

Parámetros que definen la velocidad de diseño de carreteras en terreno ondulado

Parameters to define road design speeds on rolling terrain

Carlos Eduardo Oñate-Bastidas^{1*}, Carlos Aníbal Calero-Valenzuela²

¹Magíster en Ingeniería de vías Terrestres, carlosoeduardo@unicauca.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-4728-5264>, Docente en Universidad del Cauca, Popayán - Colombia.

²Doctor en Filosofía en Ingeniería, ccalero@unicauca.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-2920-4130>, Docente en Universidad del Cauca, Popayán - Colombia.

Cómo citar: C. E., Oñate-Bastidas, C. A., Calero-Valenzuela, "Parámetros que definen la velocidad de diseño de carreteras en terreno ondulado". *Respuestas*, vol. 28, no. 2, 18-32. 2023. <https://doi.org/10.22463/0122820X.2792>

Received: September 29, 2022; Approved: February 3, 2023

RESUMEN

Palabras Clave:

Consistencia de diseño geométrico, curvas horizontales, geometría vial, velocidad de diseño, velocidad de operación, seguridad vial.

En Colombia, la cantidad de choques fatales evidencian un problema de seguridad vial, la consistencia de diseño geométrico pudiera ser una solución para su disminución, dado que están directamente relacionadas. El Manual de Diseño Geométrico de Carreteras de Colombia pretende encaminar la consistencia en una etapa temprana del diseño a través de la asignación de la velocidad específica para los elementos en planta y perfil. El objetivo de este estudio es verificar la aplicabilidad de los parámetros que definen esta velocidad en curvas horizontales para terreno ondulado. Se analizaron 40 curvas horizontales en las que se registraron 1380 datos de velocidad con usuarios circulando a flujo libre. Se consideraron los elementos geométricos y operacionales como variables independientes, y los cambios de velocidad como variables dependientes. El análisis de varianza multifactorial realizado a un grupo de combinaciones de variables categorizadas determinó que la velocidad de diseño es más sensible al parámetro velocidad de operación en la curva anterior (Voi-1) con coeficientes R² entre 63% y 75%, y al parámetro geométrico ángulo de deflexión (Δ) con coeficientes de determinación R² entre 43% y 56%. Se concluye que el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras requiere cambios metodológicos en la asignación de velocidades específicas y se propone una nueva metodología para la asignación de velocidades específicas para terreno ondulado.

ABSTRACT

Keywords:

Geometric Design Consistency, design speed, horizontal curves, operating speed, road geometry, road safety.

In Colombia, the number of fatal crashes is evidence of a road safety problem, and geometric design consistency could be a solution to reduce them, since they are directly related. The Colombian Highway Geometric Design Manual aims to address consistency at an early stage of design through the assignment of specific speed for plan and profile elements. The objective of this study is to verify the applicability of the parameters that define this velocity in horizontal curves for undulating terrain. Forty horizontal curves were analyzed in which 1380 speed data were recorded with users circulating at free flow. Geometric and operational elements were considered as independent variables, and speed changes as dependent variables. The multifactor analysis of variance performed on a group of categorized variable combinations determined that the design speed is most sensitive to the operating speed parameter on the previous curve (Voi-1) with R² coefficients between 63% and 75%, and to the geometric parameter deflection angle (Δ) with R² coefficients of determination between 43% and 56%. It is concluded that the Highway Geometric Design Manual requires methodological changes in the assignment of specific speeds and a new methodology is proposed for the assignment of specific speeds for undulating terrain

*Corresponding author.

E-mail Address: carlosoeduardo@unicauca.edu.co

(Carlos Eduardo Oñate-Bastidas)



Peer review is the responsibility of the Universidad Francisco de Paula Santander.
This is an article under the license CC BY-NC 4.0

Introducción

A pesar del trabajo realizado por parte de las organizaciones gubernamentales en materia de seguridad vial, no se puede asegurar que el problema de mortandad por accidentes de tránsito esté bajo control. La Organización Mundial de la Salud (OMS) [1], ha contabilizado la cantidad de muertes, registrando 1.15 millones en el año 2000, y 1.35 millones en el 2016, lo que indica el aumento a través del tiempo. También señaló que la mortalidad por traumatismos a causa de accidentes de tránsito se encuentra en un noveno lugar dentro las causas principales de mortandad a nivel mundial, superado por enfermedades respiratorias virus e infecciones; y proyectó que para el año 2030 esta misma causa va a ocupar el quinto lugar [1]. La cantidad de muertes evidencia un problema de salud pública.

Situación problema y justificación

Según el informe “*Situación mundial sobre seguridad vial*” elaborado por la OMS [1], en Colombia el 65% de accidentes fatales se presentan por el uso de vehículo, el 46% restante involucra peatones y ciclistas [1]. Esta falta de seguridad vial puede ligarse a problemas de consistencia en el diseño geométrico [2], Polus y Matar-Habib mencionan que la consistencia está altamente correlacionada con problemas de seguridad vial: Las vías inconsistentes generan maniobras erráticas que pueden desencadenar choques en las carreteras. Llopis Castelló [3] presentó la consistencia de diseño geométrico considerando la diferencia entre la velocidad de operación inercial y la velocidad de operación; estas representan la expectativa de los conductores y el comportamiento de la carretera, respectivamente.

Wooldridge et al [4] definen la consistencia de diseño como la disposición de las características geométricas y operacionales de la vía a partir de las expectativas del conductor; por lo tanto, una vía es consistente en su diseño geométrico cuando éste, en el momento de la operación, tiene una percepción continua de la evolución del trazado, para evitar confusiones generadas por interrupciones en la geometría que podrían llevar a respuestas erróneas [5]; según esto se puede decir, que hay consistencia en el diseño geométrico de la carretera, cuando hay armonía en el trazado de la vía en relación con lo que espera el conductor; de manera inconsciente, hace su trayecto a una velocidad cómoda y constante.

El Manual de Diseño Geométrico Colombiano (MDGC) busca la consistencia de diseño de manera temprana al asignar las velocidades específicas a las curvas y entretangencias en los alineamientos vertical y horizontal. Este proceso inicia cuando se asigna la velocidad de diseño para tramos homogéneos (VTR), que a su vez dependen de la categoría de carretera y del tipo de terreno, además del criterio del diseñador [5]. Una vez se define la VTR, se asignan las velocidades específicas para las curvas horizontales (VCH) a partir de la Tabla I, posteriormente se determinan para las entretangencias horizontales (VETH) y verticales (VTV) y las curvas verticales (VCV). El proceso de la asignación de velocidades de diseño en el MDGC intenta predecir el comportamiento de los usuarios, dado que se considera la falta de cumplimiento de las normas por parte de los conductores [5].

Este análisis de velocidad se realiza a partir de estudios en carreteras desarrollados en países con idiosincrasia similar a la colombiana [5]. De acuerdo con lo anterior, se puede establecer que no se ha promovido un análisis del comportamiento de los usuarios en las vías colombianas según el tipo de terreno, por lo que se hace necesario establecer parámetros propios que lleven a obtener una asignación de velocidades que atienda la realidad colombiana. Como medidas recomendadas para mejorar la seguridad de la infraestructura vial,

el PLAN MUNDIAL DECENIO DE ACCIÓN PARA LA SEGURIDAD VIAL 2021 – 2030 recomienda “revisar y actualizar la legislación y las normas de diseño locales que tengan en cuenta la función de las vías de tránsito y las necesidades de todos los usuarios, y para zonas específicas” [6].

El segundo capítulo del MDGC se centra en los controles para el diseño geométrico, que parten de la velocidad con el fin de generar consistencia de diseño. Para determinar la VCH, la cual será la velocidad máxima probable que se presente en el trazado, y depende de [5]:

- La velocidad de diseño del tramo homogéneo.
- El sentido en el que el vehículo recorre la carretera.
- La velocidad específica asignada a la curva anterior.
- Longitud de la entretangencia anterior y ángulo de deflexión en la curva analizada. Para esta situación se analizan los parámetros geométricos de la siguiente manera:

De la Tabla I se definen cinco casos que dependen del alineamiento horizontal (longitud de entre tangencia, ángulo de deflexión y velocidad específica de la curva horizontal anterior) [5], con el propósito de definir velocidades específicas.

Tabla I. Tabla 2.2 Del Manual Mdgc

Velocidad específica de la curva anterior VCH (km/h)	Velocidad de diseño del tramo VTR > 50 km/h				
	Longitud del segmento recto anterior (m)				
	L ≤ 150	150 ≤ L ≤ 400		400 ≤ L ≤ 600	L > 600
		Δ < 45°	Δ ≥ 45°		
VTR	VTR	VTR	VTR	VTR	VTR
VTR +10	VTR +10	VTR +10	VTR	VTR +10	VTR
VTR +20	VTR +20	VTR +20	VTR +10	VTR +10	VTR +10
CASO	1	2	3	4	5

Una vez asignada la (V_{CH}) se determina el radio (R_c) de la curva en función de peralte (e) y el coeficiente de fricción transversal máximo (f), tal como se presenta en la ecuación (1). No asignar una velocidad específica que corresponda a la velocidad real en operación implica que no se establezca un radio de curvatura adecuado generando problemas de seguridad vial y de consistencia de diseño.

$$R_c = \frac{V_{CH}^2}{127(e + f)} \quad (1)$$

Bajo la hipótesis, realizar diseños viales basados en las velocidades específicas determinadas por la Tabla I del MDGC, no asegura que las vías sean consistentes en su diseño geométrico, puesto que el manual no está basado en el comportamiento normal de los conductores de nuestro país; por tal motivo, las vías pueden presentar problemas de seguridad vial en algunos de sus elementos en el momento de operación.

Consistencia de diseño

Para valorar la consistencia de diseño es necesario definir la velocidad operacional de los elementos y compararlos con las escalas, las cuales son desarrolladas a partir de la relación velocidad – seguridad [2]. Sánchez et al [7], evaluaron la consistencia del trazado en carreteras rurales de una sola calzada bidireccional con los siguientes parámetros: i) el perfil de velocidades de operación, ii) el índice por cambio de curvatura vertical (VCCR), e iii) índices de reparaciones del trazado. Se deja claro que los datos de velocidades deben compararse con la velocidad del proyecto, y fundamentalmente entre elementos consecutivos, considerándose crítica la variación superior a 20 km/h. Además, se muestra la importancia de la velocidad en el diseño de los elementos geométricos y en su funcionamiento, por lo que determinar el perfil de velocidades de operación para ser comparadas con las velocidades de diseño consecutivas se vuelve herramienta fundamental para encontrar la consistencia del trazado de carretera.

A lo anterior se agrega el análisis de la geometría del trazado de la carretera como conjunto tridimensional: Se analiza el trazado en planta como la mayor influencia sobre la accidentalidad y el trazado en perfil para determinar el índice de reparación del trazado. Esta metodología evalúa la posibilidad de presentar un riesgo sobre la seguridad de los usuarios de la vía [7].

Calero [8], utilizó redes neuronales artificiales (ANN, por sus siglas en inglés) para estimar la diferencia de las velocidades operacionales entre puntos (PC, MC, PT, Mitad entretangencia), además definió una escala para determinar la consistencia del trazado de una carretera mediante el uso de curvas ROC. Las ANN son modelos compuestos que consisten en un conjunto de capas las cuales se encuentran conectadas con capas adyacentes consecutivas, y se conforman por neuronas organizadas en un mismo nivel. Posteriormente utilizó escalas existentes (Lamm [8] [9], Polus & Matar Habib [2]) dentro de las curvas ROC para determinar el umbral en el que se produce el cambio de clasificación de la consistencia de diseño. En la Tabla II que se presenta a continuación, se resumen varias escalas para determinar consistencia de diseño.

Tabla II. Modelos Para Determinar Consistencia De Diseño.

AUTOR	CRITERIO	ESCALA
Leisch y Leisch (1977) [11]	Velocidad promedio de vehículos de pasajeros no debe diferir en más de 16 KPH con respecto a la velocidad de diseño	Bueno / pobre
	La reducción de velocidad de diseño entre dos tramos consecutivos no debe superar 16 KPH	
	La velocidad promedio de los vehículos pesados no debe ser inferior de más de 16 KPH en comparación a la de los vehículos de pasajeros	
Lamm et al (1988) [9]	$V_{85} - V_D \leq 10 \text{ Km/h}$	Bueno
	$10 \text{ Km/h} < V_{85} - V_D \leq 20 \text{ Km/h}$	Regular
	$V_{85} - V_D > 20 \text{ Km/h}$	Pobre
Lamm et al (1995) [10]	$V_{85,1} - V_{85,2} \leq 10 \text{ Km/h}$	Regular
	$10 \text{ Km/h} < V_{85,1} - V_{85,2} \leq 20 \text{ Km/h}$	Pobre
	$V_{85,1} - V_{85,2} > 20 \text{ Km/h}$	
Polus y Matar Habib (2004) [4]	$C = 2.808 e^{(-0.278 [Ra (\sigma/3.6)])}$	
	Ra: Área relativa entre perfil de velocidad operacional y perfil de velocidad operacional promedio entre elementos.	
	$C > 2$	Bueno
	$1 < C \leq 2$	Aceptable
Calero V. (2015) [8]	$C \leq 1$	Pobre
	$\Delta_{85}V_{BP} < 5 \text{ Km/h}$	Buena
	$5 \text{ km/h} \leq \Delta_{85}V_{BP} < 6.5 \text{ km/h}$	Regular
	$\Delta_{85}V_{BP} \geq 6.5 \text{ km/h}$	Pobre
	$\Delta_{85}V_{BP}$: Percentil 85 de las diferencias de velocidad entre puntos consecutivos en la curva horizontal	
Llopis Castelló (2018) [3]	$C \leq 2.75 \text{ Km/h}$	Buena
	$2.75 \text{ Km/h} \leq C \leq 4.5 \text{ km/h}$	Aceptable
	$C > 4.5 \text{ km/h}$	Pobre

Modelos de predicción de velocidades de operación

A continuación, se presentan algunos de los modelos de importancia para la estimación de la velocidad en vías rurales de dos carriles, estos permiten identificar las variables que la afectan.

McFadden y Elefteriadou [12], determinaron un modelo para estimar el percentil 85 de la máxima reducción de velocidad (85MSR, por sus siglas en inglés) que se presenta en la ecuación 2, este depende de la geometría de la carretera y la velocidad de operación a 200 metros antes de la entrada de la curva. Para este se consideraron 9 datos de velocidad en la entretangencia y otros 9 en la curva horizontal, de estos se seleccionaron el valor más alto y bajo, respectivamente.

$$85MSR = -14.90 + (0.144V_{85@PC200}) + (0.0153LAPT) + \left(\frac{954.55}{R}\right) \quad R^2 = 0.71 \quad (2)$$

Donde, $V_{85@PC200}$: Percentil 85 de la velocidad en la tangente de entrada a 200m antes del PC. [km/h]

R: Radio de curvatura. [m]

LAPT: Longitud de aproximación en la tangente. [m]

Cafiso et al [13], desarrollaron tres ecuaciones para estimar velocidad de operación, la toma de datos se realizó en Sicilia, Italia, en 80 curvas con variabilidad geométrica, y se presentan en las ecuaciones (3), (4) y (5).

$$V_{85i} = 0.987V_{env} - 0.0418 CCR_{si} * \frac{V_{env}}{100} \quad \left[\frac{km}{h}\right] \quad (3)$$

$$V_{env} = 100.05 - 0.197 CCR_{sect} + 2.147W \quad \left[\frac{km}{h}\right] \quad (4)$$

$$CCR_{si} = \frac{\gamma_i}{L_i} \quad \left[\frac{Gon}{km}\right] \quad (5)$$

Donde: γ_i : Ángulo de deflexión. [Gon]

V_{env} : Velocidad promedio del tramo analizado. [km/h].

CCR_{si} : Tasa de cambio de curvatura.

W: Ancho de corona de la sección transversal. [m]

CCR_{sect} : Tasa de cambio de curvatura.

Echaveguren [14], realizó un análisis de regresión no lineal en los puntos inicio de curva (PC), mitad de curva (MC) y principio de la entretangencia (PT) que se muestran en la ecuación (6), (7), (8) respectivamente. Dentro de las 37 curvas incluidas hubo radios de curvatura entre 190 m y 687 m, correspondientes a velocidades de diseño entre 70 y 120 km/h.

$$V_{85,PC} = 51.3 + 0.524V_{85,TE} - \frac{1811.9}{R} \tag{6}$$

$$V_{85,MC} = V_{85,PC} - \frac{61.31}{\sqrt{R}} \tag{7}$$

$$V_{85,PT} = 1.05V_{85,MC} - 0.103\sqrt{R} \tag{8}$$

Donde, R: Radio de curvatura [m]
 $V_{85,TE}$: Percentil 85 de la velocidad 200 metros antes de inicio de curva [km/h].

En la Tabla III se realiza un conglomerado de modelos descritos por autores que han elaborado análisis de velocidades en campo [15].

Tabla III. Modelos Para Estimar Velocidades De Operación [15].

ECUACIÓN	AUTOR
$V_{85}=34.70-DC+2.081(LW)+0.174(SW)+0.0004(AADT)$	Lamm et al (1990)
$V_{85}=e^{(4.561-0.00586*DC)}$	Morrall y Talarico (2004)
$V_{85,PC}=95.41-1.48DC-0.12DC^2$	Islam & Seneviratne (1994)
$V_{85,MC}=103.30-2.41DC-0.029DC^2$	
$V_{85,PT}=96.11-1.07DC$	
$V_{85}=103.66-1.95DC$	Krammes et al (1995)
$V_{85}=102.45-1.57DC+0.0037L-0.10I$	
$V_{85}=41.62-1.29DC+0.0049L-0.12I+0.95Vt$	
$V_{85}=102-2.08DC+40.33(e^*)$	Furthermore, Voigt & Krammes (1996)
$V_{85}=99.6-1.69DC+0.014L-0.13-I+71.82e^*$	Passetti y Fambro (1999)
$V_{85}=103.90-3020.5(1/R)$	
$V_{85}=-4.880+18.2222*Ln[R]$, Ancho pavimento $\geq 6m$	Lippold (1997)
$V_{85}=7.8066+16.0274*Ln[R]$, Ancho pavimento entre 6m y 7 m	
$V_{85}=-2.8981+17.8093*Ln[R]$, Ancho pavimento entre 6m y 7 , y radio de curvatura $\leq 200m$	
$V_{85}=-24.397+22.0465*Ln[R]$, Ancho pavimento $\geq 7m$	
DC: Grado de curvatura	
LW: Ancho de carril [Pies]	
SW: Ancho de berma [Pies]	
AADDT: Tránsito promedio diario anual. [Vehículo/Día].	
L: Longitud de curva [m]	
I: Ángulo de deflexión [°]	
Vt: Percentil 85 de la velocidad en la tangente de entrada [km/h]	
R: Radio de curvatura [m]	
e*: Tasa de peralte [m/m]	

Fuente: Modeling Operating Speed E-C151.

Autores más recientes concluyeron que la velocidad de operación tiene alta relación con el ancho de berma, una berma adecuada genera confianza en los usuarios, por lo que un estudio de análisis de velocidad se debe realizar en tramos homogéneos [16]. El radio de curva horizontal, la pendiente longitudinal y longitudes entre curvas, guardan significancia estadística en carreteras de dos carriles en terreno montañoso [17]

Ulpiano [18], analizó la variable ángulo de deflexión para valores menores a 16° en curvas amplias, un primer análisis subjetivo a través de encuestas a una cantidad de conductores escogidos, concluyó que la población reduciría o mantendría la misma velocidad al entrar a una curva con bajo ángulo de deflexión, y a manera experimental, encontró que los conductores tienden a variar poco su velocidad e invadir ligeramente el carril de sentido contrario. Además, Galindo [19] encontró significancia estadística a las variables ángulo

de deflexión y velocidad de operación límite en modelos de velocidad de operación en curvas horizontales en la región de Querétaro, México.

Con la información en los modelos de estimación de la velocidad operacional se seleccionaron las variables independientes y dependientes a recopilar en campo. Las variables dependientes que han sido utilizadas para la evaluación de la consistencia de diseño parten de la velocidad de operación puntual (VOP) en un elemento de carretera. Esta velocidad se define como el percentil 85 de las velocidades de vehículos sometidos a flujo libre en un punto sobre la vía [11]. La diferencia de la velocidad operacional (ΔV_{85}), es la sustracción de velocidad operacional de dos elementos, sea entretangencia de entrada y mitad de curva horizontal, o entre mitad de curvas horizontales [11]; para determinar el percentil 85 de la diferencia de velocidad operacional entre elementos sucesivos ($\Delta 85V$) se requiere el seguimiento de cada vehículo a través de los elementos.

Como variables independientes, se reconocen los parámetros geométricos más relevantes que han sido utilizados de manera común por anteriores investigadores, para estimar velocidades, entre ellos se destacan:

- Radio de curvatura (R_c),
- Ángulo de deflexión (Δ),
- Longitud de entretangencia anterior (L_{ent})
- Pendiente de entrada a la curva (S_e),
- Distancia de parada.
- Velocidad de operación en la curva anterior a la analizada.

Metodología

El propósito de esta investigación fue definir los parámetros que afectan la velocidad de operación (V_o) como base para la asignación de la velocidad específica (V_{CH}) en el diseño para el terreno ondulado. Dentro del proceso se aseguró condiciones óptimas de circulación como el buen estado en la estructura de pavimento, buen drenaje, tráfico, clima, entre otros, que no afectaran la velocidad a flujo libre. Paralelo a esto se tuvo en cuenta la geometría de los elementos que componen las curvas como: sección transversal, alineamiento horizontal y vertical.

El trayecto donde se analizaron las curvas horizontales cumple con las condiciones necesarias de homogeneidad en cuanto al tipo de terreno ondulado, presencia de flujo libre en todo el trayecto, ausencia de intersecciones, buenas condiciones de pavimento y climatológicas en la mayor parte del día. De igual manera, se asegura representatividad y variabilidad geométrica en sus 40 curvas analizadas: El rango de radio de curvatura variaba entre 40 y 500 metros, con longitudes de entretangencia anteriores entre 40 y 400 metros y ángulos de deflexión entre 7° y 95° . Los perfiles de velocidad se obtuvieron a través de la toma de velocidades en campo con un receptor GPS cartográfico de precisión de 0.001 metros y registro

de Dilución de Precisión en Posición (PDOP) entre 1.4 y 2. Se incluyeron 1380 datos de velocidad de los usuarios circulando a flujo libre, la velocidad operacional fue determinada en cinco puntos para cada curva: en la mitad de la entretangencia de entrada y salida, y el principio (PC), mitad (MC) y final (PT). A partir de los perfiles de velocidad obtenidos se hicieron análisis descriptivos de los comportamientos de las variables y ANOVA multifactorial para determinar significancias estadísticas.

Toma de datos

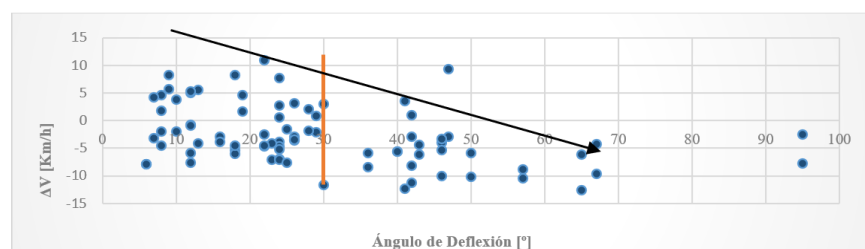
Se realizó el reconocimiento de las vías principales dentro de la zona geográfica del sector, buscando homogeneidad en la topografía (Terreno ondulado), y un tránsito tal que predominara la velocidad a flujo libre en los usuarios. Se escogió el tramo vial Piedra Sentada – Bordo, en el municipio de Patía en el Departamento del Cauca. Esta vía se ubica en terreno ondulado, con longitud de once kilómetros, cuenta con la representatividad y variabilidad en sus elementos geométricos. La toma de velocidades y de topografía se realizó mediante el método de vehículo flotante [13]. El receptor GPS calcula las coordenadas (posición) y el tiempo, que permite el cálculo de la velocidad puntual en cada segundo, se toma en consideración las velocidades obtenidas en la mitad de entretangencia entre curvas consecutivas, inicio de curva (PC), mitad de curva (MC) y fin de curva (PT). Se tomó la información necesaria de posición con el receptor GPS para determinar el eje principal de la vía, mediante el Software TOPO3 [20] e imágenes satelitales obtenidas por *Google Earth* [21] se infirió el diseño vía.

Clasificación de variables

Para clasificar las variables independientes se caracterizaron los elementos geométricos en cada curva (PI), entre estos: radio de curvatura (R_c), ángulo de deflexión (Δ), longitud de entretangencia (L_c), pendiente de entrada a la curva (S_c) y distancia de parada (D_p); también se determinó la variable independiente la velocidad de operación en la curva anterior (V_{oi-1}). Se tomó la variable dependiente como los cambios máximos de velocidad (ΔV), crecientes o decrecientes, que se presentan entre curvas consecutivas o entretangencias de entrada y la curva analizada.

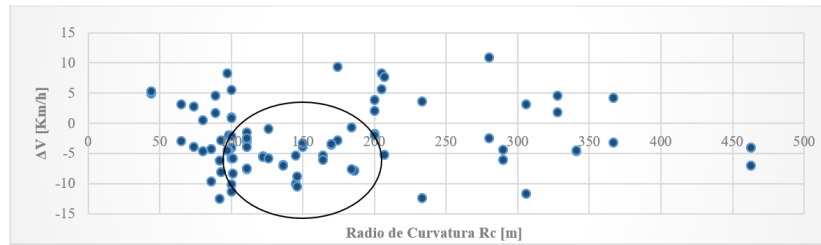
Análisis de datos

A continuación, se presenta el comportamiento gráfico de la variable dependiente frente a cada uno de los parámetros geométricos. Para el caso de la gráfica 2, se observa una disminución de velocidad cuando el ángulo de deflexión es mayor a 30° , esto sin aislar el efecto de las otras variables, la flecha muestra la tendencia de reducción de velocidad de operación a las unidades observadas.



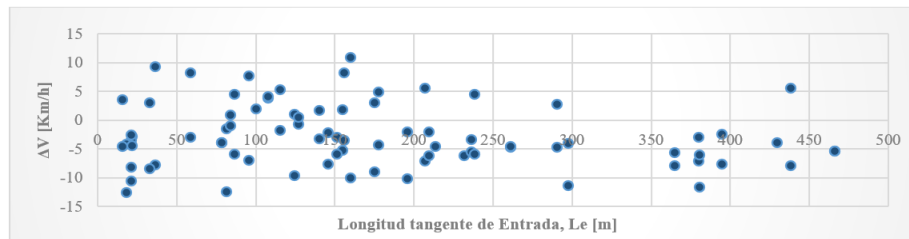
Gráfica 2. Cambio de velocidad ΔV vs Ángulo de Deflexión.

La gráfica 3 representa los cambios de velocidad en función del radio de curvatura. Se puede observar que ΔV presenta únicamente cambios negativos cuando fluctúa entre 100 m a 200 m, excepto por un punto. Cuando la curva presenta un radio mayor a este rango, la velocidad es más sensible a otros parámetros geométricos.



Gráfica 3. Cambio de velocidad ΔV vs Radio de Curvatura [m].

En la gráfica 4, Se observa los incrementos de velocidad en las curvas donde la entretangencia de entrada es mayor a 170 metros, y al mismo tiempo, un ángulo de deflexión menor a 30° .



Gráfica 4. Cambio de velocidad ΔV vs Longitud Entretangencia de Entrada [m]

Se debe recalcar que el comportamiento de ΔV no se rige por encontrarse algún parámetro geométrico de manera individual, las combinaciones de las variables independientes afectan la velocidad en los usuarios, y la prevalencia de algún factor bajo ciertas consideraciones puede afectar o no ΔV .

Análisis estadístico

Se verificó la tabla 2.2 del MDGC mediante un análisis de varianza (ANOVA) multifactorial, esta herramienta permite estudiar la respuesta que genera la combinación de los parámetros geométricos en los cambios de velocidad, y se determina el nivel de significancia estadística para cada variable independiente. Para el procedimiento estadístico se categorizó la información obtenida en campo. Se tomó como referencia los casos de la Tabla I:

Cambio de velocidad (ΔV) [km/h]: Toma los siguientes valores: para cambios negativos de velocidad, -10, para cambios nulos de velocidad: 0, y para cambios positivos de velocidad: +10.

Ángulo de deflexión (Δ) [°]: para ángulos menores a 45° toma el valor de 23° , y para ángulos mayores a 45° toma el valor de 60° .

Longitud de entretangencia de entrada (L_e) [m]: Como muestra la Tabla IV:

Tabla IV. Rangos Longitudes De Entretangencia De Entrada.

Rango continuo [m]	Valor categorizado [m]
0 - 150	75
150 - 400	275
400 - 600	500
> 600	800

La variable independiente correspondiente a la velocidad de operación de la curva anterior (V_{oi-1}) se categorizó tomando los valores como describe la Tabla V.

Tabla V. Velocidad De Operación De La Curva Anterior Categorizada

Rango continuo [km/h]	Valor categorizado [km/h]
60 - 70	0
70 - 80	10
>80	20

La Tabla VI muestra la disposición de cada variable al realizar el ANOVA multifactorial.

Tabla VI. Resultados Anova Para Verificación Tabla I.

Factor	GL	SC Ajst	MC Ajst	Valor F	Valor P
Δ [°]	1	18.11	18.109	0.77	0.383
Le [m]	2	1.82	0.91	0.04	0.962
V_{oi-1} [km/h]	2	360.7	180.352	7.69	0.001
Δ [°] * Le	2	5.12	2.562	0.11	0.897
Δ [°] * V_{oi-1}	2	44.2	22.101	0.94	0.395
				R ²	28.35%
				R ² Ajustado	19.40%
				Diferencia	8.95%

De la Tabla VI se observó que la velocidad de operación en la curva anterior (V_{oi-1}) tiene la mayor significancia estadística; y que, al combinar factores geométricos con variables de velocidad hay pérdida de incidencia en la geometría del trazado sobre la respuesta velocidad de operación. Por tal razón, se realizó el análisis de varianza excluyendo a la variable velocidad de operación de la curva anterior, tal como lo muestra la Tabla VII; se observa que la variable que tiene significancia estadística es el ángulo de deflexión por su valor $P=0.008$ ($P<0.05$).

Tabla VII. Resultados Anova Para Verificación Tabla 1 Excluyendo Voi-1.

Factor	GL	SC Ajst	MC Ajst	Valor F	Valor P
Δ [°]	1	200.94	200.936	7.43	0.008
Le [m]	2	50.25	25.123	0.93	0.4
Δ [°] * Le [m]	2	2.40	1.199	0.04	0.958
				R ²	10.45%
				R ² Ajustado	7.01%
				Diferencia	3.44%

Analizar el efecto que tiene la combinación de las variables independientes llevó a categorizarlas en distintos grupos tal como se muestra en la Tabla VIII, bajo estos intervalos se realizó los respectivos análisis de

varianza. Estos grupos surgieron de verificar diversas combinaciones que generaban sensibilidad en los valores de P .

Tabla VIII. Categorización Variables Independientes.

Grupo 1		Grupo 2	
Factor	Intervalos	Factor	Intervalos
Δ [°]	30, 90	Δ [°]	10, 30, 50, 70, 90
Rc [m]	50, 150, 250, 350, 450	Rc [m]	50, 150, 250, 350, 450
Le [m]	50, 150, 250, 350, 450	Le [m]	50, 150, 250, 350, 450
Se [%]	-5, 0, +5	Se [%]	-5, 0, +5
Dp [m]	80, 150	Dp [m]	80, 150
Vo i-1 [km/h]	0, 10, 20	Vo i-1 [km/h]	0, 10, 20
Grupo 3		Grupo 4	
Factor	Intervalos	Factor	Intervalos
Δ [°]	40, 80	Δ [°]	15, 45, 80
Rc [m]	100, 200, 300, 400	Rc [m]	100, 200, 300, 400, 500
Le [m]	100, 200, 300, 400	Le [m]	100, 200, 300, 400, 500
Se [%]	-5, 0, +5	Se [%]	-5, 0, +5
Dp [m]	80, 150	Dp [m]	71, 88, 105, 122, 139, 156, 173
Vo i-1 [km/h]	0, 10, 20	Vo i-1 [km/h]	0, 10, 20
Grupo 5		Grupo 6	
Factor	Intervalos	Factor	Intervalos
Δ [°]	15, 45, 80	Δ [°]	30, 90
Rc [m]	100, 350, 550	Rc [m]	100, 200, 300, 400
Le [m]	100, 350, 550	Le [m]	100, 200, 300, 400
Se [%]	-5, 0, +5	Se [%]	-5, 0, +5
Dp [m]	40, 80, 120, 150	Dp [m]	80, 150
Vo i-1 [km/h]	0, 10, 20	Vo i-1 [km/h]	0, 10, 20

La Tabla IX muestra el resultado análisis de varianza para cada grupo. Se analizaron las significancias estadísticas y cercanías aritmética entre resultados de R^2 y R^2 ajustado para cada modelo.

Tabla IX. Resultado Estadístico Para Cada Grupo

Grupo 1					
Factor	GL	SC Ajst	MC Ajst	Valor F	Valor P
Δ [°]	1	0.11	0.1062	0.01	0.943
Rc [m]	4	29.62	7.4052	0.36	0.833
Le [m]	4	35.86	8.9639	0.44	0.779
Se [%]	2	94.86	47.429	2.33	0.11
Dp [m]	1	22.41	22.406	1.1	0.3
Vo i-1 [km/h]	2	81.01	40.506	1.99	0.15
Δ * Le	4	70.63	17.658	0.87	0.492
Δ * Se	2	22.59	11.293	0.55	0.579
Δ * Dp	1	1.45	1.4542	0.07	0.791
Δ * Vo i-1	2	14.25	7.1226	0.35	0.707
Le * Dp	4	21.08	5.2696	0.26	0.903
Se * Dp	2	7.36	3.6785	0.18	0.835
Se * Vo i-1	4	63.98	15.995	0.79	0.541
Dp * Vo i-1	2	1.75	0.8752	0.04	0.958
Δ * Se * Vo i-1	2	6.17	3.0832	0.15	0.86
Δ * Dp * Vo i-1	2	0.37	0.1851	0.01	0.991
R^2					63.70%
R^2 Ajustado					29.99%
Diferencia					33.71%

Grupo 1					
Factor	GL	SC Ajst	MC Ajst	Valor F	Valor P
Δ [°]	1	218.09	218.091	10.2	0.002
Rc [m]	4	82.49	20.623	0.96	0.433
Le [m]	4	102.66	25.665	1.2	0.319
Se [%]	2	77.71	38.857	1.82	0.171
Dp [m]	1	26.19	26.195	1.23	0.273
Le * Dp	4	66.49	16.622	0.78	0.544
Se * Dp	2	19.91	9.955	0.47	0.63
R^2					42.87%
R^2 Ajustado					26.54%
Diferencia					16.33%

Grupo 2					
Factor	GL	SC Ajst	MC Ajst	Valor F	Valor P
Δ [°]	4	233.26	58.316	3.45	0.014
Rc [m]	4	77.84	19.46	1.15	0.343
Le [m]	4	93.86	23.465	1.39	0.251
Se [%]	2	79.03	39.517	2.34	0.107
Dp [m]	1	46.61	46.614	2.76	0.103
Vo i-1 [km/h]	2	227.61	113.803	6.73	0.003
Le * Dp	4	23.29	5.824	0.34	0.847
Se * Dp	2	2.13	1.067	0.06	0.939
Se * Vo i-1	4	51.88	12.971	0.77	0.551
Dp * Vo i-1	2	4.02	2.01	0.12	0.888
R^2					62.71%
R^2 Ajustado					41.91%
Diferencia					20.80%

Grupo 2					
Factor	GL	SC Ajst	MC Ajst	Valor F	Valor P
Δ [°]	4	291.1	72.776	3.43	0.014
Rc [m]	4	84.65	21.163	1	0.416
Le [m]	4	113.17	28.292	1.33	0.268
Se [%]	2	86.8	43.399	2.04	0.138
Dp [m]	1	31.51	31.51	1.48	0.228
Le * Dp	4	73.69	18.422	0.87	0.489
Se * Dp	2	4.63	2.317	0.11	0.897
R^2					45.96%
R^2 Ajustado					27.05%
Diferencia					18.91%

Grupo 3					
Factor	GL	SC Ajst	MC Ajst	Valor F	Valor P
Δ [°]	1	11.3	11.304	0.71	0.403
Rc [m]	4	239.01	59.752	3.7	0.011
Le [m]	4	126.33	31.584	1.96	0.119
Se [%]	2	68.48	34.238	2.12	0.133
Dp [m]	1	25.64	25.641	1.59	0.215
Vo i-1 [km/h]	2	121.14	60.57	3.75	0.032
Δ * Se	2	11.93	5.964	0.37	0.693
Δ * Dp	1	23.9	23.895	1.48	0.231
Δ * Vo i-1	2	21.37	10.685	0.66	0.521
Se * Dp	2	33.64	16.819	1.04	0.362
Se * Vo i-1	4	40.05	10.012	0.62	0.651
Δ * Le * Se	2	19.04	9.518	0.59	0.559
Δ * Se * Dp	8	138.14	17.268	1.07	0.402
Δ * Dp * Vo i-1	2	8.37	4.185	0.26	0.773
R ²					71.24%
R ² Ajustado					44.53%
Diferencia					26.71%

Grupo 3					
Factor	GL	SC Ajst	MC Ajst	Valor F	Valor P
Δ [°]	1	288.51	288.307	13.63	0.001
Rc [m]	4	243.1	60.776	2.87	0.031
Le [m]	4	191.13	47.782	2.26	0.075
Se [%]	2	144.8	72.402	3.42	0.04
Dp [m]	1	16.49	16.492	0.78	0.381
Δ * Se	2	62.66	31.331	1.48	0.237
Δ * Dp	1	28.77	28.765	1.36	0.249
Se * Dp	2	39.56	29.781	1.41	0.254
Δ * Le * Se	8	179.91	22.489	1.06	0.403
Δ * Se * Dp	2	9.55	4.777	0.23	0.799
R ²					31.50%
R ² Ajustado					27.25%
Diferencia					24.25%

Grupo 4					
Factor	GL	SC Ajst	MC Ajst	Valor F	Valor P
Δ [°]	2	51.75	25.875	1.77	0.943
Rc [m]	4	192	48.001	3.28	0.833
Le [m]	4	43.09	10.772	0.74	0.779
Se [%]	2	62.31	31.154	2.13	0.11
Dp [m]	6	140.57	23.429	1.6	0.3
Vo i-1 [km/h]	2	219.25	109.626	7.49	0.15
Δ * Se	4	40.89	10.223	0.7	0.492
Δ * Vo i-1	4	104.31	26.077	1.78	0.579
Se * Dp	12	260.09	21.674	1.48	0.791
R ²					74.55%
R ² Ajustado					49.71%
Diferencia					24.84%

Grupo 4					
Factor	GL	SC Ajst	MC Ajst	Valor F	Valor P
Δ [°]	2	115.92	57.961	2.6	0.085
Rc [m]	4	282.69	70.673	3.17	0.022
Le [m]	4	47.82	11.955	0.54	0.709
Se [%]	2	47.01	23.505	1.06	0.356
Dp [m]	6	228.07	38.011	1.71	0.14
Δ * Se	4	27.91	6.977	0.31	0.868
Se * Dp	12	213.13	17.761	0.8	0.651
R ²					55.60%
R ² Ajustado					23.48%
Diferencia					32.12%

Grupo 5					
Factor	GL	SC Ajst	MC Ajst	Valor F	Valor P
Δ [°]	2	48.13	24.0669	1.01	0.376
Rc [m]	2	1.28	0.6411	0.03	0.973
Le [m]	2	76.05	38.0254	1.6	0.22
Se [%]	2	87.01	43.5026	1.83	0.179
Dp [m]	2	61.72	30.8613	1.3	0.289
Vo i-1 [km/h]	2	78.14	39.0696	1.64	0.211
Δ * Le	4	111.91	27.9773	1.18	0.342
Δ * Se	4	24.22	6.0553	0.25	0.905
Δ * Dp	4	33.7	8.4245	0.35	0.839
Δ * Vo i-1	4	60.02	15.0053	0.63	0.645
Le * Se	4	122.6	30.6508	1.29	0.297
Le * Dp	4	196.97	49.2414	2.07	0.111
Se * Dp	4	49.39	12.3475	0.52	0.722
Se * Vo i-1	4	95.94	23.9845	1.01	0.419
Rc * Dp * Vo i-1	8	91.69	11.4612	0.48	0.859
R ²					70.73%
R ² Ajustado					18.25%
Diferencia					52.48%

Grupo 5					
Factor	GL	SC Ajst	MC Ajst	Valor F	Valor P
Δ [°]	2	166.18	83.091	3.07	0.056
Rc [m]	2	25.39	12.697	0.47	0.629
Le [m]	2	92.08	46.039	1.7	0.194
Se [%]	2	13.27	6.635	0.24	0.784
Dp [m]	2	129.31	64.657	2.39	0.103
Δ * Le	4	105.1	26.275	0.97	0.433
Δ * Se	4	10.8	2.7	0.1	0.982
Δ * Dp	4	56.41	14.101	0.52	0.721
Le * Se	4	173.55	43.387	1.6	0.19
Le * Dp	4	175.04	43.76	1.62	0.186
Se * Dp	4	45.83	11.458	0.42	0.791
R ²					45.99%
R ² Ajustado					6.92%
Diferencia					39.07%

Grupo 6					
Factor	GL	SC Ajst	MC Ajst	Valor F	Valor P
Δ [°]	1	0.19	0.1884	0.01	0.915
Rc [m]	4	217.34	54.3351	3.31	0.018
Le [m]	4	9.08	2.2695	0.14	0.967
Se [%]	2	85.24	42.6181	2.6	0.085
Dp [m]	1	25.53	25.5335	1.56	0.218
Vo i-1 [km/h]	2	90.48	45.2414	2.76	0.074
Δ * Le	4	52.64	13.1611	0.8	0.53
Δ * Se	2	7.1	3.5507	0.22	0.806
Δ * Dp	1	11.07	11.0698	0.68	0.416
Δ * Vo i-1	2	7.45	3.7262	0.23	0.798
Se * Dp	2	24.7	12.3489	0.75	0.477
Se * Vo i-1	4	58.22	14.5548	0.89	0.479
Dp * Vo i-1	2	19.59	9.7929	0.6	0.555
Δ * Se * Dp	2	17.36	8.6791	0.53	0.593
Δ * Dp * Vo i-1	2	4.46	2.2289	0.14	0.873
R ²					68.00%
R ² Ajustado					43.65%
Diferencia					24.35%

Grupo 6					
Factor	GL	SC Ajst	MC Ajst	Valor F	Valor P
Δ [°]	1	98.31	98.3066	4.52	0.038
Rc [m]	4	172.87	43.2183	1.99	0.108
Le [m]	4	82.97	20.7424	0.95	0.439
Se [%]	2	68.98	34.4894	1.59	0.213
Dp [m]	1	9.78	9.7783	0.45	0.505
Δ * Le	4	20.99	5.247	0.24	0.914
Δ * Se	2	1.92	0.9599	0.04	0.957
Δ * Dp	1	10	9.9972	0.46	0.5
Se * Dp	2	41.88	20.9397	0.96	0.387
Δ * Se * Dp	2	13.32	6.6591	0.31	0.737
R ²					46.54%
R ² Ajustado					25.34%
Diferencia					21.20%

De estos resultados se concluye que la variable independiente (V_{oi-1}) es aquella que presenta mayor significancia estadística. El análisis de las combinaciones refleja el valor de P más bajo, incluso con valores

de $P < 0.05$; seguido del ángulo de deflexión (Δ). Esto asegura que el comportamiento de la velocidad en una curva horizontal se ve afectada por la velocidad en la curva anterior y por el ángulo de deflexión.

Los coeficientes R^2 y R^2_{ajt} presentan valores bajos, situación normal cuando se realizan estudios de comportamiento humano: Aumentar la cantidad de datos no incrementaría este valor, y adicionar variables independientes podrían sobrestimar el modelo [22]. Guarda coherencia con los resultados obtenidos en el país vecino de Ecuador, García et al [17] obtuvieron coeficientes de R^2 bajos de regresiones determinadas por análisis de velocidad.

Conclusiones y recomendaciones

El manual de diseño geométrico de carreteras asigna velocidades específicas a partir de la velocidad de operación en la curva anterior y parámetros geométricos (ángulo de deflexión (Δ) y la longitud de entretangencias). En el estudio, se observó que las variables significativas fueron la velocidad operacional en la curva anterior y el ángulo de deflexión, esto para terreno ondulado.

A partir de los resultados de análisis de varianza multifactorial, la variable con mayor significancia estadística es la velocidad de operación en la curva anterior (V_{oi-1}), seguido del ángulo de deflexión (Δ). Es de notar que las demás variables geométricas analizadas no generan un patrón de sensibilidad en la velocidad, sin embargo, su significancia individual pudo presentarse por ruido que se elimina mediante el análisis estadístico. Como resultado de la investigación, se propone la Tabla X para la asignación de velocidad específica para curvas horizontales en terreno ondulado.

Tabla X. Resultado Estadístico Para Cada Grupo

Velocidad específica de la curva anterior VCH (km/h)	Velocidad de diseño del tramo VTR > 50 km/h		
	Longitud del segmento recto anterior (m)		
	$\Delta < 10^\circ$	$10^\circ < \Delta < 50^\circ$	$\Delta \geq 60^\circ$
VTR	VTR +10	VTR	VTR
VTR +10	VTR +10	VTR +10	VTR
VTR +20	VTR +20	VTR +10	VTR +10
CASO	1	2	3

Referencias

- [1] Organización Mundial de la Salud, "Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial 2018", Ginebra, 2018. [En línea]. Disponible: <https://apps.who.int/iris/>
- [2] A. Polus y C. Mattar-Habbid, "New Consistency Model for Rural Highways and Its Relationship to Safety", en *Journal of transportation engineering*. 130a ed. Haifa: ASCE Journal, 2008. [En línea]. Disponible: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2004\)130:3\(286\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:3(286))
- [3] D. Llopis-Castello, "Desarrollo de una metodología para el diseño y mejora de carreteras convencionales a partir del análisis de la seguridad vial mediante modelos de consistencia", *Universidad Politécnica de Valencia, Valencia*, 2018. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10251/100271>
- [4] M. Wooldridge, et al, "National Cooperative Highway Design Research Program Report 502: Geometric Design Consistency on High Speed rural Two Roadway", *Transportation Research Board*, Washington

D.C., 2003.

- [5] Ministerio de Transporte, “Manual de diseño geométrico de carretera INV 2008”, *Bogotá*, 2008. [En línea]. Disponible: <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/proyectos-de-norma/11313-manual-de-diseno-geometrico-de-carreteras-2008>
- [6] Organización Mundial de la Salud, “PLAN MUNDIAL decenio de acción para la seguridad vial 2021 – 2030”, *Ginebra*, 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.who.int/es/publications/m/item/global-plan-for-the-decade-of-action-for-road-safety-2021-2030>
- [7] J. F. Sánchez Ordoñez, "Metodología para la evaluación de consistencia del trazado de carreteras interurbanas de dos carriles", *Universidad Politécnica de Madrid, Madrid*, 2012. [En línea]. Disponible: <https://oa.upm.es/11371/>
- [8] C. A. Calero Valenzuela, "Metodología para la evaluación de la consistencia de diseño de carreteras Rurales de dos carriles", *Universidad de Puerto Rico, Recinto universitario de Mayagüez*, 2015. [En línea]. Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.11801/840>
- [9] R. Lamm, J. C. Hayward y J. G. Cargin, "Comparison of Different Procedures for Evaluating Speed Consistency", *Transportation Research Record 1100*, 1988.
- [10] R. Lamm, E. M. Choueiri, J. C. Hayward y A. Paluri, "Possible Design Procedure to Promote Design Consistency in Highway Geometric Design on Two-lane Rural Roads", *Transportation Research Record*, vol. 1195, 1995. [En línea]. Disponible: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1988/1195/1195-011.pdf>
- [11] J. E. Leisch y J. P. Leisch, "New Concepts in Design-Speed Application", *Transportation Research Board National Academies Science.*, vol. 631, 1977. [En línea]. Disponible: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1977/631/631-002.pdf>
- [12] J. McFadden y L. Elefteriadou, "Evaluating Horizontal Alignment Design Consistency of Two-lane Rural Highways: Development of New Procedure", *Transportation Research Board National Academies Science*, vol. 631: Journal. Transportation. Research Board, vol. 1737, n.º 1, pp. 9–17, enero de 2000. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3141/1737-02>
- [13] S. Cafiso y G. Cerni, "New Approach to Defining Continuous Speed Profile Models for Two-lane Rural Roads", *Transportation Research Record: Journal Transportation Research Board*, vol. 2309, n.º 1, pp. 157–167, enero de 2012. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3141/2309-16>
- [14] T. Echaveguren y Á. Díaz, "Perfiles de Velocidad de Operación en Curvas Horizontales Aisladas", *Ingeniería de transporte*, vol. 18, n.º 2, pp. 25–32, 2014. [En línea]. Disponible: <https://revistas.uchile.cl/index.php/CIT/article/view/28459>
- [15] R. A. Cunard, “Modeling Operating Speed”, *Transportation Research Board National Academies*. Washington, 2011. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/chrome-extension://>

efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec151.pdf

- [16] V. Martinelli, R. Ventura, M. Bonera, B. Barabino y G. Maternini, "Estimation operating speed for county road segment – Evidence from Italy", *International Journal Transpoirtation Science Technology*, 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2022.05.007>
- [16] V. Martinelli, R. Ventura, M. Bonera, B. Barabino y G. Maternini, "Estimating operating speed for county roads' segments – Evidence from Italy", *Int. J. Transp. Sci. Technol.*, 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2022.05.007>
- [17] Y. D. García-Ramírez y F. Alverca, "Calibración de Ecuaciones de Velocidades de Operación en Carreteras Rurales Montañosas de Dos Carriles: Caso de Estudio Ecuatoriano", *Revista Politécnica*, vol. 43, n.º 2, pp. 37–44, julio de 2019. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.33333/rp.vol43n2.1012>
- [18] C. J. L. Ulpiano, "Análisis del Comportamiento de Conductores en Curvas de bajo Ángulo de Deflexión", *Universidad Politécnica de Valencia*, 2021. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10251/159263>
- [19] D. G. Aguilar, "Modelo de Velocidad de Operación para la Evaluación de la Consistencia de Curvas Horizontales", *Universidad Autónoma de Querétaro*, 2022. [En línea]. Disponible: <http://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/3654>
- [20] E. de J. Solano, "Software Especializado en Cálculos Topográficos, Volúmenes y Diseño Geométricos de Vías TOPO3", *Universidad del Cauca*, 2021. [En línea]. Disponible: www.topo3.com
- [21] J. Hanke, "Google Earth Pro (Nº de versión 7.3.6.9345) ", *Windows, United State: Google LLC*. [En línea]. Disponible: www.google.com/intl/es/earth
- [22] "Noticias sobre Minitab Statistical Software". *Addlink Software Científico*. <http://www.addlink.es/noticias/minitab/>