curva 4	859.187	914.157	44.74	Derecha	70.39
Tangente	914.157	1011.390			
curva 5	1011.39	1034.910	34.94	Derecha	38.56
Tangente	1034.91	1065.562			
curva 6	1065.562	1118.312	45.52	Izquierda	66.4
Tangente	1118.312	1170.055			
curva 7	1170.055	1230.235	34.61	Izquierda	99.64
Tangente	1230.235	1262.685	.	.	.
curva 8	1262.685	1305.185	65.35	Derecha	37.26
Tangente	1305.185	1330.046			
curva 9	1330.046	1357.426	50.96	Izquierda	30.78
Tangente	1357.426	1360.825			
curva 10	1360.825	1394.705	38.76	Derecha	50.08
Tangente	1394.705	1460.959			
curva 11	1460.959	1497.029	49.69	Derecha	41.59
Tangente	1497.029	1518.589			
curva 12	1518.589	1527.509	200	Izquierda	2.56
Tangente	1527.509	1568.87			
.
.	.	Más elementos intermedios		.	.
.
.
Tangente	3193.064	3202.853			
curva 36	3202.853	3236.653	36.81	Izquierda	52.61
Tangente	3236.653	3243.361			
curva 37	3243.361	3335.611	87.01	Derecha	60.75
Tangente	3335.611	3340.186			
curva 38	3340.186	3382.336	130.98	Izquierda	18.44
Tangente	3382.336	3437.736			
curva 39	3437.736	3477.696	18.92	Izquierda	120.99
Tangente	3477.696	3503.305			
curva 40	3503.305	3538.315	27.99	Derecha	71.66
Tangente	3538.315	3558.445			
curva 41	3558.445	3597.195	44.87	Izquierda	49.49
Tangente	3597.195	3636.738			
curva 42	3636.738	3690.108	91.66	Derecha	33.36
Tangente	3690.108	3703.126			
curva 43	3703.126	3731.646	49.5	Izquierda	28.38
Tangente	3731.646	3733.049			
curva 44	3733.049	3775.699	28.26	Derecha	86.48
Tangente	3775.699	3787.853			
curva 45	3787.853	3826.922	121.29	Izquierda	18.46
Tangente	3826.922	3831.260			
curva 46	3831.26	3863.270	42.58	Derecha	43.06
Tangente	3863.27	3865.600	--	--	--

Tabla A.4. Elementos ingresados al *IHSDM*. Alineamiento vertical Pamplona-Bucaramanga.

Tipo	Progresiva Inicial (m)	Progresiva Final (m)	Pend. Entrando (%)	Pend. Saliendo (%)	L_{cv}/2 (m)
Tangente	0	123	3.8	--	--
VPI 1	138		3.8	3.3	15
Tangente	153	158	3.3		
VPI 2	168		3.3	4.0	10
Tangente	178	213	4.0		
VPI 3	228		4.0	4.3	15
Tangente	243	270	4.3		
VPI 4	280		4.3	6.8	10
Tangente	290	546	6.8		
VPI 5	554		6.8	6.5	8
Tangente	562	850	6.5		
VPI 6	856		6.5	6.8	6
Tangente	862	1275	6.8		
VPI 7	1280		6.8	6.7	5
Tangente	1285	1550	6.7		
VPI 8	1560		6.7	6.3	10
Tangente	1570	1945	6.3		
VPI 9	1960		6.3	5.0	15
Tangente	1975	2025	5.0		
VPI 10	2040		5.0	7.1	15
Tangente	2055	3540	7.1		
VPI 11	3550		7.1	6.8	10
Tangente	3560	3865.6	--	--	--